## MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI ȘCOALA DOCTORALĂ DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIA SISTEMELOR

# TEZĂ DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII PRIVIND DEZVOLTAREA UNOR ALGORITMI DESTINAȚI ACHIZIȚIEI ȘI PRELUCRĂRII PARAMETRILOR S CU APLICAȚII ÎN ÎMBUNĂTĂȚIREA PERFORMANȚELOR ANALIZOARELOR VECTORIALE DE REȚEA DIN DOMENIUL MICROUNDELOR

Conducător științific Prof. univ. dr. ing. Paraschiv Nicolae

> Doctorand Ing. Roșca Cosmina - Mihaela

Ploiești 2018

## Mulțumiri

Cu ocazia finalizării tezei de doctorat, doresc să aduc sincere mulțumiri domnului Prof. univ. dr. ing. dr. h. c. Nicolae Paraschiv, coordonatorul științific al prezentei teze de doctorat, pentru contribuția la evoluția mea științifică, pentru efortul depus în consolidarea carierei mele academice, pentru suportul constant în vederea desfășurării stagiului de cercetare doctorală, pentru elaborarea lucrărilor științifice și a tezei de doctorat. Tot cu această ocazie doresc să îi adresez profunda mea recunoștință domnului profesor pentru încurajările, susținerea morală și sfaturile pe care mi le-a oferit permanent.

Cu deosebit respect, îmi exprim profunda recunoștință față de domnii Prof. univ. dr. ing. Liviu Miclea, Prof. univ. dr. ing. Adrian Filipescu și Prof. univ. dr. ing. Nicu Bizon pentru acceptul de a face parte din comisia de susținere și analiză a tezei de doctorat, cât și pentru efortul de întocmire a referatelor.

De asemenea, doresc să mulțumesc pentru suportul acordat întregului colectiv al companiei ANRITSU Solutions România, în cadrul căreia am realizat stagiul de cercetare doctorală în perioada 2014 – 2016, și, îndeosebi, doresc să adresez profunda mea recunoștință managerului software domnul Ing. Ciprian – Gabriel Vlăsceanu.

Adresez recunoștința mea întregii comisii de îndrumare formată din Prof. univ. dr. ing. Mihaela Oprea, Prof. univ. dr. ing. Otilia Cangea și Prof. univ. dr. ing. Gabriel Rădulescu pentru consilierea acordată pe tot parcursul elaborării tezei de doctorat.

În continuare doresc să îmi exprim recunoștința față de domnii Șef. lucr. dr. ing. mat. Cornel Marinescu și dr. ing. Octavian Ionescu pentru sugestiile aferente elaborării tezei de doctorat.

Sincera mea recunoștință este adresată, pe această cale, întregului colectiv de cadre didactice din Departamentul de Automatică, Calculatoare și Electronică din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică și Electrică, Universitatea Petrol – Gaze din Ploiești, și în mod deosebit colegilor mei Șef. lucr. dr. ing. Marius Olteanu, Șef. lucr. dr. ing. Emil Pricop, Drd. ing. Florin Zamfir și Șef. lucr. dr. ing. Ștefan Bala, pentru încurajările și aportul adus în demersurile necesare finalizării tezei mele de doctorat.

În final, doresc să mulțumesc familiei pentru susținerea morală și înțelegerea de care a dat dovadă pe toată durata acestei etape a vieții mele.

Ploiești, Septembrie 2018 Drd. ing. Cosmina – Mihaela ROȘCA

# Cuprins

Lista figurilor
Lista tabelelor7
Introducere9
<b>Capitolul 1</b> . Rolul analizoarelor vectoriale de rețea în determinarea caracteristicilor functionale ale dispozitivelor cu microunde
1 1 Tipuri și caracteriștici ale dispozițivelor cu microunde
1.1.1. Analiza în domeniul frecvenței   17
1.1.2. Clasificarea dispozitivelor cu microunde18
1.2. Caracteristici de frecvență specifice dispozitivelor cu microunde22
1.3. Probleme care privesc funcționalitatea dispozitivelor cu microunde27
1.3.1. Principiul de funcționare și schema bloc a unui analizor vectorial de rețea30
1.3.2. Testarea dispozitivelor cu microunde
1.4. Concluzii ale capitolului 1
<b>Capitolul 2</b> . Stadiul actual al realizărilor și tendințelor referitoare la resursele software aferente analizoarelor vectoriale de rețea
2.1. Factori de influență asupra măsurărilor de timp real specifice VNA-urilor
2.2. Teste de viteză ale algoritmilor actuali utilizați de VNA-uri pentru măsurarea parametrilor <i>S</i>
2.3. Reprezentarea datelor achiziționate și procesate cu ajutorul VNA-urilor42
2.3.1. Metoda de interpolare spline
2.3.2. Aproximarea prin metoda celor mai mici pătrate
2.3.3. Studiu de caz
2.4. Algoritmul Rational fitting53
2.5. Algoritmul Vector fitting
2.6. Concluzii ale capitolului 2

Capitolul 3. Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi pentru selecția optimă a
frecvențelor aplicate analizoarelor vectoriale de rețea
3.1. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe distanța euclidiană
3.1.1. Ilustrarea principiului ASF_DE62
3.1.2. Etapele aplicării ASF_DE66
3.1.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF_DE71
3.2. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil75
3.2.1. Ilustrarea principiului ASF_PEV75
3.2.2. Etapele aplicării ASF_PEV82
3.2.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF_PEV86
3.3. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem
3.3.1. Ilustrarea principiului ASF_PE90
3.3.2. Etapele aplicării ASF_PE95
3.3.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF_PE99
3.4. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări
liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte103
3.4.1. Ilustrarea principiului aferent ASF_ DMAP103
3.4.2. Etapele aplicării algoritmului ASF_DMAP108
3.4.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF_DMAP113
3.5. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe interpolarea rațională îmbunătățită118
3.5.1. Ilustrarea principiului ASF_ IRI118
3.5.2. Etapele aplicării ASF_IRI125
3.5.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF_IRI129
3.6. Analiză comparativă a performanțelor algoritmilor propuși133
3.6.1. Rezultatele testului TEG1
3.6.2. Rezultatele testului TEG2
3.6.3. Rezultatele testului TEG3140

3.6.4. Rezultatele testului TEG4	142
3.6.5. Sinteza rezultatelor testelor de evaluare globală	145
3.7. Concluziile capitolului 3	146
<b>Capitolul 4</b> . Contribuții privind proiectarea și implementarea unui sistem automată a filtrelor de înaltă frecvență bazat pe algoritmul ASF_DMAP	de acordare 148
4.1. Cercetări experimentale privind achiziția în timp real de la un analizor rețea	vectorial de
4.1.1. Implementarea algoritmului ASF_DMAP	152
4.1.2. Rezultate experimentale comparative	156
4.2. Contribuții privind dezvoltarea unui sistem de acordare automată a fil microunde	trelor pentru
4.2.1. Filtre cu microunde realizate cu cavități rezonante	164
4.2.2. Proiectarea sistemului automat de acordare propus	
4.2.2.1. Caracterizarea traductorului de intrare	174
4.2.2.2. Caracterizarea ansamblului Bloc de comandă (regulator) - execuție	- Element de
4.2.2.3. Caracterizarea elementului de execuție	175
4.2.2.4. Sinteza regulatorului	177
4.2.2.5. Caracterizarea procesului	
4.2.2.6. Traductorul de ieșire	
4.2.3. Implementarea sistemului automat de acordare	
4.2.3.1. Etapele implementării	178
4.2.3.2. Schema logică de implementare	179
4.2.3.3. Realizarea fizică a sistemului de acordare automată	
4.2.4. Testarea sistemului automat de acordare	
4.2.4.1. Rezultatele testului T <sub>1</sub>	
4.2.4.2. Rezultatele testului T <sub>2</sub>	
4.3. Propunere de adaptare a sistemului de acordare automată dezvoltat pent	tru filtrele de
microunde la filtrele de joasă frecvență	
4.4. Concluzii ale capitolului 4	

Capitolul 5. Concluzii generale, contribuții, diseminarea rezultatelor și direcții viitoare de
cercetare
5.1. Concluzii generale192
5.2. Contribuții originale ale tezei de doctorat195
5.3. Diseminarea rezultatelor cercetării197
5.4. Direcții posibile de continuare a cercetărilor198
Bibliografie
Webografie
Anexe
Anexa 1. Exemplu de format *.s2p utilizat pentru stocarea datelor achiziționate de la un analizor vectorial de rețea pentru DUT reprezentat de un cablu coaxial
Anexa 2. Caracteristicile filtrului trece bandă de tip ZFBP-2400+ utilizat în capitolul 2, pentru un exemplu de test
Anexa 3. Exemplu de calcul pentru funcțiile spline cubice în cadrul capitolului 2, paragraful 2.3.1
Anexa 4. Tabel cu rezultatele măsurărilor pentru 321 de frecvențe în domeniul 4.7 – 5.5 GHz aferent unui filtru de microunde
Anexa 4 Bis. Tabel restrâns cu rezultatele măsurărilor pentru 321 de frecvențe în domeniul 4.7 – 5.5 GHz aferent unui filtru de microunde (extras din Anexa 4)
Anexa 5. Codul <i>MAT_ASF_DE</i> dezvoltat în mediul Matlab <sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF_DE conform schemei logice prezentate în figura 3.5 din capitolul 3231
Anexa 6. Codul <i>MAT_ASF_PEV</i> dezvoltat în mediul Matlab <sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF_PEV conform schemei logice prezentate în figura 3.16 din capitolul 3
Anexa 7. Codul <i>MAT_ASF_PE</i> dezvoltat în mediul Matlab <sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF_PE conform schemei logice prezentate în figura 3.23 din capitolul 3 240
Anexa 8. Codul <i>MAT_ASF_DMAP</i> dezvoltat în mediul Matlab <sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF_DMAP conform schemei logice prezentate în figura 3.32 din capitolul 3

Anexa 9. Codul MAT_ASF_IRI dezvoltat în mediul Matlab® pentru implementarea
algoritmului ASF_IRI conform schemei logice prezentate în figura 3.44 din capitolul 3246
Anexa 10. Codul MAT_ASF_COMPARE dezvoltat în mediul Matlab <sup>®</sup> pentru
implementarea algoritmului ASF_COMPARE conform schemei logice prezentate în figura
4.2 din capitolul 4
Anexa 11. Foaia de catalog a motorului pas cu pas 28BYJ-48 – 5V utilizat la implementarea SAAF prezentat în capitolul 4 conform referinței
Anexa 12. Codul dezvoltat în mediul Matlab® PROG_SAAF pentru implementarea SAAF
prezentat în capitolul 4255
Anexa 13. Tabel cu rezultatele măsurărilor pentru 1001 frecvențe în domeniul 14 - 15.5
GHz ale filtrului etalon

## Table of contents

List of figures	1
List of tables	7
Introduction	9
Chapter 1. Introduction to vector network analyzer used to describe the microwave	device
behaviour	13
1.1. Types and features of microwave devices	16
1.1.1. Frequency domain analysis	17
1.1.2. The classification of microwave devices	18
1.2. Frequency characteristics of microwave devices	22
1.3. Issues concerning the functionality of microwave devices	27
1.3.1. Vector Network Analyzer basics and block diagram	30
1.3.2. Microwave testing device	32
1.4. Conclusions of chapter 1	35
Chapter 2. State-of-the-art and trends in software resources related to VNAs	36
2.1. Parameters influencing real time measurements of VNAs	36
2.2. Speed tests for the traditional S parameters measurement used by VNAs	38
2.3. Data acquisition and data processing using VNAs	42
2.3.1. Spline interpolation method	44
2.3.2. Least mean squares method	46
2.3.3. Case study	50
2.4. Rational fitting algorithm	53
2.5. Vector fitting algorithm	56
2.6. Conclusions of chapter 2	57

Chapter 3. Contributions to the development of algorithms for optimal frequency selection	m
applied to Vector Network Analyzers5	58
3.1. Frequency selection algorithm based on Euclidean distance (ASF_DE)6	52
3.1.1. ASF_DE principle of design6	52
3.1.2. ASF_DE algorithm steps6	56
3.1.3. Validation of the ASF_DE by simulation7	71
3.2. Frequency selection algorithm based on step – size (ASF_PEV)7	15
3.2.1. ASF_PEV principle of design7	15
3.2.2. ASF_PEV algorithm steps	32
3.2.3. Validation of the ASF_PEV by simulation	36
3.3. Frequency selection algorithm based on extreme points (ASF_PE)9	<del>)</del> 0
3.3.1. ASF_PE principle of design9	<del>)</del> 0
3.3.2. ASF_PE algorithm steps9	<del>)</del> 5
3.3.3. Validation of the ASF_PE by simulation9	<del>)</del> 9
3.4. Frequency selection algorithm based on the maximum differences between linear approximations and polynomial approximations for the same number of poin (ASF_DMAP)	ar Its )3
3.4.1. ASF_ DMAP principle of design10	)3
3.4.2. ASF_DMAP algorithm steps10	)8
3.4.3. Validation of the ASF_DMAP by simulation11	13
3.5. Frequency selection algorithm based on improved rational interpolation (ASF_IR	I) 8
3.5.1. ASF_ IRI principle of design11	8
3.5.2. ASF_IRI algorithm steps12	25
3.5.3. Validation of the ASF_IRI by simulation12	29
3.6. Comparative analysis of the proposed algorithms performance	33
3.6.1. The results of the TEG1 test13	35
3.6.2. The results of the TEG2 test	37

3.6.3. The results of the TEG3 test	140
3.6.4. The results of the TEG4 test	142
3.6.5. The results for global tests	145
3.7. Conclusions of chapter 3	146
<b>Chapter 4.</b> Contributions to the design and implementation of an automated syshigh frequency filter tuning based on ASF_DMAP	stem for a
4.1. Experimental research on real – time acquisition data from a VNA	148
4.1.1. Implementation of the ASF_DMAP	152
4.1.2. Comparative experimental results of the research	156
4.2. Contributions to the development of an automated microwave filter tuning s	ystem 164
4.2.1. Microwave resonant cavities filters	164
4.2.2. Design of the proposed filter tuning system	172
4.2.2.1. Input transducer description	174
4.2.2.2. Regulator – Control system description	174
4.2.2.3. Control system description	175
4.2.2.4. Regulator description	177
4.2.2.5. Process description	178
4.2.2.6. Output transducer	
4.2.3. Implementation of the proposed filter tuning system	178
4.2.3.1. Implementation steps	178
4.2.3.2. Implementation of logical scheme	179
4.2.3.3. Practical implementation of the automatic tuning system	181
4.2.4. Testing the filter tuning system	
4.2.4.1. Results for test T <sub>1</sub>	
4.2.4.2. Results for test T <sub>2</sub>	185
4.3. Proposal to adapt the automatic high frequency filter tuning system to	the low
frequency filter	187
4.4. Conclusions of chapter 4	

Chapter 5. General conclusions, contributions, dissemination and future researches	192
5.1. General conclusions	192
5.2. Original contributions on the PhD thesis	195
5.3. Dissemination of the research	197
5.4. Future research directions	198
References	200
Webography	206
Appendix	208
Appendix 1. s2p file format example	208
Appendix 2. Bandpass filter ZFBP-2400+ datasheet	209
Appendix 3. Computing example for cubic spline interpolation	212
Appendix 4. Table of 321 measurement results for 4.7 – 5.5 GHz frequency doma a microwave filter	in using 215
Appendix 4 Bis. Reduced table of 321 measurement results for 4.7 - 5.5 GHz free	equency
domain using a microwave filter	223
Appendix 5. MAT_ASF_DE impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	231
Appendix 6. MAT_ASF_PEV impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	237
Appendix 7. MAT_ASF_PE impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	240
Appendix 8. MAT_ASF_DMAP impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	243
Appendix 9. MAT_ASF_IRI impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	246
Appendix 10. MAT_ASF_COMPARE impelmentation developed with Matlab <sup>®</sup>	250
Appendix 11. 28BYJ-48 – 5V Stepper datasheet	253
Appendix 12. PROG_SAAF implementation	255
Appendix 13. Table of 1001 measurement results for 14 - 15.5 GHz frequency	domain
using a microwave golden unit filter	256

## Lista figurilor

Fig. 1.1 - Spectrul de frecvențe	13
Fig. 1.2 - Analogie între analiza unui semnal luminos și un semnal de înaltă frecvență	pentru
explicarea principiului de bază al analizei rețelei	14
Fig. 1.3 – Reprezentarea unui semnal sinusoidal	17
Fig. 1.4 - Secțiune în linia de transmisie utilizată pentru interconectarea componentelor	19
Fig. 1.5 - Secțiuni transversale ale ghidurilor de undă uniforme	20
Fig. 1.6 – Tipuri de dispozitive testate cu ajutorul VNA-urilor	20
Fig. 1.7 – Tipurile de semnal în cadrul unei rețele de microunde	23
Fig. 1.8 – Ilustrarea definirii conceptuale a parametrilor S	24
Fig. 1.9 - Rețea cu două porturi care ilustrează undele incidente și pe cele reflectat	e prin
intermediul parametrilor a <sub>i</sub> și b <sub>i</sub>	25
Fig. 1.10 - Schema electrică de conectare a unui DUT la un VNA cu 2 porturi repre	zentat
prin sursa Us	26
Fig. 1.11 - Atenuarea semnalelor electromagnetice prin atmosferă în funcție de frecvenț	ă27
Fig. 1.12- Aplicații ale microundelor	29
Fig. 1.13 – Ilustrarea principiului de funcționare a unui VNA	31
Fig. 1.14 – Setarea domeniului de frecvențe în care se realizează măsurările	32
Fig. 1.15 – Ilustrarea calibrării open – short – load – thru	33
Fig. 1.16 - Răspunsul filtrului trece bandă ZFBP-2400-S+ în reprezentare logmag	34
Fig. 2.1 - Integrarea echipamentelor pentru efectuarea testării vitezei cu care se real	izează
măsurările în modul simulare	38
Fig. 2.2 - Ilustrarea transferului de date dintre dispozitivele Raspberry Pi și Simulator	39
Fig. 2.3 – Imaginea VNA Anritsu MS46522A utilizat pentru aplicația test	40
Fig. 2.4 - Montajul și un ecran de lucru al aplicației pentru monitorizarea vitezei de l	ucru a
VNA-ului MS46522A	40
Fig. 2.5 - Interfața aplicației pentru o singură interogare folosind conexiunea de tip VXI	41
Fig. 2.6 - Interfața aplicației pentru o singură interogare folosind conexiunea de tip TCF	<b>P/IP</b> 41
Fig. 2.7 – Interpolarea liniară între două eșantioane consecutive	43
Fig. 2.8 - Interpolarea spline pentru trei eșantioane	46
Fig. 2.9 – Ilustrarea principiului de aproximare prin metoda celor mai mici pătrate	47
Fig. 2.10 – Rezultatul grafic al aproximării pentru exemplul din Tabelul 2.1	50

Fig. 2.11 – Rezultatul interpolării prin metoda spline cubică pentru studiul de caz52
Fig. 2.12 – Rezultatul aproximării prin metoda celor mai mici pătrate pentru studiul de caz.52
Fig. 2.13 – Reprezentarea celor cinci eșantioane și a interpolărilor $R_3$ și $R_4$
Fig. 3.1 - Abordarea de tip intrare – ieșire a unui ASF
Fig. 3.2 - Ilustrarea alegerii celor trei frecvențe normate uniform distribuite în cadrul aplicării
ASF_DE64
Fig. 3.3 - Adăugarea punctului D având coordonatele (0.6125, 0.6094) în cadrul aplicării
ASF_DE65
Fig. 3.4 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF_DE67
Fig. 3.5 – Schema logică aferentă ASF_DE70
Fig. 3.6 – Reprezentarea caracteristicilor $A_{11}$ – frecvență rezultate din testul $T_1$ asociat
ASF_DE72
Fig. 3.7 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_1$
aferent ASF_DE73
Fig. 3.8 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat ASF_DE
pentru 50 de frecvențe74
Fig. 3.9 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_2$ aferent
ASF_DE75
Fig. 3.10 – Ilustrarea variației de amplitudine pentru ASF_PEV78
Fig. 3.11 – Ilustrarea situației $\alpha < \theta$ pentru care se propune creșterea pasului de explorare în
cazul ASF_PEV: A, B puncte extrase din Lentila 1 - figura 3.10
Fig. 3.12 - Ilustrarea situației $\alpha \ge \theta$ pentru care se propune scăderea pasului de explorare în
cazul ASF_PEV: C, D puncte extrase din Lentila 2 - figura 3.10
Fig. 3.13 – Ilustrarea modalității de calcul în cadrul ASF_PEV a unghiului α80
Fig. 3.14 – Ilustrarea unghiului $\alpha$ asociat dreptei care trece prin punctele A și B aferente
Lentilei 1 din figura 3.10
Fig. 3.15 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF_PEV
Fig. 3.16 – Schema logică aferentă algoritmului ASF_PEV
Fig. 3.17 – Reprezentarea caracteristicilor $A_{11}$ – frecvență rezultate din testul T <sub>1</sub> asociat ASF_
PEV
Fig. 3.18 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecventă rezultate din testul T <sub>1</sub>

Fig. 3.19 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat
ASF_PEV pentru 50 de frecvențe
Fig. 3.20 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_2$
aferent ASF_PEV
Fig. 3.21 – Ilustrarea principiului ASF_PE care utilizează puncte de extrem93
Fig. 3.22 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF_PE96
Fig. 3.23 – Schema logică aferentă algoritmului ASF_PE98
Fig. 3.24 – Reprezentarea caracteristicilor $A_{11}$ – frecvență rezultate din testul $T_1$ asociat
ASF_PE100
Fig. 3.25 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_1$
aferent ASF_PE101
Fig. 3.26 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat ASF_PE
pentru 26 de frecvențe
Fig. 3.27 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_{\rm 2}$
aferent ASF_PE
Fig. 3.28 – Reprezentarea caracteristicii $A_{11}$ – frecvență a filtrului utilizat în cadrul testelor
asociate celor cinci algoritmi propuși104
Fig. 3.29 - Ilustrarea principiului ASF_ DMAP pentru aproximarea polinomială de grad 3
Fig. 3.30 - Ilustrarea principiului ASF_DMAP pentru o curbă care conține 7 puncte107
Fig. 3.31 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF_DMAP109
Fig. 3.32 – Schema logică aferentă ASF_DMAP112
Fig. 3.33 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_{\rm 1}$
aferent ASF_DMAP113
Fig. 3.34 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat
ASF_DMAP pentru 25 de frecvențe
Fig. 3.35 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat
ASF_DMAP pentru 40 de frecvențe115
Fig. 3.36 - Reprezentarea caracteristicilor $A_{11}$ – frecvență rezultate din testul $T_2$ asociat $ASF$
DMAP116
Fig. 3.37 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_2$
aferent ASF_DMAP117
Fig. 3.38 - Arborele asociat al funcției $\varphi$ pentru k = 3 în cadrul ASF_IRI120

Fig. 3.39 – Identificarea unui nou punct de frecvență prin calculul valorii $max(R_3(f) - R_2(f))$
în cadrul ASF_IRI121
Fig. 3.40 – Arborele asociat funcției $\varphi$ pentru k = 4 în cadrul ASF_IRI
Fig. 3.41 – Exemplu de situație când interpolarea rațională din cadrul ASF_IRI nu oferă o
soluție123
Fig. 3.42 – Schema redusă a modelului bazat pe interpolarea rațională pentru $k = 4$ în cadrul
ASF_IRI
Fig. 3.43 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF_IRI126
Fig. 3.44 – Schema logică aferentă ASF_IRI128
Fig. 3.45 – Reprezentarea caracteristicilor $A_{11}$ – frecvență rezultate din testul $T_1$ asociat
ASF_IRI
Fig. 3.46 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_1$
aferent ASF_IRI131
Fig. 3.47 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului $T_1$ aplicat ASF_IRI
pentru 50 de frecvențe131
Fig. 3.48 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul $T_2$
aferent ASF_IRI
Fig. 3.49 – Graficul erorii globale asociate TEG1135
Fig. 3.50 - Graficul timpilor de execuție asociați TEG1136
Fig. 3.51 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG1136
Fig. 3.52 - Graficul erorii globale asociate TEG2
Fig. 3.53 - Graficul timpilor de execuție asociați TEG2138
Fig. 3.54 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG2139
Fig. 3.55 - Graficul erorii globale asociate TEG3140
Fig. 3.56 - Graficul timpilor de execuție asociați TEG3141
Fig. 3.57 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG3141
Fig. 3.58 - Graficul erorii globale asociate TEG4143
Fig. 3.59 - Graficul timpilor de execuție asociați TEG4143
Fig. 3.60 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG4144
Fig. 3.61 - Graficul punctajelor totale aferente fiecărui algoritm în cadrul celor patru teste 146
Fig. 4.1 - Abordarea de tip intrare – ieșire a unui algoritm preimplementat pe un VNA149
Fig. 4.2 – Schema logică a algoritmului ASF_DMAP aplicat achiziției datelor în timp real

Fig. 4.3 – Standul experimental pentru achiziția și prelucrarea parametrilor $S$ de la un VNA
pentru un DUT de tip diplexor157
Fig. 4.4 – Interfața grafică a aplicației ASF_COMPARE pentru testul T1159
Fig. 4.5 – Standul experimental pentru achiziția și prelucrarea parametrilor $S$ de la un VNA
pentru un DUT reprezentat de un cablu coaxial160
Fig. 4.6 – Interfața grafică a aplicației ASF_COMPARE pentru testul T <sub>2</sub> 161
Fig. 4.7 – Ansamblul dispozitivului testat format din cablu coaxial și conector
de tip OPEN - SHORT162
Fig. 4.8 - Interfața grafică a aplicației ASF_COMPARE pentru testul $T_3$ 163
Fig. 4.9 - Rezonator cilindric
Fig. 4.10 – Secțiune transversală aferentă unei cavități rezonante
Fig. 4.11 – Secțiune transversală aferentă unui filtru cu trei cavități167
Fig. 4.12 – Schema electrică echivalentă a unui filtru cu trei cavități167
Fig. 4.13 – Schema bloc a unui VNA cu evidențierea conectării DUT168
Fig. 4.14 – Conectarea informațională a unui filtru la VNA169
Fig. 4.15 – Stand experimental destinat testării unui filtru pentru microunde
Fig. 4.16 – Structură stand experimental realizat cu VNA de tip Anritsu MS46522A171
Fig. 4.17 - Captură de ecran cu rezultatele execuției aplicației Anritsu ShockLine utilizate
pentru afișarea caracteristicilor unui filtru cu domeniul de lucru 2 – 3 GHz171
Fig. 4.18 – Structura sistemului automat de acordare a filtrelor (SAAF) propus173
Fig. 4.19 – Ansamblul bloc de comandă (regulator) – element de execuție174
Fig. 4.20 – Caracteristica statică impusă pentru ansamblul BC – EE175
Fig. 4.21 – Driverul de putere ULN2003 și motorul pas cu pas din structura EE175
Fig. 4.22 – Structura și înfășurările motorului pas cu pas din structura EE
Fig. 4.23 - Caracteristica statică a EE din cadrul SAAF177
Fig. 4.24 - Caracteristica statică rezultată pentru regulatorul din cadrul SAAF177
Fig. 4.25 - Procesul aferent SAAF reprezentat de ansamblul Filtru - VNA178
Fig. 4.26 - Schema logică pentru implementarea SAAF
Fig. 4.27 – Implementarea fizică a SAAF – vedere de ansamblu181
Fig. 4.28 - Implementarea fizică a SAAF – vedere laterală
Fig. 4.29 – Filtrul cu 12 cavități rezonante utilizat pentru realizarea testelor
Fig. 4.30 – Caracteristica amplitudine A11 (corespunzătoare parametrului S11) – frecvență
aferentă filtrului etalon

Fig. 4.31 - Filtrul parte a procesului cu evidențierea șurubului aferent cavității asupra căruia
s-a intervenit în cadrul testului T1184
Fig. 4.32 - Caracteristicile amplitudine - frecvență rezultate în cadrul testului T1aplicat
SAAF
Fig. 4.33 - Filtrul parte a procesului cu evidențierea joncțiunii (șurubului de cuplare) dintre
cavitatea 1 și cavitatea 2 pentru care s-a aplicat testul T <sub>2</sub> 186
Fig. 4.34 - Caracteristicile amplitudine – frecvență rezultate în cadrul testului $T_2$ aplicat
SAAF
Fig. 4.35 - Schema electrică a filtrului trece – jos RC de ordin I
Fig. 4.36 – Răspunsul real în frecvență a unui filtru pasiv de tip trece jos
Fig. 4.37 – Abordarea de tip intrare – ieșire a unui filtru de tip trece jos (FTJ)188
Fig. 4.38 – Schema electrică a filtrului trece – jos de tip RC cu rezistență variabilă
Fig. 4.39 - Structura propusă pentru un sistem de acordare automată (SAAF) a unui filtru
trece - jos ( FTJ)
Fig. 4.40 – Schema de reglare cu acțiune după abatere pentru FTJ în care frecvența $f_i$ și
tensiunea U <sub>i</sub> pot fi interpretate ca perturbații

## Lista tabelelor

Tabelul 2.1 – Eșantioane evaluate pentru metoda celor mai mici pătrate
Tabelul 3.1 – Algoritmi propuși pentru îndeplinirea obiectivelor stabilite
Tabelul 3.2 - Valorile din cadrul ASF_DE pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele
normate și valorile A <sub>11</sub> corespunzătoare64
Tabelul 3.3 – Adăugarea unei noi frecvențe în cadrul ASF_DE65
Tabelul 3.4 – Numărul impus de puncte pentru cele două familii de teste aplicate ASF_DE.71
Tabelul 3.5 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_DE pentru un număr diferit de
frecvențe evaluate
Tabelul 3.6 - Valorile din cadrul ASF_PEV pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele
normate și valorile A <sub>11</sub> corespunzătoare77
Tabelul 3.7 - Concluzii referitoare la sensul de variație a pasului de explorare aferent
ASF_PEV79
Tabelul 3.8 - Relațiile propuse pentru actualizarea pasului de explorare aferent ASF_PEV81
Tabelul 3.9 – Adăugarea unei noi frecvențe prin metoda ASF_PEV82
Tabelul 3.10 Numărul de puncte evaluate de către ASF_PEV pentru familiile de teste $T_1$ și $T_2$
05
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
<ul> <li>Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate</li></ul>
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit defrecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit defrecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de         frecvențe evaluate       90         Tabelul 3.12 - Valorile din cadrul ASF_PE pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențele       90         Tabelul 3.12 - Valorile din cadrul ASF_PE pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențele       91         Tabelul 3.13 - Adăugarea unei noi frecvențe prin metoda ASF_PE.       94         Tabelul 3.14 - Codificarea variabilei progress pentru ASF_PE       94         Tabelul 3.15 - Numărul de puncte necesar a fi evaluate de către ASF_PE pentru cele două familii de teste.       99         Tabelul 3.16 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PE pentru un număr diferit de frecvențe evaluate       103
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate
Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_PEV pentru un număr diferit de         frecvențe evaluate

Tabelul 3.20 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_DMAP pentru un număr diferit de
frecvențe evaluate
Tabelul 3.21 - Valorile din cadrul ASF_ IRI pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele
normate și valorile A <sub>11</sub> corespunzătoare120
Tabelul 3.22 - Valorile din cadrul ASF_ IRI pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențele
normate și valorile A <sub>11</sub> corespunzătoare122
Tabelul 3.23 – Numărul de puncte pentru cele două familii de teste $T_1$ și $T_2$ în cadrul
ASF_IRI129
Tabelul 3.24 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_IRI pentru un număr diferit de
frecvențe evaluate
Tabelul 3.25 – Algoritmi propuși de către autoare pentru îndeplinirea obiectivelor stabilite133
Tabelul 3.26 – Elemente aferente testelor de evaluare globală
Tabelul 3.27 - Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG1135
Tabelul 3.28 - Indicatorii globali calculați în cadrul TEG1136
Tabelul 3.29 - Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG1
Tabelul 3.30 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG2137
Tabelul 3.31 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG2
Tabelul 3.32 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG2
Tabelul 3.33 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG3140
Tabelul 3.34 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG3141
Tabelul 3.35 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG3
Tabelul 3.36 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG4142
Tabelul 3.37 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG4143
Tabelul 3.38 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG4144
Tabelul 3.39 – Punctajele cumulate (P_TOT) aferente fiecărui algoritm în cadrul celor patru
teste
Tabelul 3.40 – Clasificarea algoritmilor rezultată ca urmare a însumării punctelor obținute în
cadrul celor patru teste
Tabelul 4.1 – Valorile experimentale aferente testului T <sub>1</sub> pentru un diplexor158
Tabelul 4.2 – Valorile experimentale aferente testului T <sub>2</sub> pentru un cablu coaxial159
Tabelul 4.3 – Valorile experimentale asociate testului $T_3$ pentru un ansamblu cablu coaxial –
conector OPEN – SHORT
Tabelul 4.4 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF_DMAP pentru cele trei teste 164

### Introducere

Evoluția din domeniile științific și tehnologic specifică secolului XXI se bazează, printre altele, pe uimitoarele progrese obținute în transmiterea informației. În acest sens, electronica pune la dispoziție mijloace din ce în ce mai performante care să permită transferul într-un timp foarte scurt și cu pierderi minime a mari cantități de informație. Ca suport pentru transmiterea informației sunt utilizate în prezent semnale cu frecvențe care pot ajunge până la 3 THz. Cu precădere, semnalele de înaltă și ultra-înaltă frecvență sunt utilizate în comunicații aferente domeniilor spațial, militar și civil. Nu pot fi neglijate utilizările acestor tipuri de semnale în realizarea echipamentelor radar, utilizate în diverse medii sub forma undelor electromagnetice, în ceea ce urmează, se va folosi termenul de *microunde* pentru a caracteriza semnalele cu domeniul de frecvență mai mari de 300 MHz.

Rezultă din cele menționate mai sus, că în prezent se fabrică o gamă largă de echipamente care să lucreze la ultra-înaltă frecvență, echipamente care prin trăsăturile lor sunt diferite de cele aferente frecvențelor joase, medii, înalte.

Un aspect demn de relevat este cel reprezentat de necesitatea testării performanțelor acestor echipamente în vederea, printre altele, a omologării. Între echipamentele suport existente pentru testarea performanțelor anumitor echipamente specifice microundelor sunt analizoarele vectoriale de rețea (Vector Network Analyzer – VNA). Acestea dispun de algoritmi preimplementați care se bazează pe utilizarea unor parametri specifici microundelor, între care *parametrii S*.

Prezenta teză de doctorat, intitulată *Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi* destinați achiziției și prelucrării parametrilor S cu aplicații în îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea din domeniul microundelor, a avut drept obiective:

- creșterea vitezei de lucru a analizoarelor vectoriale de rețea pentru reducerea timpului de achiziție și prelucrarea a parametrilor *S*;
- utilizarea parametrilor S pentru determinarea caracteristicilor amplitudine frecvență cu ajutorul cărora se caracterizează dispozitivele testate;
- proiectarea şi implementarea unui sistem automat de acordare a filtrelor de foarte înaltă frecvenţă cu cavităţi rezonante.

Teza de doctorat este structurată în patru capitole la care se adaugă un capitol de concluzii care alături de concluziile generale ale tezei evidențiază contribuțiile originale ale

autoarei, diseminarea rezultatelor cercetării efectuate pe parcursul studiilor universitare de doctorat, precum și o serie de propuneri privind direcțiile viitoare de continuare a cercetărilor. Celor cinci capitole li se adaugă bibliografia, webografia, 13 anexe, liste cu tabele și figuri. Referințele bibliografice și webografice sunt prezentate în ordinea citării în text.

Fiecare capitol este organizat dintr-o succesiune de mai multe subcapitole care încep cu formularea de obiective, continuă cu prezentarea stadiului actual al cercetărilor în domeniu, elaborarea de soluții proprii care îmbunătățesc diferite aspecte ale problematicii analizate, testarea practică a soluțiilor propuse pentru a se demonstra valabilitatea și aplicabilitatea generalizată, și se finalizează cu surprinderea celor mai importante idei sub forma unor concluzii.

**Capitolul 1** abordează la modul general o parte din problematica aferentă undelor electromagnetice, tipologia analizoarelor vectoriale de rețea (VNA), a ghidurilor de undă, precum și a altor dispozitive testate cu ajutorul VNA-urilor. De asemenea, se prezintă principiul de funcționare a unui VNA și elementele componente ale acestuia. În acest capitol sunt detaliate etapele de testare ale unui dispozitiv în domeniul microundelor și se exemplifică cu o măsurare realizată pentru un filtru de tip trece bandă, la care atenuarea teoretică este nulă în banda de trecere și infinită în banda de oprire (blocare). Pentru această măsurare a fost utilizat un VNA de tip Vector Star<sup>®</sup> produs de compania Anritsu.

**În capitolul 2** sunt evidențiați factorii care influențează viteza de măsurare a unui VNA și se prezintă o aplicație capabilă să comunice cu un astfel de dispozitiv, aplicație implementată de către autoare cu scopul evidențierii vitezelor scăzute și implicit a duratelor ridicate de măsurare.

Unul dintre obiectivele prezentei teze de doctorat a constat în analiza proceselor și caracteristicilor de calitate prin alegerea unui număr minim de eșantioane. Se pune implicit problema consistenței care impune ca eșantioanele să aibă o distribuție care să permită refacerea răspunsului original al dispozitivului testat bazându-se pe acest număr minim de eșantioane. În acest sens, în teză este realizată o comparație între metodele de interpolare și metodele de aproximare. Comparația se realizează prin intermediul unui test care presupune măsurări pentru 400 de frecvențe în intervalul 14 - 15.5 GHz aplicate unui filtru din domeniul microundelor. De asemenea, se prezintă și alte metode de referință din domeniul microundelor utilizate pentru determinarea comportamentului dispozitivelor testate care presupun minimizarea numărul de frecvențe implicate.

**Capitolul 3** este consacrat prezentării a cinci algoritmi dezvoltați sau perfecționați de către autoare. Validarea performanțelor acestora s-a realizat prin analiza următorilor indicatori: *numărul redus de frecvențe rezultat, frecvențele utilizate pentru simularea măsurării complete în raport cu numărul total de frecvențe inițiale, eroarea relativă pe intervale, eroarea relativă globală și timpul de execuție necesar rulării algoritmului, pentru acesta din urmă utilizându-se funcții adecvate contorizării timpului din mediul Matlab<sup>®</sup>.* 

În vederea identificării celui mai performat algoritm, s-a realizat o analiză comparativă a celor cinci algoritmi folosind pentru test patru dispozitive și trei indicatori propuși, după cum urmează: *indicatorul procentual de calitate a erorii, indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție* și *indicatorul mediu ponderat*.

**Capitolul 4** este destinat în primul rând prezentării unui sistem automat propus pentru acordarea filtrelor utilizate în domeniul microundelor. Prima secțiune a acestui capitol conține un test comparativ între achiziția în timp real a datelor de la un analizor vectorial de rețea prin metoda convențională (clasică) și algoritmul considerat ca având cele mai bune performanțe din punct de vedere al timpului de achiziție în raport cu acuratețea datelor achiziționate. Pentru efectuarea analizei comparative, au fost propuși și utilizați următorii indicatori: *indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte* și *indicatorul procentual de calitate al timpului de achiziție*.

A doua parte a capitolului 4 conține descrierea și rezultatele implementării unui sistem de acordare automată a unui filtru cu cavități rezonante specific domeniului microundelor. Acordarea are ca obiectiv obținerea unei caracteristici amplitudine – frecvență pentru filtrul supus acordării, cât mai apropiată de caracteristica amplitudine – frecvență a unui filtru etalon, în limita unei toleranțe admisibile. Pe lângă creșterea vitezei de acordare și implicit scăderea timpului aferent acordării, sistemul automat contribuie la diminuarea rolului operatorului uman implicat și la creșterea eficienței activității acestuia. Validarea funcționalității sistemului de reglare automată s-a realizat prin efectuarea a două teste diferențiate de parametrii specifici filtrului cu cavități (având domeniul de analiză 14 - 15.5 GHz) asupra cărora se intervine.

O parte dintre cercetările aferente tezei de doctorat au fost realizate în laboratoarele Departamentului Automatică, Calculatoare și Electronică din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică și Electrică a Universității de Petrol – Gaze din Ploiești. Cea mai mare parte a investigațiilor au fost efectuate în cadrul companiei ANRITSU Solutions România din București, în cadrul Laboratorului de testare a echipamentelor pentru microunde, unde autoarea a efectuat un stagiu de cercetare doctorală.

Rezultatele cercetărilor au fost diseminate în 8 lucrări la care autoarea tezei de doctorat este prim autor.

# Capitolul 1. Rolul analizoarelor vectoriale de rețea în determinarea caracteristicilor funcționale ale dispozitivelor cu microunde

Ingineria microundelor are printre obiective proiectarea și implementarea sistemelor care operează la frecvențe înalte și foarte înalte, cum este cazul domeniului comunicațiilor mobile. Undele electromagnetice sunt clasificate conform spectrului frecvențelor prezentat în figura 1.1. Domeniului microundelor îi corespund undele electromagnetice cu frecvențe cuprinse între 300 MHz și 300 GHz.



#### Fig. 1.1 - Spectrul de frecvențe [B1].

Un sistem de comunicații bazat pe microunde prezintă aceeași structură ca orice sistem de comunicație clasic, fiind format din subsistemul de transmisie (ST) și subsistemul de recepție (SR). Conform referinței [B2] ST include un generator de microunde (oscilator), ghiduri de undă și o antenă de transmisie, iar SR conține o antenă de recepție, o linie de transmisie (care poate fi un ghid de undă), un amplificator de microunde și un receptor.

Funcționalitatea unui sistem cu microunde este testată cu ajutorul unor dispozitive specializate, numite *analizoare vectoriale de rețea*. Obiectivul principal al acestor dispozitive constă în analiza unui semnal de înaltă frecvență transmis de la sursă la destinație. Prin semnal de înaltă frecvență se va înțelege în continuare un semnal cu o frecvență mai mare de 300 MHz.

Transmisia semnalelor de înaltă frecvență este analizată în mod similar sistemelor de transmisie – recepție specifice frecvențelor joase. De exemplu, prin analiza unui semnal se

poate stabili dacă acesta suferă modificări provocate de perturbații pe parcursul transmisiei de la sursă la destinație. Această analiză reprezintă practic un proces prin care se evaluează performanța electrică a componentelor și circuitelor utilizate în sistemele complexe, care formează o rețea.

Altfel spus, conceptul analizei de retea presupune interconectarea mai multor componente electrice. Analiza de retea are ca principal obiectiv studiul integrității semnalelor. Integritatea unui semnal are în vedere transmiterea semnalului de la un punct la altul cu eficiență maximă și distorsiune minimă. Eficiența trebuie avută în vedere deoarece atunci când un semnal părăsește o componentă și intră într-o altă componentă a rețelei, o parte din semnalul transmis poate fi reflectat. Prin analiza integrității semnalului se stabilește ponderea în semnalul de ieșire al primei componente (respectiv a celei care se transmite), împreună cu ponderea componentei reflectate. O înțelegere mai ușoară a conceptului de integritate poate fi realizată printr-o analogie între transmiterea semnalelor în cadrul unei retele optice și transmiterea semnalelor în cadrul unei retele de înaltă frecventă, o asemenea analogie fiind prezentată în figura 1.2. Rețeaua optică are în componență o sursă care generează un semnal luminos. Acest semnal traversează la un moment dat o lentilă. O parte din semnal este transmis dincolo de lentilă, iar altă parte este reflectat de către aceasta. Neglijând pierderile în cadrul acestui sistem, conform principiului conservării energiei, suma energiilor conținute în semnalul reflectat și în cel transmis trebuie sa fie egală cu energia aferentă semnalului de la sursă, denumit și semnal incident.



Fig. 1.2 - Analogie între analiza unui semnal luminos și un semnal de înaltă frecvență pentru explicarea principiului de bază al analizei rețelei [W1].

Conform lucrărilor [B4] și [W2], analiza vectorială presupune generarea unui semnal sinusoidal pentru fiecare frecvență din domeniul de frecvențe analizat. Acest semnal sinusoidal este considerat ca semnal stimul pentru rețea, obținându-se la ieșirea rețelei un alt semnal sinusoidal. Cele două semnale sinusoidale vor avea, de regulă, amplitudini și faze diferite. Din aceste considerente, analiza rețelei poartă și denumirea de *analiză vectorială*. Astfel, analiza se face pe baza amplitudinii și fazei unui semnal de ieșire în raport cu

amplitudinea și faza unui semnal de intrare. Întrucât semnalele analizate sunt semnale sinusoidale, caracterizarea acestora se poate face sub formă vectorială utilizând amplitudinea (care va da *modulul vectorului*) și faza (din care se determină *panta vectorului* într-un plan complex). În plus, după cum indică figura 1.2, analiza vectorială de rețea are ca principal obiectiv stabilirea performanțelor rețelei în cadrul transmisiei semnalului între sursă și destinație. Aceste performanțe se analizează pe baza unor rapoarte între amplitudini pentru semnalul transmis și semnalul incident, respectiv semnalul reflectat și semnalul incident. Așa cum se explică în lucrările [B3] și [W1], dacă în cadrul rețelei optice, lentila ar fi fost înlocuită cu o oglindă, atunci semnalul transmis ar fi fost nul, iar semnalul reflectat ar fi trebuit sa coincidă cu semnalul incident. Pentru a stabili aceste aspecte este nevoie de un instrument matematic care să permită comparația între cele două semnale raportate la semnalul incident. Întrucât semnalele pot fi caracterizate doar prin amplitudine și fază sub formă vectorială, se recurge la calculul unui raport al amplitudinilor care să permită comparația semnalelor.

Prin urmare, denumirea de *analiză vectorială de rețea* este justificată prin caracterizarea performanțelor sistemului de transmisie al unui semnal care trece prin mai multe medii reprezentate de diferite componente electrice care formează o rețea. Dacă performanțele rețelei corespund cu cerințele de proiectare ale sistemului de transmisie, atunci se poate spune că integritatea semnalului este asigurată în cadrul rețelei. Aceste performanțe pot fi afectate de eventualele perturbații, cum ar fi unele defecte ale elementelor componente din rețea.

Pentru domeniile asociate frecvențelor înalte, analiza vectorială de rețea prezintă o importanță aparte. În prezent, această analiză se realizează automat, prin introducerea în cadrul rețelei a unui dispozitiv specializat numit *analizor vectorial de rețea* (VNA – Vector Network Analyzer). În cadrul exemplului prezentat în figura 1.2, acesta se regăsește atât în poziția sursei de semnal, cât și în rolul echipamentelor de afișare marcate pe desen prin simbolul unui grafic.

Conform referințelor [B4] și [W2] între argumentele pentru care testarea dispozitivelor din domeniul microundelor se realizează cu analizoarele vectoriale de rețea se regăsesc:

acestea sunt singurele instrumente de măsură capabile să compenseze erorile sistematice oferind, în același timp, o precizie ridicată a măsurărilor;

- doar măsurările vectoriale permit conversia rapidă din domeniul frecvenţă în domeniul timp, ceea ce oferă o flexibilitate foarte mare pentru interpretarea şi procesarea datelor;
- simularea rețelelor se realizează de asemenea sub formă vectorială;
- reprezentarea sub forma diagramei Smith (o reprezentare de referință în domeniul microundelor) necesită de asemenea ca datele să fie furnizate sub formă vectorială.

În concluzie, VNA-urile reprezintă instrumente de măsură și testare capabile să descrie parametrii undelor electromagnetice dintr-un mediu de lucru, prin analiza performanțelor rețelei.

#### 1.1. Tipuri și caracteristici ale dispozitivelor cu microunde

Caracterizarea unui semnal s(t) se poate realiza atât prin intermediul reprezentării în domeniul timp (analizând forma de undă a semnalului), cât și în domeniul frecvență (analizând spectrul de frecvențe ale semnalului).

Ambele tipuri de reprezentări caracterizează semnalul s(t) prin intermediul parametrilor: amplitudine (A), pulsație ( $\omega = 2\pi f$ ) și fază inițială ( $\varphi_0$ ). Considerând semnalul sinusoidal prezentat în relația (1.1), se pot observa în figura 1.3 reprezentările grafice în domeniile timp și frecvență.

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_0) \tag{1.1}$$

unde:

A este amplitudinea semnalului (exprimată de regulă în V);

f – frecvența (exprimată în Hz);

 $\varphi_0$  – faza inițială a semnalului (exprimată de regulă în radiani).

Conform referinței [B5], reprezentarea în domeniul timp se obține considerând ca variabilă independentă *timpul*, rezultând graficul variației amplitudinii în timp. Figura 1.3a conține reprezentarea unui semnal sinusoidal în domeniul timpului în care este evidențiată perioada  $T = \frac{1}{f} [s]$ .

Pentru reprezentarea în domeniul frecvență se pot considera ca variabile independente pulsația ( $\omega_0$ ) sau frecvența ( $f_0$ ). În figura 1.3b se poate observa că în domeniul frecvență se obțin două grafice, și anume: spectrul de amplitudini al semnalului în care amplitudinea variază funcție de frecvență (pulsație) și spectrul de faze al semnalului în care faza variază funcție de frecvență (pulsație) [B5].

Din figura 1.3 se poate remarca faptul că unei reprezentări în domeniul timp îi corespunde o singură reprezentare în domeniul frecvență și invers.



Fig. 1.3 – Reprezentarea unui semnal sinusoidal: a) în domeniul timp; b) în domeniul frecvență [B5].

Comportamentul dispozitivelor este analizat prin intermediul semnalelor de intrare și de ieșire. De cele mai multe ori, acest comportament este cunoscut, iar testarea presupune validarea acestuia. De exemplu, pentru un filtru trece bandă, analiza se realizează prin intermediul răspunsului în frecvență al acestuia. Pentru că principala întrebuințare a unui VNA este de a testa diferite componente, prezintă interes analiza semnalelor în domeniul frecvenței.

#### 1.1.1. Analiza în domeniul frecvenței

Trecerea unui semnal din domeniul timp în domeniul frecvență se realizează prin intermediul transformatei Fourier, trecerea în sens invers realizându-se prin intermediul transformatei Fourier inverse.

Considerând reprezentarea în domeniul timp h(t) a unui semnal, trecerea în domeniul frecvenței se realizează cu relația (1.2), unde  $H(\omega)$  este funcția de frecvență.

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t}dt$$
(1.2)

Conform lucrării [B5], relația (1.2) reprezintă transformata Fourier a unei funcții continue. Ca exemplu, în lucrarea [B5] este analizat un semnal simplu de forma celui prezentat în relația (1.3), respectiv:

$$s(t) = e^{-at}, t > 0$$
 (1.3)

Analiza acestui semnal s(t) în domeniul frecvență presupune aplicarea relației (1.2) pentru calculul transformatei Fourier, după cum este detaliat în relația (1.4) [B5].

$$S(\omega) = \int_0^\infty e^{-at} e^{-j\omega t} dt = \int_0^\infty e^{-(a+j\omega)t} dt$$
(1.4)  
$$= \lim_{t \to \infty} \left( -\frac{1}{a+j\omega} e^{-(a+j\omega)t} \right)$$
$$- \lim_{t \to 0} \left( -\frac{1}{a+j\omega} e^{-(a+j\omega)t} \right) = \frac{1}{a+j\omega}$$

Din relația (1.4) se poate observa că funcția  $S(\omega)$  este o funcție complexă, putând fi pusă în evidență o parte reală și una imaginară. Pentru a putea determina spectrul de amplitudini și spectrul de faze se vor calcula modulul și faza, conform relațiilor (1.5) și (1.6):

$$|S(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{a^2 + \omega^2}} \tag{1.5}$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\omega}{a} \tag{1.6}$$

Aceste relații subliniază faptul că în spectrul de amplitudini și spectrul de faze, unei frecvențe îi corespunde un singur segment în cadrul reprezentării grafice, aspect ilustrat în figura 1.3b.

#### 1.1.2. Clasificarea dispozitivelor cu microunde

Analizoarele vectoriale de rețea sunt utilizate pentru a testa o gamă largă de dispozitive, care în cele mai multe lucrări de specialitate sunt clasificate în *dispozitive pasive* și *dispozitive active*.

Conform referinței [B6], cele două categorii includ:

- dispozitive pasive: mixere, comutatoare de radiofrecvență, cabluri, conectori, adaptoare, atenuatoare și filtre;
- dispozitive active: amplificatoare de zgomot redus, amplificatoare de putere, oscilatoare şi antene.

Circuitele electrice pasive de joasă frecvență sunt realizate din rezistențe, condensatoare și bobine. Circuitele care operează la înaltă frecvență nu se pot realiza cu astfel de componente, acestea incluzând, printre altele, în calitate de componente pasive ghiduri de undă, cabluri coaxiale, microstrip-uri, stripline-uri [B6].

Analiza circuitelor cu microunde are la bază, cu precădere, ghidurile de undă definite ca structuri tubulare cu pereți metalici sau dielectrici în interiorul cărora există un mediu neconductor (izolator) propice propagării undelor electromagnetice.

În lucrarea [B1], linia de transmisie este definită ca cel mai simplu element specific microundelor utilizat pentru a interconecta diferite componente. Liniile de transmisie pot fi ghiduri de undă care includ coturi, colțuri, răsucituri sau cabluri care interconectează linii de diferite dimensiuni, în figura 1.4 fiind prezentate diferite tipuri de ghiduri.



Fig. 1.4 - Secțiune în linia de transmisie utilizată pentru interconectarea componentelor: (a) ghid de undă cu secțiune conică; (b) ghid de undă cu cot E; (c) ghid de undă cu cot H; (d) ghid de undă răsucit; (e) microstrip cu secțiune conică [B1].

Conform lucrării [B7], ghidurile de undă se clasifică astfel:

- *ghiduri uniforme*: dreptunghiulare, circulare, eliptice, ghiduri în H, ghiduri în U și ghiduri coaxiale.
- *ghiduri neuniforme*: piramidale, conice, exponențiale, cu discontinuități sau axial neomogene.

În lucrarea [B6], ghidurile de undă uniforme se clasifică, la rândul lor, în funcție de modul de propagare în linia de transmisie astfel:

- coaxial (circular) figura 1.5a;
- ghid de undă circular figura 1.5b;
- stripline figura 1.5c;
- ghid de undă dreptunghiular –figura 1.5d;
- microstrip figura 1.5e;
- ghid de undă coplanar figura 1.5f.



Fig. 1.5 - Secțiuni transversale ale ghidurilor de undă uniforme [B6].

Prin liniile de transmisie se realizează o propagare transversal electromagnetică (TEM<sup>1</sup>[B8]). Conform referinței [B9], ghidurile de undă au avantajul unei capacități ridicate de transmisie a semnalului cu pierderi minime. Este de menționat faptul că pentru frecvențele joase acestea devin voluminoase și scumpe.

Dispozitivele uzuale care pot fi testate cu ajutorul VNA-urilor sunt prezentate în figura 1.6 [B10], [W3]. Aceste dispozitive sunt clasificate în raport cu creșterea frecvenței de la domeniile de joasă frecvență la domeniile de înaltă frecvență. De asemenea, din aceeași figură rezultă că există o gamă foarte mare de dispozitive care pot fi testate cu ajutorul VNA-urilor.

1	Pasiv	Dispozitiv	Activ
Joasa	Dielectrice R, L, C	Diode	Tranzistori
		Mutiplicatoare	modulatoare
		Samplara	Modulatoare
	Rezonatoare	Multiplexoare	Orallahara
	Ghiduri de undă	Comutatoare	VCO
	Labiun Linii de transmisie	-	10000
-	Linii de întârziere		Amplificatoare
Lec.	Adaptoare	Antene	VCA
	Atenuatoare		Convertoare
21.	Circulatoare		Contentorre
	Izolatoare		Acordoare
	Combinatoare		Paramtana
	Cuploare		receptoare
	Filtre		Emițătoare-
	Diplexoare		Module TR
	Duplexoare		MMIC
π			REIC

Fig. 1.6 – Tipuri de dispozitive testate cu ajutorul VNA-urilor [W3].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> În teoria propagării undelor, propagarea componentei câmpului electric sau magnetic în direcție longitudinală poartă numele de undă TEM sau mod TEM de propagare.

În continuare se va realiza o prezentare succintă a dispozitivelor care pot fi testate cu ajutorul VNA-urilor.

- Atenuatoarele sunt dispozitive pasive utilizate pentru a reduce nivelul de semnal care traversează o linie [B11].
- Conectorii sunt elemente pasive utilizate pentru interconectarea circuitelor realizate cu tehnologii diferite. Aceste elemente de interconexiune trebuie să permită o trecere a semnalului de la un circuit la altul cu pierderi minime de putere.
   În lucrarea [B11] sunt prezentați următorii conectori:
- a) *adaptorul* ce realizează trecerea semnalului de la un ghid de undă la un cablu coaxial.
- b) *conectorul* care constituie o legătură dintre un cablu coaxial și microstrip<sup>2</sup>.
- Divizoarele și cuploarele de putere sunt dispozitive pasive utilizate de obicei pentru distribuirea semnalului. Un divizor ideal utilizează o intrare și două ieșiri pentru care puterea incidentă este divizată în mod egal în cele două ieșiri.
- **Izolatoarele** sunt dispozitive pasive care permit transmisia semnalului de radiofrecvență de la intrare la ieșire fără atenuare, în timp ce blochează transmisia de la ieșire la intrare.
- **Circulatoarele** sunt dispozitiv pasive utilizate pentru a transmite un semnal de la un port *i* la portul *i* + *1* cu pierderi cât mai mici. Acest tip de dispozitiv este de obicei utilizat pentru dispozitivele multiport care conține minimum 3 porturi.

Un loc deosebit de important în domeniul microundelor îl ocupă **filtrele**. Acestea vor fi abordate în detaliu în următoarele capitole ale prezentei teze de doctorat. Din punct de vedere funcțional, filtrele sunt utilizate pentru eliminarea zgomotelor introduse pe parcursul transmisiei unui semnal. Un filtru are un comportament selectiv, care *favorizează* anumite frecvențe ale semnalelor de intrare în detrimentul altora [B12]. În lucrarea [B13], filtrele de microunde sunt prezentate ca având domeniul de lucru definit în intervalul 0.1 - 20 GHz. Acestea sunt realizate sub formă de secțiuni de linii care, în funcție de domeniul de frecvență și de coeficientul de calitate, pot fi realizate sub formă coaxială, ghiduri, linii plate sau cavități rezonante [B13]. Un filtru este ideal dacă în banda de trecere introduce o atenuare nulă, iar în banda de oprire (blocare) introduce o atenuare infinită. Separarea între cele două benzi se face prin intermediul frecvențelor de tăiere.

În ceea ce privește dispozitivele active, cele mai utilizate sunt: amplificatoarele, oscilatoarele și antenele.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Microstrip este un element de transmisie specific domeniului microundelor.

• Amplificatoarele sunt dispozitive active care au ca obiectiv obținerea la ieșire a unui semnal electric de tensiune sau putere mai mari decât cele aferente semnalului aplicat la intrare.

• Oscilatoarele reprezintă dispozitive active care nu primesc semnal la intrare, dar care generează un semnal de ieșire, de regulă cu variație sinusoidală. VNA-urile includ oscilatoare care generează semnal sinusoidal de ultra-înaltă frecvență utilizat în testarea diverselor dispozitive.

• Convertoarele / Convertizoarele de frecvență sunt dispozitive neliniare clasificate în detectoare, mixere și multiplicatoare de frecvență. Aceste componente sunt caracterizate de generarea la ieșire a unui semnal cu o frecvență diferită de cea a semnalului aplicat la intrare [B11].

*Detectorul* este definit ca un dispozitiv a cărui misiune constă în extragerea semnalului util din semnalul modulat aplicat la intrare.

*Mixerul* este un dispozitiv cu două semnale de intrare având frecvențe diferite pentru care se obține la ieșire un semnal de frecvență intermediară.

*Multiplicatoarele de frecvență* sunt rețele neliniare de două porturi care produc un semnal de ieșire a cărui frecvență este multiplu al frecvenței semnalului de intrare. Raportul dintre amplitudinea ieșirii și amplitudinea intrării se exprimă în decibeli și reprezintă câștigul de conversie al multiplicatorului [B11].

### 1.2. Caracteristici de frecvență specifice dispozitivelor cu microunde

Caracteristicile de frecvență, respectiv *amplitudine – frecvență*<sup>3</sup> și *fază - frecvență* a fiecărui dispozitiv de tipul celor prezentate în subcapitolul 1.1.2 depind, printre altele, de:

a. elementele constitutive ale dispozitivului, respectiv de structura acestuia;

b. prezența sau lipsa anumitor defecte, respectiv de integritatea sa funcțională.

Dispozitivele din domeniul microundelor, testate cu ajutorul Analizoarelor Vectoriale de Rețea (VNA) au de cele mai multe ori o structură internă necunoscută. Pentru a putea testa funcționalitatea acestora, dispozitivele sunt însoțite de caracteristicile de frecvență ale unui dispozitiv similar, considerat etalon. Pe baza etalonului se realizează comparații ale caracteristicilor acestuia cu caracteristicile obținute pentru dispozitivul testat.

 $<sup>^3</sup>$  În cele ce urmează, se vor face referiri cu precădere la caracteristica amplitudine – frecvență care va fi denumită și caracteristică de frecvență.

În cazul proiectării, dispozitivul proiectat trebuie să prezinte un anumit comportament pentru domeniul de frecvență ales. Dacă una dintre componentele dispozitivului prezintă un defect de proiectare, atunci comportamentul întregului sistem va fi afectat, caracteristica sa de frecvență fiind diferită de caracteristica *dispozitivului etalon*.

Studiul acestor aspecte vizează integritatea semnalelor în cadrul rețelei. Așa cum s-a menționat în cele prezentate anterior, integritatea semnalelor se rezumă în acest context la studiul ponderii în semnalul de intrare a componentei care se reflectă, respectiv a celei care se transmite. Aceste ponderi s-au impus sub denumirea de *parametri S*.

În figura 1.7 se poate observa cum generatorul de microunde (Sursa RF) transmite către dispozitivul testat un semnal numit incident. Din cauza caracteristicilor conectorului (intrarea în dispozitivul testat), o parte din semnalul incident se reflectă (*semnal reflectat*), iar o altă parte se transmite către următoarea componentă a rețelei.



Fig. 1.7 – Tipurile de semnal în cadrul unei rețele de microunde.

Figura 1.8 conține reprezentarea unui circuit cu două porturi de acces (diport). Aplicând la portul 1 un semnal de tensiune  $U_1^{in}$  se poate observa cum o parte a semnalului de intrare (cu o anumită pondere) este reflectată la portul 1,  $U_1^{ref}$ , iar o altă parte a semnalului de intrare este transferată către portul 2 ca semnal transmis  $U_1$ . Scriind ecuațiile de echilibru, rezultă relațiile (1.7) și (1.8), unde  $Z_{01}$  reprezintă impedanța caracteristică a portului 1, iar  $I_1$ curentul absorbit de acest port.

$$U_1 = U_1^{in} + U_1^{ref} (1.1)$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_{01}} (U_1^{in} - U_1^{ref})$$
(1.2)


Fig. 1.8 – Ilustrarea definirii conceptuale a parametrilor S.

În figura 1.8 se poate observa că aplicând un semnal la portul 1, în cadrul circuitului apar trei semnale, și anume: semnalul incident  $U_1^{in}$ , semnalul reflectat  $U_1^{ref}$  și semnalul transmis la portul 2, notat cu  $U_1$ . În mod analog, aplicând un semnal de la portul 2 la portul 1, apar următoarele semnale: semnalul incident  $U_2^{in}$ , semnalul reflectat  $U_2^{ref}$  și semnalul transmis la portul 1, notat cu  $U_2$ . Generalizând, conform lucrării [B14], relațiile (1.7) și (1.8) pot fi rescrise pentru portul *i*, după cum urmează:

$$U_i = U_i^{in} + U_i^{ref} \tag{1.9}$$

$$I_i = \frac{1}{Z_{0i}} (U_i^{in} - U_i^{ref})$$
(1.10)

În relația (1.10) semnul minus provine din modul de propagare a undei, deoarece unda directă duce sarcina într-un sens, iar unda indirectă o duce în celălalt sens (sens invers al curentului). Prelucrând relațiile (1.9) și (1.10), se pot exprima tensiunile  $U_i^{in}$  și  $U_i^{ref}$  funcție de  $U_i$  și  $I_i$  conform relației (1.11), după cum urmează:

$$\begin{cases} U_i^{in} + U_i^{ref} = U_i \\ U_i^{in} - U_i^{ref} = I_i Z_{0i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2U_i^{in} = U_i + Z_{0i} I_i \\ 2U_i^{ref} = U_i - Z_{0i} I_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_i^{in} = \frac{1}{2} (U_i + Z_{0i} I_i) \\ U_i^{ref} = \frac{1}{2} (U_i - Z_{0i} I_i) \end{cases}$$
(1.11)

În cadrul unei linii de transmisie, prezintă interes puterea transmisă de la sursă la sarcină. Deoarece tensiunea nu este constantă în fiecare punct de-a lungul liniei de transmisie, se analizează puterea incidentă și puterea reflectată în termeni de tensiuni și curenți. Astfel, conform lucrării [B14], cele două puteri se definesc conform relațiilor (1.12) și (1.13), după cum urmează:

$$P_{i}^{in} = \frac{1}{2} Re \left[ U_{i}^{in} (I_{i}^{in})^{*} \right] = \frac{1}{2} Re \left[ U_{i}^{in} \left( \frac{U_{i}^{in}}{Z_{0i}} \right)^{*} \right] = \frac{1}{2Z_{0i}} \left| U_{i}^{in} \right|^{2}$$
(1.12)

$$P_{i}^{ref} = \frac{1}{2} Re \left[ U_{i}^{ref} (I_{i}^{ref})^{*} \right] = \frac{1}{2} Re \left[ U_{i}^{ref} \left( \frac{U_{i}^{ref}}{Z_{0i}} \right)^{*} \right] = \frac{1}{2Z_{0i}} \left| U_{i}^{ref} \right|^{2}$$
(1.13)

Pentru a putea defini în mod clar rapoartele asociate undei incidente și celei reflectate, au fost introduși parametrii  $a_i$  și  $b_i$  definiți în relațiile (1.14) și (1.15) [B14]. În acest fel, parametrii  $a_i$  asociați portului *i* corespund undei incidente și se definesc pe baza puterii incidente conform relației (1.14). În mod analog, se definesc parametrii  $b_i$  conform relației (1.15).

$$a_{i} = \sqrt{P_{i}^{in}} = \frac{U_{i}^{in}}{\sqrt{2Z_{0i}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{i} + Z_{0i}I_{i}}{\sqrt{2Z_{0i}}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( \frac{U_{i}}{\sqrt{Z_{0i}}} + \sqrt{Z_{0i}}I_{i} \right)$$
(1.14)

$$b_{i} = \sqrt{P_{i}^{ref}} = \frac{U_{i}^{ref}}{\sqrt{2Z_{0i}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{i} - Z_{0i}I_{i}}{\sqrt{2Z_{0i}}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( \frac{U_{i}}{\sqrt{Z_{0i}}} - \sqrt{Z_{0i}}I_{i} \right)$$
(1.15)

Ținând cont de cele evidențiate mai sus, figura 1.8 poate fi explicitată prin intermediul figurii 1.9 unde se pot observa cele două porturi, împreună cu parametrii  $a_i$  și  $b_i$ .



Fig. 1.9 – Rețea cu două porturi care ilustrează undele incidente și pe cele reflectate prin intermediul parametrilor  $a_i$  și  $b_i$  [B14].

Pentru a obține o exprimare adimensională a ponderii semnalelor transmis și reflectat în semnalul incident, au fost introduși *parametrii* S. După cum s-a arătat, aceștia sunt definiți ca rapoarte de puteri între unda reflectată și unda incidentă ( $S_{11}$ ), precum și între unda transmisă și cea incidentă ( $S_{21}$ ). Pentru a caracteriza o rețea cu două porturi sunt necesari patru *parametri* S. De exemplu, pentru portul 1 se determină parametrii  $S_{11}$  și  $S_{21}$ . Primul indice reprezintă portul care corespunde sursei, iar cel de-al doilea este asociat portului corespunzător sarcinii. În lucrările [B6], [B15] și [B16] se specifică faptul că *parametrii* S sunt numere complexe care conțin două componente: *amplitudine* și *fază*. De asemenea, se menționează că pentru asigurarea reciprocității rețelei, se generează un semnal la portul 2, pentru a verifica ponderea semnalului reflectat la portul 2 și a semnalului transmis la portul 1 în semnalul incident. În mod similar, se definesc parametrii  $S_{22}$  și  $S_{12}$ .

Figura 1.10 prezintă schema electrică a unui analizor vectorial cu două porturi.



Fig. 1.10 - Schema electrică de conectare a unui DUT la un VNA cu 2 porturi reprezentat prin sursa U<sub>s</sub>.[W1]

Relația de legătură pentru schema din figura 1.10 între puterea incidentă și puterea reflectată se poate exprima sub forma relațiilor vectoriale (1.16) sau (1.17) astfel:

$$[b_n] = [S] \cdot [a_n] \tag{1.16}$$

unde:

 $[b_n]$  este puterea reflectată la portul n;

 $[a_n]$  – puterea incidentă la portul n.

sau în formă particularizată:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$
(1.17)

În felul acesta se determină matricea de transfer S, utilizată pentru descrierea comportamentului în frecvență a dispozitivului testat. Semnificațiile parametrilor din matricea S sunt:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$
(1.18)  

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$
  

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$
  

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

#### 1.3. Probleme care privesc funcționalitatea dispozitivelor cu microunde

Evoluția tehnologică din domeniul comunicațiilor mobile a condus la o creștere a cererii pentru echipamentele de testare care să asigure integritatea semnalelor în cadrul unei rețele. VNA-urile sunt utilizate cu precădere în domeniul comunicațiilor mobile. Sistemele wireless se bazează pe transmisia semnalelor prin atmosferă, ceea ce implică o serie de probleme între care semnificative sunt atenuarea și prezența vaporilor de apă [B1]. După cum se arată în figura 1.11, atenuarea crește odată cu creșterea frecvenței. Ca o consecință, sistemele de comunicație capabile să transmită la distanțe mari, precum sistemele de navigație, utilizează frecvențe joase pentru ca atenuarea să fie redusă. Cu toate acestea, atunci când este nevoie să se transmită un conținut informațional ridicat se utilizează frecvențe mari.





Dincolo de atenuare, o altă problemă apare din cauza obstacolelor pe care semnalele transmise le întâlnesc când se propagă prin atmosferă.

Din aceste considerente, proiectarea dispozitivelor cu microunde trebuie să se realizeze cu o precizie foarte mare. Astfel, se explică necesitatea instrumentelor de testare și măsurare a semnalelor de microunde care să ofere cât mai multe facilități utilizatorilor. Direcțiile de dezvoltare ale acestor instrumente (inclusiv VNA) sunt diverse, în literatura de specialitate fiind prezentate rezultatele a numeroase cercetări privind posibilitatea extinderii măsurărilor la frecvențe de peste 1 THz. În acest context, de menționat sunt îmbunătățirea procedurilor de calibrare capabile să asigure o cât mai bună acuratețe a datelor, automatizarea procesului de acordare a unui filtru, creșterea vitezei de lucru a unui VNA prin metode software sau prin schimbarea actualei configurații hardware, etc.

După cum se arată în lucrarea [B1] există trei clase importante de aplicații ale sistemelor de microunde, respectiv: *comunicații, navigație, sisteme de încălzire*.

• *Clasa comunicațiilor* include domeniul telefoniei mobile, rețelele wireless locale (WLAN), Wi-Fi și WiMAX, sistemele de comunicații prin satelit (cum sunt aplicațiile de TV), domeniul aeronauticii și comunicațiile militare.

• *Clasa navigației* este reprezentată de sistemele GPS, de cea a senzorilor de radare utilizate în diferite domenii cum ar fi: depistarea vitezei unui obiect aflat în mișcare, controlul traficului aerian, sisteme de detecție a mișcării, sisteme de prevenție a coliziunilor între mașini, sisteme de predicție meteo, sisteme de detecție a creșterii temperaturii globale, sisteme de diagnoză medicală, sisteme automate de cartografiere etc.

• *Clasa sistemelor de încălzire* este reprezentată de cuptorul cu microunde care se bazează pe energia absorbită de moleculele de apă. Tot în această clasă se regăsesc și aplicațiile din medicină pentru tratarea tumorilor cu ajutorul unor stimulatoare electromagnetice.

În lucrarea [B11] sunt prezentate aplicații ale microundelor sintetizate sub forma unei diagrame ilustrate în figura 1.12. Din cele expuse până în prezent a reieșit importanța utilizării Analizoarelor Vectoriale de Rețea (VNA) pentru testarea caracteristicilor dispozitivelor cu microunde.



Fig. 1.12- Aplicații ale microundelor [B11].

#### 1.3.1. Principiul de funcționare și schema bloc a unui analizor vectorial de rețea

În literatura de specialitate, VNA-urile sunt definite sub diverse forme. Astfel, în lucrarea [B17], acestea sunt definite ca instrumente de măsurare capabile să stimuleze dispozitivele testate folosind o undă sinusoidală care baleiază întregul domeniu de frecvențe și măsoară răspunsul acestora în frecvență. În aceeași lucrare se specifică și faptul că analizoarele de rețea se clasifică în *analizoare vectoriale de rețea* (VNA) capabile să măsoare amplitudinea și faza unui semnal, respectiv *analizoare scalare de rețea* care măsoară doar amplitudinea semnalului cu o acuratețe scăzută deoarece în procesul de calibrare nu sunt implicate și fazele semnalelor [B17].

O altă definiție a VNA-urilor se găsește în lucrarea [B18], unde acestea sunt considerate instrumente pentru măsurarea caracteristicilor dispozitivelor de test prin intermediul undelor electromagnetice transmise și reflectate.

În lucrarea [B2], un VNA este prezentat ca fiind alcătuit din *subsistemul emițător* care include un oscilator de microunde, un ghid de undă, o antenă de transmisie și *subsistemul de recepție* alcătuit din antena de recepție, linia de transmisie sau ghidul de undă, un amplificator de microunde și un receptor.

Conform referinței [B19], VNA măsoară amplitudinea și faza aferente dispozitivelor cu microunde. În aceste dispozitive sunt incluse componentele active și pasive ale rețelelor de microunde, la care se adaugă circuitele integrate specifice microundelor, inclusiv circuitele integrate de radiofrecvență.

După cum reiese din figura 1.13, în structura unui VNA se regăsește o sursă de semnal sau un generator de semnal (oscilator). Rolul oscilatorului în domeniul microundelor este de a transforma energia electrică absorbită de la o rețea de alimentare în energie aferentă semnalului de frecvență înaltă. Semnalul este trimis către unul dintre porturi, analizându-se unda transmisă și cea reflectată. Ulterior, semnalul este trimis către celălalt port, analizându-se din nou unda transmisă și unda reflectată. Măsurările sunt realizate de către receptoare. Fiecare VNA are câte un receptor pentru fiecare port cu ajutorul căruia măsoară amplitudinea semnalului și un receptor referință care măsoară faza semnalului.



Fig. 1.13 – Ilustrarea principiului de funcționare a unui VNA.

Utilitatea VNA-urilor este reprezentată de testarea dispozitivelor cu microunde, respectiv a unor caracteristici comportamentale ale acestora în raport cu caracteristica de funcționalitate etalon pentru un anumit domeniu de frecvențe. Pentru îndeplinirea acestui obiectiv, trebuie realizată conectarea dispozitivului testat cu analizorul vectorial prin intermediul unor elemente de conexiune. Aceste elemente auxiliare (cabluri și conectori) pot introduce în sistem o serie de perturbații, motiv pentru care acestea sunt compensate prin procesul de calibrare, care se realizează cu ajutorul unui kit aferent.

Atunci când se dorește realizarea unei măsurări cu ajutorul unui VNA, se realizează practic o calibrare a dispozitivului testat (DUT – Device Under Test) cu ajutorul instrumentului de măsurare (VNA). O descriere detaliată a evoluției procedurilor de calibrare în contextul analizoarelor de rețea este prezentată în lucrarea [B20].

În referința [B15], este specificat faptul că în cadrul procedurii de calibrare, un set de dispozitive cu caracteristici cunoscute (etaloane) este măsurat pentru a acorda parametrii modelului aferent VNA-ului. Apoi, în procedura de corecție, modelul obținut în etapa de calibrare este utilizat pentru a corecta imperfecțiunile de configurare a VNA-ului [B15].

Cele mai utilizate standarde de calibrare sunt: SOLT, TRL și calibrarea automată. Între acestea, metoda SOLT (Short – Open – Load - Thru), descrisă detaliat în lucrarea [B21] este aplicată pas cu pas în exemplul din paragraful următor.

### 1.3.2. Testarea dispozitivelor cu microunde

Din investigațiile efectuate de autoare, a rezultat că testarea unui dispozitiv utilizat în domeniul microundelor presupune parcurgerea următoarelor etape:

- calibrarea VNA-ului în raport cu dispozitivul testat (acordarea pentru compensarea efectelor perturbațiilor);
- realizarea măsurării în domeniul de lucru pentru dispozitivul testat;
- salvarea rezultatelor măsurării într-un format specific \*.s2p, care conține frecvența împreună cu amplitudinile și fazele asociate undei transmise și undei reflectate la fiecare port. În Anexa 1 la teza de doctorat se prezintă un exemplu de fișier \*s2p;
- trasarea graficului pentru măsurarea curentă și compararea cu rezultatele măsurării etalon.

În continuare se prezintă un exemplu de măsurare realizată cu un analizor vectorial de rețea VNA de tip Vector Star<sup>®</sup> produs de compania Anritsu (https://www.anritsu.com/en-GB). Elementul testat este constituit dintr-un filtru trece bandă, pentru care, după cum s-a menționat, atenuarea teoretică este nulă în banda de trecere și infinită în banda de oprire.

Înainte de realizarea măsurărilor propriu-zise se realizează calibrarea cu ajutorul kitului de calibrare special conceput, parcurgând următorii pași:

se definește domeniul frecvențelor folosind tab-ul numit "Freq". În continuare se setează frecvențele de *Start* și de *Stop*, precum și numărul de puncte (maximum 1001). De exemplu, pentru un filtru a cărui gamă de funcționare se regăsește între frecvențele 2300 – 2500 MHz, se poate seta Start = 2000 MHz, Stop = 2800 MHz și numărul de puncte (# of Points) = 161 (conform figurii 1.14a) sau pentru un cablu coaxial cu o lungime de aproximativ un metru, se pot face setările conform exemplului prezentat în figura 1.14b.



*Fig. 1.14 – Setarea domeniului de frecvențe în care se realizează măsurările.* 

- în continuare se realizează o calibrare SOLT ("short-open-load-thru"). Pentru aceasta, se execută click pe tab-ul "Calibration" > "Calibrate" > "Manual Cal" > "2-Port Cal" (figura 1.15a).
- > ulterior VNA-ul se calibrează pentru portul 1, portul 2 și DUT, după cum urmează:
  - Port 1 Reflective Devices > Se realizează montajul pentru fiecare tip în parte și apoi se execută click pe tab-ul corespunzător (Open, Load, Short). Se așteaptă până când apare un buton radio bifat (figura 1.15b).
  - Port 2 Reflective Devices (Open, Load, Short) > se urmează aceeaşi paşi ca pentru Port 1.
  - Thru Se realizează montajul, se execută click pe butonul "Thru 1-2" și se așteaptă două sweep-uri<sup>4</sup>, respectiv două baleieri ale întregii game de frecvențe.



Fig. 1.15 – Ilustrarea calibrării open – short – load – thru.

Odată încheiat procesul de calibrare, în colțul din dreapta jos va apărea în culoare verde statusul "CORR". În următoarea etapă se realizează montajul pentru filtru, iar în aplicație se execută click pe butonul "Scale" > "Auto Scale All Channels". Pentru testare s-a utilizat în calitate de DUT un filtru ZFBP-2400-S+ ale cărui specificații de proiectare sunt evidențiate în Anexa 2 la teza de doctorat.

În figura 1.16 se poate observa răspunsul filtrului pentru întreaga gamă de frecvențe, după cum urmează:

- secțiunea stânga sus prezintă amplitudinile semnalului transmis de la portul 1 la portul 2;
- secțiunea dreapta sus evidențiază amplitudinile semnalului transmis de la portul 2 la portul 1;

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Sweep – baleiere a întregului domeniu de frecvențe.

- secțiunea stânga jos ilustrează amplitudinile semnalului reflectat la portul 1;
- secțiunea dreapta jos prezintă amplitudinile semnalului reflectat la portul 2.

Se poate remarca faptul că în intervalul 2.3 – 2.5 GHz (gama de funcționare a acestui dispozitiv) toată unda se transmite, în sensul că nu există reflexii. De asemenea, graficul arată că dispozitivul de test este un filtru trece bandă. Pentru a pune în evidență imaginea de ansamblu a filtrului, dar și intervalul de funcționare, au fost adăugați doi indicatori (markeri) notați în figura 1.16 cu 1, respectiv 2.



Fig. 1.16 – Răspunsul filtrului trece bandă ZFBP-2400-S+ în reprezentare logmag.

## 1.4. Concluzii ale capitolului 1

În acest prim capitol al prezentei teze de doctorat s-a realizat o introducere în domeniul microundelor prin prezentarea analizei semnalelor în domeniul frecvență, analiză utilizată pentru obținerea caracteristicilor de funcționare ale diferitelor dispozitive. Analiza semnalelor se poate realiza prin intermediul parametrilor *S*, determinați cu ajutorul analizoarelor vectoriale de rețea (VNA) cu scopul de a caracteriza funcționarea unui dispozitiv cu microunde.

Pentru început s-a pus în evidență faptul că semnalele utilizate în microunde operează în domeniul frecvențelor 300 MHz – 300 GHz, ceea ce înseamnă frecvențe foarte mari, de unde derivă și comportamentul uneori instabil al dispozitivelor testate.

În prima parte a capitolului s-a realizat o prezentare a analizei semnalelor în domeniul frecvență, evidențiind importanța reprezentării amplitudinii și fazei semnalelor. După prezentarea dispozitivelor cu microunde prin intermediului analizei în domeniul timp, s-au prezentat ghidurile de undă utilizate în realizarea dispozitivelor de radiofrecvență și microunde. Ulterior au fost clasificate dispozitivele testate cu ajutorul analizoarelor vectoriale de rețea și au fost definite o serie de dispozitive, cum ar fi:

- dispozitive pasive: atenuatoare, conectori, divizoare și cuploare de putere, izolatoare, circulatoare și filtre;
- dispozitive active: amplificatoare, oscilatoare și convertoare de frecvență.

În cea de-a doua parte a primului capitol au fost prezentate caracteristicile de frecvență specifice dispozitivelor cu microunde în corelație cu parametrii *S*.

Cea de-a treia parte a acestui capitol a fost consacrată prezentării sintetice a funcționării analizoarelor vectoriale de rețea. De asemenea, a fost prezentat în detaliu procesul de calibrare și măsurare folosind un asemenea analizor. În plus, a fost exemplificat procesul de calibrare și măsurare folosind un VNA de tipul Vector Star<sup>®</sup> produs de compania Anritsu și un filtru trece bandă. A fost prezentată fiecare etapă, începând de la prezentarea kit-ului de calibrare până la obținerea rezultatelor măsurărilor și reprezentarea grafică a acestora.

# Capitolul 2. Stadiul actual al realizărilor și tendințelor referitoare la resursele software aferente analizoarelor vectoriale de rețea

Capitolul 2 are ca element central demonstrarea necesității îmbunătățirii vitezei de lucru a analizoarelor vectoriale de rețea (VNA). În acest sens, s-a realizat un studiu de caz care a evidențiat valori ridicate ale timpului aferent unei măsurări.

O secțiune a capitolului este consacrată prezentării celor mai cunoscute metode de aproximare din domeniul ingineriei și completată cu un al doilea studiu de caz pentru stabilirea oportunității utilizării acestora în domeniul microundelor.

Ultima parte a capitolului prezintă stadiul actual al realizărilor și tendințelor identificate în literatura de specialitate privind algoritmii care au ca obiectiv îmbunătățirea vitezei de lucru a VNA-urilor. În final s-au demonstrat neajunsurile acestora în practică, motiv pentru care în capitolul următor al tezei de doctorat se vor propune noi algoritmi capabili să îmbunătățească viteza de lucru a VNA-urilor.

#### 2.1. Factori de influență asupra măsurărilor de timp real specifice VNA-urilor

Algoritmii utilizați în prezent în cadrul analizoarelor vectoriale de rețea sunt implementați hardware pe FPGA<sup>5</sup> utilizând unul din limbajele HDL<sup>6</sup> (Verilog sau VHDL). Utilizatorul este cel care decide domeniul de frecvență analizat, precum și granularitatea<sup>7</sup> (finețea) măsurărilor. De exemplu, dacă domeniul în frecvență este 15 GHz – 18 GHz, iar granularitatea este 0.1 GHz, atunci frecvențele pentru care se vor efectua măsurări sunt în mulțimea {15, 15.1, 15.2, ... 17.8, 17.9, 18} GHz. Prin urmare se vor utiliza 31 de frecvențe distribuite uniform pe întregul domeniu de frecvențe.

• O primă problemă tratată cu maximă atenție în cazul măsurărilor este reprezentată de erori. În teoria erorilor se vorbește despre omogenitatea perfectă [B22], potrivit căreia realizarea unor măsurări multiple cu ajutorul aceluiași dispozitiv, asupra căruia nu se intervine în niciun fel și în aceleași condiții, trebuie să conducă la rezultate identice. În mod evident, omogenitatea perfectă este practic irealizabilă din cauza erorilor nesistematice de măsurare și a posibilelor modificări în timp a caracteristicilor VNA. De exemplu, în cazul unui VNA, erorile pot fi introduse de dispozitivul în sine în lipsa calibrării sau pot fi

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> FPGA (Field Programmable Gate Array) – arie logică de porți programabile.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> HDL (Hardware Description Language) – limbaj de descriere hardware a comportării unui circuit.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Engleză – *span*.

introduse de lipsa conductivității materialului din care este confecționat dispozitivul măsurat sau pot fi erori specifice operatorului uman.

• O a doua problemă specifică evaluării parametrilor dispozitivelor pentru microunde este reprezentată de instabilitatea acestora datorată frecvențelor foarte înalte. Soluționarea acestei probleme se realizează prin măsurări multiple pentru aceeași frecvență păstrând aceleași condiții ale mediului. Din experiența autoarei a rezultat că, de regulă, sunt suficiente câte opt măsurări pentru fiecare frecvență, iar valoarea finală va fi reprezentată de media aritmetică a rezultatelor celor opt măsurări.

• Un alt aspect important care vizează măsurările în timp real asociate dispozitivelor specifice microundelor corespunde tipului de comunicație între dispozitiv și sistemul de prelucrare a datelor. Conform referințelor [B23] și [W4], comunicația dintre analizorul vectorial de rețea (VNA) și sistemul de calcul al utilizatorului destinat prelucrării datelor se realizează prin intermediul unuia dintre driverele asociate instrumentelor virtuale de măsură, cum ar fi: IVI<sup>8</sup>, LXI<sup>9</sup> sau VXIplug&play<sup>10</sup>. Atunci când un astfel de driver nu este disponibil, comunicația cu instrumentul de măsurare se poate realiza în mod direct, prin intermediul comenzilor SCPI<sup>11</sup> utilizând unul din următoarele protocoalele de comunicație: GPIB, Serial, TCP/IP, UDP sau VISA [W4]. În ceea ce privește conexiunea fizică, aceasta este realizată în mod curent prin porturile USB sau Ethernet.

În opinia autoarei, factorii importanți care influențează viteaza de măsurare a unui VNA sunt:

- modalitatea de conectare prin porturile USB sau Ethernet;
- numărul de dispozitive conectate;
- viteza de transfer a conexiunii utilizate;
- performanțele sistemului de calcul pe care se realizează procesarea;
- numărul de baleieri ale domeniilor de frecvențe setate de utilizator;
- numărul de puncte (frecvențe) pentru care se realizează măsurările.

Timpii necesari unei măsurări complete variază în funcție de factorii specificați mai sus. O problemă importantă apare atunci când măsurările trebuie efectuate în mod repetat

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> IVI (Interchangeable Virtual Instruments) – componentă software și set de clase pentru comunicația cu instrumentul de măsurare.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) – definește un standard pentru comunicarea cu instrumentele prin Ethernet.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> VXIplug&play (Virtualization Experience Infrastructure) – driver de instrument utilizat pentru comunicația cu instrumentul de măsurare livrat împreună cu instrumentul sau disponibil pe site-ul producătorului.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) – standard utilizat pentru uniformizarea instrumentelor de măsurare interfațabile prin intermediul comenzilor transmise pe magistrala VXI, RS-232, etc.

cum ar fi cazul procesului de acordare al unui filtru. În subcapitolul următor se vor prezenta rezultatele obținute prin măsurări în timp real realizate cu ajutorul unei aplicații proiectate și implementate de către autoarea prezentei teze de doctorat. Obiectivul principal al acestei aplicații este de a pune în evidență timpii foarte mari necesari unei măsurări realizate cu ajutorul unui VNA prin considerarea tuturor punctelor specificate.

## 2.2. Teste de viteză ale algoritmilor actuali utilizați de VNA-uri pentru măsurarea parametrilor S

Pentru a pune în evidență vitezele scăzute ale măsurărilor și în consecință intervalele de timp mari necesare unei măsurări, în cadrul tezei a fost implementat în mediul QT<sup>12</sup> o aplicație de comunicație prin Ethernet, folosind protocolul TCP / IP, aplicație capabilă să comunice cu un dispozitiv VNA. Sistemul de operare folosit a fost Raspbian<sup>13</sup>, iar sistemul de calcul a fost reprezentat de un dispozitiv Raspberry Pi<sup>14</sup>. În figura 2.1 este prezentată integrarea echipamentelor pentru efectuarea de măsurări în modul simulare. În această figură se poate observa cum comunicația este asigurată prin intermediul unui router, iar calculatorul portabil (laptop) îndeplinește rolul unui analizor vectorial de rețea (VNA).



Fig. 2.1 – Integrarea echipamentelor pentru efectuarea testării vitezei cu care se realizează măsurările în modul simulare.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>QT<sup>®</sup> (Quasar Technologies) - mediu de dezvoltare care utilizează limbajul de programare C++, utilizat pentru posibilitate de rulare atât pe un sistem de operare Windows, cât și Linux.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Raspbian – sistem de operare al platformei de dezvoltare Raspberry PI.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Raspberry PI – un sistem cu microcontroller care integrează toate facilitățile oferite de un sistem de calcul standard, având avantajele unor dimensiuni reduse și a unui cost de achiziție mult mai mic.

Aplicația care a fost dezvoltată pe platforma Raspberry Pi accesează simulatorul pe baza unei adrese IP. Aplicația monitorizează viteza cu care se realizează transferul datelor între cele două dispozitive. Din figura 2.2 reiese că dispozitivul Raspberry PI primește date de la simulator în 3 secunde.





Conform referințelor [B24] și [W5] în care sunt indicate specificațiile aferente VNAului simulat, durata de măsurare este de 350  $\mu$ s / frecvență (punct), ceea ce înseamnă că pentru un număr de 401 puncte sunt necesare 0.14 secunde. Trebuie avut în vedere, după cum s-a arătat, faptul că pentru fiecare frecvență sunt recomandate câte opt măsurări, după care se calculează media aritmetică rezultând ulterior valoarea afișată, ceea ce conduce la un total de 1.12 secunde. Deoarece în modul simulare a rezultat că transferul răspunsului s-a realizat în 3 secunde, se obține un timp total de **3.36** secunde. În plus, măsurările se realizează prin baleieri multiple pentru o acuratețe a rezultatelor cât mai mare. De obicei, se utilizează minimum 10 baleieri<sup>15</sup>, care consumă aproximativ **0.56 minute**. Trebuie remarcat faptul că acest timp a fost obținut prin calculul unor valori ideale ale parametrilor *S* în modul simulare.

O altă observație deosebit de importantă este legată de utilizarea analizoarelor vectoriale de rețea în procesele de acordare ale filtrelor. Aceste procese necesită repetarea măsurărilor, până când caracteristicile dispozitivului măsurat corespund cu cele ale unui filtru etalon. Astfel, procesul de acordare manuală a unui filtru poate dura câteva ore.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Engleză: *sweep*.

În continuarea aplicației test au fost evaluați în timp real și apoi comparați timpii de măsurare obținuți pentru același mod de interogare<sup>16</sup> folosind două tipuri de conexiune, și anume VXI și TCP/IP. Pentru măsurare s-a utilizat VNA-ul MS46522A produs de compania Anritsu, a cărui imagine este ilustrată în figura 2.3.



Fig. 2.3 – Imaginea VNA Anritsu MS46522A utilizat pentru aplicația test.

În figura 2.4 sunt ilustrate componentele integrate în aplicația dezvoltată pentru a pune în evidență problematica specifică vitezei de lucru a VNA-urilor. Dispozitivul VNA utilizat, prezentat în figura 2.3, este unul cu performanțe ridicate, acesta putând realiza măsurări de până la frecvențe de 40 GHz fără a fi însă accesibil, din cauza prețului ridicat circa (10.000 EURO) masei largi de utilizatori. Fiind scumpe, aceste dispozitive trebuie sa fie intens utilizate și prin urmare se impune reducerea timpilor aferenți unei măsurări pentru a le crește productivitatea.



Fig. 2.4 - Montajul și un ecran de lucru al aplicației pentru monitorizarea vitezei de lucru a VNA-ului MS46522A.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Accepțiunea termenului de *interogare*, în acest context, este reprezentată de o tranzacție care presupune: trimiterea unei solicitări, procesarea acesteia și obținerea răspunsului.

În figura 2.5 este evidențiat timpul necesar unei singure interogări folosind protocolul VXI, menționat anterior. Din această figură se poate observa că o singură interogare se realizează în 5000 de milisecunde (respectiv 5 secunde). Continuând raționamentul anterior, rezultă că dacă pentru un singur punct (interogare) sunt necesare 5 secunde, atunci pentru 401 puncte sunt necesare **33 de minute**. În mod evident, acest timp este greu de acceptat pentru măsurări uzuale.

\$ 7. 8 B X	Connectionstatewidget \$ OnnectionStateWidget::on_of ConnectionStateWidget::on_of ConnectionStateWidget::on_of ConnectionStateWidget::on_of ConnectionStateWidget::on_of	connectButton_clicked()
	ANRVNAManager	
File Connections		
ш		
kit	.55.207 🛛 172.28.55.51 🕄 192.168.0.2 🕄 172.28.55.95 🔀 4 🕨	
cosmin2		
test	IP: 172.28.55.95 DN: inst0	
test_device	Alias: Itest device Change Alias	
		pi@raspberrypi: ~/ANRVNADo
		<u>File</u> <u>E</u> dit <u>T</u> abs <u>H</u> elp
	Connect 📝 Disconnect	pi@raspberrypi ~/ANRVNADoubleConnection \$ AN
		System_Debug/ANRVNAManager Try to start yxi connection
	ANRITSU,MS46522A,0000000,V2.1.03,V2.2.17;	vxi connection success
		Elapsed time 5000 milisec ANRITSU,MS46522A,0000000,V2.1.03,V2.2.17;
		nState->deviceNam
		t be performed
		toInt()); //might
		d be performed
	SCPI: Last Commands	
	Get S2P Data 7 Display Image Close App	

Fig. 2.5 - Interfața aplicației pentru o singură interogare folosind conexiunea de tip VXI.

În figura 2.6 este prezentată interfața aplicației pentru o singură interogare folosind de această dată conexiunea de tip TCP/IP.

.55.207 X         172.28.55.51 X         192.168.0.2 X         172.28.55.95 X         4           IP:         172.28.55.95         DN:         inst           Alias:         [test_device         Change Alias	
Connect Z Disconnect	pi@raspberrypi:~/ANRVNADoubleCo File Edit Iabs Help pi@raspberrypi ~/ANRVNADoubleConnection \$ ANRVNAMe
ANRITSU,MS46522A,0000000,V2.1.03,V2.2.17;	SystemDebug/ANRVNAManager Try to Start tcp connection Connection error code is 0 - success Elapsed time 1992 milisec ANRITSU,MS46522A,0000000,V2.1.03,V2.2.17; ☐ d text, if any:
SCPI: Last Commands	
	::endl;

Fig. 2.6 - Interfața aplicației pentru o singură interogare folosind conexiunea de tip TCP/IP.

Din această figură reiese că timpul necesar unei singure interogări este de 1992 milisecunde, adică aproximativ 2 secunde. Aplicând din nou raționamentul anterior, se constată că pentru 401 puncte, timpul necesar măsurării este de **13.3 minute**. Și de această dată se poate constata că timpul necesar unei măsurări folosind un VNA cu performanțe ridicate este mult prea mare.

Realizând o comparație între cele trei tipuri de conexiuni implementate se constată că pentru 401 interogări ale unui dispozitiv VNA performant, timpul de achiziție este:

- modul simulare: 0.56 minute;
- modul timp real protocol VXI: 33 minute;
- modul timp real protocol TCP/IP: 13.3 minute.

Analizând aceste rezultate, se consideră ca oportună dezvoltarea de algoritmi capabili să reducă timpul de măsurare și în consecință să îmbunătățească viteza de lucru a unui VNA.

#### 2.3. Reprezentarea datelor achiziționate și procesate cu ajutorul VNA-urilor

Etapa care succede măsurării propriu-zise constă în generarea unui grafic care să ilustreze dependența *parametrii S - frecvență*, pe baza datelor achiziționate reprezentate practic de eșantioane. În cadrul teoriei sistemelor, semnalele sunt analizate prin intermediul modelelor matematice. Modelul matematic este de cele mai multe ori o funcție care fie are o formă foarte complicată și necesită o evaluare într-un număr mult prea mare de eșantioane, fie este o funcție a cărei formă analitică nu este cunoscută.

Unul dintre obiectivele prezentei teze de doctorat a constat în **determinarea** caracteristicilor de calitate (cum ar fi cele de frecvență) prin alegerea unui număr minim *n* de eșantioane:  $x_1, x_2, ..., x_n$ . În acest context se pune problema consistenței care impune ca eșantioanele să aibă o distribuție care să permită refacerea răspunsului original al dispozitivului testat considerând acest număr minim de eșantioane. Sintetizând, se consideră o funcție f(x) reală pentru care se cunosc perechile de valori discrete  $(x_1, y_1 = f(x_1))$ ,  $(x_2, y_2 = f(x_2)),..., (x_n, y_n = f(x_n))$ , numită *funcție originală* și o funcție g(x), de asemenea reală, care aproximează funcția originală. Obiectul principal, în contextul expus, constă în determinarea funcției g(x), în condițiile  $g(x_i) = y_i$  prin utilizarea unor funcții de aproximare, între cele mai utilizate fiind funcțiile polinomiale. În inginerie se utilizează frecvent funcțiile de aproximare, obținute prin *interpolare* sau prin *metode de mini-max*.

Interpolarea este o metodă de aproximare care genereză o funcție de inerpolare g(x)al cărui grafic trece obligatoriu prin punctele de coordonate  $(x_1,y_1)$ ,  $(x_2,y_2)$ , ..., $(x_n,y_n)$ , respectiv

$$g(x_i) = y_i \tag{2.1}$$

unde  $(x_i, y_i)$  sunt eșantioanele cu semnificația  $(x_i - eșantion_frecvență, y_i - parametru_S_măsurat), <math>i = \overline{1, n}$ .

Deoarece în cadrul prezentei teze de doctorat se propune achiziționarea unui număr limitat de eșantioane pe baza cărora se va determina răspunsul sistemului, este clar că răspunsul aproximat trebuie să treacă prin punctele în care s-au efectuat măsurări. În continuare se prezintă unele dintre cele mai cunoscute metode de interpolare, respectiv: *interpolarea liniară, interpolarea polinomială și interpolarea Spline de ordin I, II sau III*.

În cazul interpolării liniare, relația (2.1) conduce la un sistem de n ecuații liniare cu n necunoscute de forma:

$$g(x_k) = a + bx_k, \text{ unde } k \in [x_i, x_{i+1}]$$
(2.2)

unde funcția g se poate determina pe baza a două eșantioane consecutive, după cum se poate observa în figura 2.7, conform metodei indicate în relația (2.3).

$$\begin{cases} y_{i} = a + bx_{i} \\ y_{i+1} = a + bx_{i+1} \end{cases} \Rightarrow y_{i+1} - y_{i} = b(x_{i+1} - x_{i}) \Rightarrow b = \frac{y_{i+1} - y_{i}}{x_{i+1} - x_{i}} \end{cases}$$
(23)  
$$a = y_{i} - bx_{i} = y_{i} - \frac{y_{i+1} - y_{i}}{x_{i+1} - x_{i}} x_{i} = \frac{y_{i}x_{i+1} - y_{i}x_{i} - y_{i+1}x_{i}}{x_{i+1} - x_{i}}$$
$$a = \frac{y_{i}x_{i+1} - y_{i+1}x_{i}}{x_{i+1} - x_{i}}$$

Fig. 2.7 – Interpolarea liniară între două eșantioane consecutive.

Metodele de interpolare polinomială pot fi clasificate în funcție de gradul funcției de aproximare, după cum urmează: interpolare parabolică, interpolare Lagrange, interpolare Hermite, interpolare Birkihoff, interpolare spline de ordin I, II și III. Interpolarea parabolică, de exemplu, corespunde unei funcții de gradul doi:

$$g(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \tag{2.4}$$

unde  $a_0$ ,  $a_1$  și  $a_2$  sunt coeficienți care urmează a se determina din datele experimentale.

În practică, pentru rezolvarea problemei de aproximare a unui semnal se impune utilizarea unui număr semnificativ de eșantioane. Rezultatele testelor efectuate de autoare au relevat faptul că la o scădere sub 5% a numărului de măsurări se pierde consistența informațională, motiv pentru care toate abordările din teza de doctorat vor avea în vedere această limitare. Micșorarea numărului de puncte impune utilizarea unor funcții de aproximare.

În cele ce urmează se vor prezenta metoda de interpolare *spline cubică* și metoda de *aproximare bazată pe suma celor mai mici pătrate*, iar în finalul acestui subcapitol se va realiza un studiu de caz folosind un filtru de microunde pentru a pune în evidență performanțele a doi algoritmi bazați pe aceste metode. Cele două metode se vor implementa în mediul Matlab<sup>®</sup>, iar pe baza rezultatelor obținute se va realiza un studiu comparativ între aceste metode.

#### 2.3.1. Metoda de interpolare spline

Funcțiile de interpolare spline sunt funcții de interpolare pe porțiuni [B25]. Funcția spline de ordin III este cea mai utilizată din clasa interpolărilor spline și este cunoscută sub denumirea de *spline cubică sau Hermite*. Considerând funcția  $f:[a,b] \rightarrow \mathbb{R}$  și n eșantioane  $(x_i, y_i), i = \overline{1, n}$ , se pune problema determinării funcțiilor spline cubice  $p_{3,k}$ , care sunt definite conform relației (2.5).

$$p_{3,k}(x) = a_k x^3 + b_k x^2 + c_k x + d_k$$
(2.5)

unde:

a<sub>k</sub>, b<sub>k</sub>, c<sub>k</sub> și d<sub>k</sub> sunt coeficienți care urmează a se determina și  $k = \overline{1, n-1}$ .

Pentru determinarea funcțiilor  $p_{3,k}$  se folosesc patru condiții, notate C<sub>1...</sub>C<sub>4</sub> și evidențiate în continuare [B25].

C<sub>1</sub>. Graficul fiecărei funcții polinomiale, respectiv  $p_{3,k}$ , conține punctele de coordonate  $(x_k, y_k)$  și  $(x_{k+1}, y_{k+1})$ , respectiv:

$$p_{3,i}(x_i) = y_i \tag{2.6}$$

$$p_{3,i}(x_{i+1}) = y_{i+1} \tag{2.7}$$

C<sub>2</sub>. Prima derivată a funcțiilor  $p_{3,k}$  este continuă în punctele interioare, astfel încât:

$$p_{3,i}'(x_{i+1}) = p_{3,i+1}'(x_{i+1})$$
, unde i =  $\overline{1, n-2}$ . (2.8)

C<sub>3</sub>. A doua derivată a funcțiilor  $p_{3,k}$  este continuă în punctele interioare, astfel încât:

$$p_{3,i}''(x_{i+1}) = p_{3,i+1}''(x_{i+1})$$
, unde i =  $\overline{1, n-2}$ . (2.9)

C<sub>4</sub>. Cea de-a doua derivată a funcțiilor  $p_{3,k}$  este zero pentru punctele de la capetele intervalului, respectiv  $x_1$  și  $x_n$ :

$$p_{3,i}''(x_1) = 0$$

$$p_{3,i}''(x_n) = 0$$
(2.10)

#### **Exemplu**

Considerând trei eșantioane A(2, 1), B(3,5) și C(4, 3), se vor calcula funcțiile spine  $p_{3,1}$  și  $p_{3,2}$ , după cum urmează:

$$p_{3,1}(x) = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1$$
  
$$p_{3,2}(x) = a_2 x^3 + b_2 x^2 + c_2 x + d_2$$

Pentru a determina coeficienții  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  și  $d_2$ , se folosesc cele patru condiții prezentate anterior, care vor genera sistemul:

$$\begin{cases} 8a_1 + 4b_1 + 2c_1 + d_1 = 1 \\ 27a_1 + 9b_1 + 3c_1 + d_1 = 5 \\ 27a_2 + 9b_2 + 3c_2 + d_2 = 5 \\ 64a_2 + 16b_2 + 4c_2 + d_2 = 3 \\ 27a_1 + 6b_1 + c_1 - 27a_2 - 6 \cdot b_2 - c_2 = 0 \\ 18a_1 + 2b_1 - 18a_2 - 2b_2 = 0 \\ 12a_1 + 2b_1 = 0 \\ 24a_2 + 2b_2 = 0 \end{cases}$$
(2.11)

În Anexa 3 se prezintă soluționarea sistemului (2.11), soluționare care a condus la determinarea coeficienților  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  și  $d_2$ , după cum urmează:

$$\begin{cases}
a_1 = -1.5 \\
b_1 = 9 \\
c_1 = -12.5 \\
d_1 = 2 \\
a_2 = 1.5 \\
b_2 = -18 \\
c_2 = 68.5 \\
d_2 = -79
\end{cases}$$
(2.12)

În figura 2.8 s-a reprezentat grafic pe intervalele [2,3] și [3,4] funcțiile obținute prin interpolarea spline. Se poate remarca faptul că graficul trece prin punctele din plan aferente celor trei eșantioane.



Fig. 2.8 - Interpolarea spline pentru trei eșantioane.

#### 2.3.2. Aproximarea prin metoda celor mai mici pătrate

Diferența fundamentală dintre o funcție de aproximare și o funcție de interpolare este aceea că, în cazul aproximării, graficul nu trebuie să treacă obligatoriu prin punctele considerate eșantioane.

Metoda celor mai mici pătrate este o metodă de tip min – max care se bazează pe minimizarea sumei pătratelor distanțelor de la punctele reale la curba de aproximare, aspect ilustrat în figura 2.9. Conform referinței [B25], criteriul de aproximare se bazează pe minimizarea sumei:

$$S = \sum_{i=1}^{m} [y_i - g(x_i)]^2 = minim$$
(2.13)

unde:

 $(x_i, y_i)$  sunt coordonatele punctelor inițiale (experimentale);

m – numărul de eșantioane (puncte experimentale);







Pentru funcția g(x) pot fi propuse mai multe forme, una dintre acestea fiind cea polinomială. Pentru cazul general, polinomul g(x) poate avea forma dată de relația (2.14)

$$g(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{n-1} x^{n-1}$$
(2.14)

unde:

n este gradul funcției polinomiale;

 $a_0, a_1, ..., a_{n-1}$  – coeficienții care urmează a se determina.

Minimizarea funcției (2.14) presupune anularea derivatelor parțiale ale funcției S din relația (2.13) în raport cu coeficienții  $a_0$ ,  $a_1$ , ...  $a_{n-1}$  conform relației după cum urmează:

$$\frac{\partial s}{\partial a_0} = 0; \ \frac{\partial s}{\partial a_1} = 0; \ \dots \ \frac{\partial s}{\partial a_{n-1}} = 0$$
(2.15)

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = \frac{\partial \sum_{i=1}^m [y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1})]^2}{\partial a_0} = 0 \Rightarrow$$

$$2[\sum_{i=1}^{m} y_{i} - (ma_{0} + a_{1} \sum_{i=1}^{m} x_{i} + \cdots a_{n-1} \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1})] = 0 \Rightarrow$$

$$ma_{0} + a_{1} \sum_{i=1}^{m} x_{i} + \cdots a_{n-1} \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1} = \sum_{i=1}^{m} y_{i}$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_{1}} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{m} [y_{i} - (a_{0} + a_{1}x_{i} + a_{2}x_{i}^{2} + \cdots + a_{n-1}x_{i}^{n-1})]^{2}}{\partial a_{1}} = 0 \Rightarrow$$

$$2[\sum_{i=1}^{m} y_{i} - (ma_{0} + a_{1} \sum_{i=1}^{m} x_{i} + \cdots + a_{n-1} \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1})] \sum_{i=1}^{m} x_{i} = 0 \Rightarrow$$

$$a_{0} \sum_{i=1}^{m} x_{i} + a_{1} \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{2} + \cdots + a_{n-1} \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n} - 1 = \sum_{i=1}^{m} x_{i}y_{i}$$

$$(2.17)$$

Din relațiile (2.16) și (2.17), rezultă pentru cele n ecuații cu n necunoscute următoarea formă matriceală:

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^{m} x_{i} & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1} \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i} & \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{2} & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1} & \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n} & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{2n-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{0} \\ a_{1} \\ \dots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} y_{i} \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i} y_{i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i}^{n-1} y_{i} \end{bmatrix}$$
(2.18)

Exprimarea din relația (2.18) poate fi pusă sub forma:

$$M \times A = Y \tag{2.19}$$

unde

$$M = \begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^{m} x_i & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_i^{n-1} \\ \sum_{i=1}^{m} x_i & \sum_{i=1}^{m} x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_i^n \\ \sum_{i=1}^{m} x_i^{n-1} & \sum_{i=1}^{m} x_i^n & \dots & \sum_{i=1}^{m} x_i^{2n-2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{n-1} \end{bmatrix}$$
(2.20)
$$(2.21)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} y_i \\ \sum_{i=1}^{m} x_i y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{m} x_i^{n-1} y_i \end{bmatrix}$$
(2.22)

Din modul în care a fost introdusă matricea pătratică M, aceasta este nesingulară și soluția sistemului (2.19) este obținută din relația (2.23):

$$A = M^{-1} \times Y \tag{2.23}$$

unde  $M^{-1}$  este inversa matricei M.

#### Exemplu

Acest exemplu ilustrează metoda celor mai mici pătrate pentru datele prezentate în tabelul 2.1 și ilustrate în figura 2.10.

i	x <sub>i</sub>	y <sub>i</sub>
1	1	1.1
2	1.5	1.3
3	1.8	1.6
4	2.1	1.8
5	2.4	1.6

Tabelul 2.1 – Eșantioane evaluate pentru metoda celor mai mici pătrate.

În continuare se va considera funcția g(x) ca fiind de gradul 3, respectiv:

$$g(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$
(2.24)

unde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  și  $a_3$  sunt coeficienții care urmează a se determina.

Din aplicarea relațiilor (2.15), (2.16) și (2.17) rezultă sistemul de ecuații (2.26) care în

$$5a_0 + 8.8a_1 + 16.66a_2 + 33.29a_3 = 7.4$$

$$8.8a_0 + 16.66a_1 + 33.29a_2 + 69.18a_3 = 13.55$$

$$16.66a_0 + 33.29a_1 + 69.18a_2 + 147.95a_3 = 26.363$$

$$33.29a_0 + 69.18a_1 + 147.95a_2 + 323.27a_3 = 53.606$$
(2.26)

formă matriceală se scrie:

\_ \_

$$\begin{bmatrix} 5 & 8.8 & 16.66 & 33.29 \\ 8.8 & 16.66 & 33.29 & 69.18 \\ 16.66 & 33.29 & 69.18 & 147.95 \\ 33.29 & 69.18 & 147.95 & 323.27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.4 \\ 13.55 \\ 26.363 \\ 53.606 \end{bmatrix}$$
(2.25)

Aplicând metoda indicată în relația (2.23) se obțin soluțiile:

$$a_0 = 5.8812$$
 (2.27)  
 $a_1 = -10.3979$   
 $a_2 = 7.0660$   
 $a_3 = -1.4485$ 

respectiv funcția:

$$g(x) = 5.8812 - 10.3979x + 7.0660x^2 - 1.4485x^3$$
(2.28)

reprezentată grafic în figura (2.10).

Pentru rezolvarea sistemului (2.26) s-a utilizat funcția *polyfit* a mediului Matlab<sup>®</sup>, soluțiile obținute fiind indicate în (2.27). Astfel, funcția de aproximare obținută are forma prezentată în relația (2.28), graficul acesteia, ilustrat în figura 2.10 fiind obținut prin execuția funcției Matlab<sup>®</sup> *plot*. Reprezentarea din figura (2.10) pune în evidență faptul că spre deosebire de interpolare, graficul funcției de aproximare nu conține eșantioanele.



Fig. 2.10 - Rezultatul grafic al aproximării pentru exemplul din Tabelul 2.1.

#### 2.3.3. Studiu de caz

În cele ce urmează, se prezintă rezultatele aplicării celor două metode analizate anterior, respectiv *metoda de interpolare spline cubică* și *metoda celor mai mici pătrate*, folosind un număr redus de eșantioane ale unor măsurări dintr-un set de 400 de frecvențe (puncte), pentru un filtru din domeniul microundelor, cu domeniul de lucru în frecvență 14 – 15.5 GHz.

Înaintea aplicării celor două metode s-a efectuat pentru cele 400 de puncte măsurarea clasică. Din aceleasi 400 de puncte s-au selectat 10%, respectiv 40 de puncte distribuite echidistant (reprezentate în figura 2.11 prin marcaje circulare albastre). Pentru cele 40 de puncte selectate, s-a aplicat prima dată algoritmul interpolării cubice spline. Rezultatele obținute au fost comparate cu cele ale măsurării clasice, iar suma modulelor diferențelor dintre valorile măsurate și cele interpolate pentru parametrul S<sub>11</sub> a fost de 0.03 dB, reprezentând o eroare globală absolută care a fost utilizată pentru comparația din punct de vedere al acuratetei datelor obtinute cu datele rezultate din aproximarea prin metoda celor mai mici pătrate. În figura 2.11 este reprezentat cu marcaj roșu graficul asociat dependenței parametri  $S_{11}$  – frecvență, corespunzătoare măsurării clasice, iar cu marcaj verde graficul asociat aceleiași dependențe rezultate pentru interpolarea spline cubică. Marcajele circulare albastre reprezintă eșantioanele care au fost alese uniform (respectiv la distanțe egale). Se observă că rezultatele interpolării sunt satisfăcătoare, însă sunt omise două spike-uri<sup>17</sup> (marcate în figura 2.11 prin lentilele X și Y). Această problemă poate fi rezolvată prin creșterea numărului de eșantioane. Pe de altă parte, această creștere pentru zonele de frecvență mai mică de 14.2 GHz și mai mare de 15 GHz este inutilă, acele zone fiind bine interpolate. O altă soluție constă în necesitatea adăugării de eșantioane în zonele interpolate cu o acuratețe mai scăzută.

Pentru metoda celor mai mici pătrate s-au folosit aceleași eșantioane (puncte) ca și în cazul interpolării spline. Funcția g(x), corespunzătoare relației (2.14) a fost reprezentată de un polinom de gradul 7. Ulterior, gradul acestui polinom a fost crescut până la gradul 20. Eroarea cea mai mică a fost obținută pentru gradul 12, respectiv **0.3 dB**, însă această valoare a erorii este una foarte mare, după cum se poate observa cu ușurință în figura 2.12. În această figură s-a folosit culoarea roșie pentru reprezentarea rezultatelor originale (clasice, folosind un VNA), cu marcaje circulare albastre eșantioanele, iar cu verde aproximarea rezultatelor prin metoda celor mai mici pătrate. Așa cum deja a fost menționat, funcția rezultată prin aproximare, spre deosebire de cea obținută prin interpolare, nu trece întotdeauna prin eșantioane, aspect ilustrat în figura 2.12.

Rezultatele acestui studiu de caz comparativ, confirmă rezultatele mult mai bune obținute prin interpolare cubică spline, în raport cu cele obținute prin metoda celor mai mici pătrate. Problemele majore ale interpolării sunt reprezentate pe de o parte de modalitatea de

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Spike – formă parabolică într-o reprezentare grafică a măsurărilor din microunde, unde pot fi identificate de obicei multiple vârfuri de maxim sau minim.

distribuire a eșantioanelor, iar pe de altă parte de alegerea numărului acestora în vederea reconstrucției caracteristicii cu o acuratețe specificată.



Fig. 2.11 – Rezultatul interpolării prin metoda spline cubică pentru studiul de caz.



Fig. 2.12 – Rezultatul aproximării prin metoda celor mai mici pătrate pentru studiul de caz.

Aceste metode de interpolare au fost prezentate în literatura de specialitate [B26] ca fiind indicate pentru reducerea duratelor aferente operațiilor de măsurare. O altă abordare privind metodele de interpolare are în vederea distribuirea eșantioanelor în domeniul de lucru

[B27]. Astfel, se pune problema găsirii unei distribuții optime a acestor eșantioane, astfel încât imaginea funcției obținute cu un număr redus de eșantioane să se apropie cât mai mult posibil de imaginea funcției originale. În acest sens, din literatura de specialitate au prezentat interes, în opinia autoarei, două metode bazate pe interpolare, considerate ca fiind de referință pentru domeniul microundelor, și anume: algoritmul (metoda) *rational – fitting*, respectiv algoritmul (metoda) *vector – fitting*.

#### 2.4. Algoritmul Rational fitting

În lucrările [B28] și [B29] este prezentat algoritmul de eșantionare *Rational fitting* al cărui obiectiv constă în reducerea numărului de eșantioane și implicit a timpului de lucru al unui VNA pentru realizarea unor măsurări în domeniul microundelor [B30]. Acest algoritm presupune determinarea unei funcții raționale care aproximează caracteristica parametrii S – frecvență, folosind un număr cât mai mic de puncte în care se realizează măsurări [B31] și [B32]. Ulterior, valorile măsurate sunt interpolate pe baza unui model de tipul celui din relația (2.29). Conform referințelor [B33], [B34] și [B35] în cadrul metodei *Rational fitting*, fiecărui parametru *S* care a fost definit în capitolul 1, i se asociază o funcție rațională de forma (2.29) ai cărei coeficienți se determină prin interpolare.

$$R(f) = \frac{p^{u}(f)}{q^{v}(f)} = \frac{a_{0} + a_{1}f + \dots + a_{u}f^{u}}{b_{0} + b_{1}f + \dots + b_{v}f^{v}}$$
(2.29)

unde:

*R* este funcția de interpolare rațională;

p și q – polinoame de grade u, respectiv v;

 $a_0, a_1, \ldots, a_u$  – coeficienți ai polinomului p(f);

 $b_0, b_1, \ldots, b_v$  – coeficienți ai polinomului q(f);

f-frecvența.

Interpolarea presupune în cazul funcției definite în relația (2.29) determinarea valorilor acesteia între două frecvențe. Acest aspect implică o determinare adecvată a coeficienților polinoamelor p și q din relația (2.29).

Interpolarea rațională presupune un efort de calcul foarte mare, iar rezultatul nu este întotdeauna cel dorit, erorile de aproximare putând fi considerabile.

În lucrarea [B28], funcția de interpolare rațională este calculată pe baza recurenței din relația (2.30).

$$R_{k}(f) = \frac{N_{k}(f)}{D_{k}(f)}$$
(2.30)

unde:

 $k = \overline{1, M}$ , M fiind numărul redus de frecvențe;

f-frecvenţa;

 $N_k(f)$  și  $D_k(f)$  – polinoame.

Se impun pentru polinoamele  $N_k(f)$  și  $D_k(f)$  formele recurențiale:

$$N_{k}(f) = \varphi(f_{k}, f_{k-1}, \dots, f_{1})N_{k-1} + (f - f_{k-1})N_{k-2};$$
  

$$D_{k}(f) = \varphi(f_{k}, f_{k-1}, \dots, f_{1})D_{k-1} + (f - f_{k-1})D_{k-2};$$
(2.31)

pentru  $k \ge 3$ ;

Pentru a determina funcția  $\varphi$  din relația (2.31) se introduce variabila *i* prin intermediul căreia se verifică îndeplinirea condiției de oprire pentru algoritmi.

Se consideră că i  $\in \{k - 1, k - 2, ..., 1\}$  pentru  $k \ge 2$ , ceea ce conduce la:

$$\varphi(f_k, f_i, \dots, f_1) = \begin{cases} \frac{f_k - f_i}{\varphi(f_k, f_{i-1}, \dots, f_1) - \varphi(f_i, f_{i-1}, \dots, f_1)}, \text{ pentru } i \ge 2 \\ \frac{f_k - f_1}{A_{11}(f_k) - A_{11}(f_1)}, \text{ pentru } i = 1 \end{cases}$$
(2.32)

În relația (2.32),  $\varphi(f_i, f_{i-1}, ..., f_1)$  este cunoscut din etapa k - l, iar  $A_{11}$  reprezintă amplitudinea calculată pe baza parametrilor  $S_{11}$ , corespunzători celor M frecvențe, folosind relația:

$$A_{11}(S_{11}) = \sqrt{Re(S_{11})^2 + Im(S_{11})^2 [adimensional]}$$
Pentru  $k = 1$ 

$$R_1(f) = \frac{N_1(f)}{D_1(f)};$$

$$N_1(f) = A_{11}(f_1);$$

$$D_1(f) = 1;$$
Pentru  $k = 2$ 

$$R_2(f) = \frac{N_2(f)}{D_2(f)};$$

$$N_2(f) = \varphi(f_2, f_1)N_1 + (f - f_1);$$

$$D_2(f) = \varphi(f_2, f_1);$$
(2.33)

#### Exemplu

În continuare se va prezenta un exemplu pentru trei eșantioane uniform distribuite în domeniul frecvență. Cele trei eșantioane corespunzătoare frecvențelor  $f_1$ ,  $f_2$  și  $f_3$  sunt:

 $(f_1, A_{11}|_{f_1}), (f_2, A_{11}|_{f_2})$  și  $(f_3, A_{11}|_{f_3})$ . Aplicând relația (2.30) se va determina forma funcției de interpolare  $R_3(f)$ :

$$R_3(f) = \frac{N_3}{D_2}$$

unde  $N_3$  și  $D_3$  se calculează conform relației (2.33), respectiv:

$$N_3 = \varphi(f_3, f_2, f_1)N_2 + (f - f_2)N_1$$
$$D_3 = \varphi(f_3, f_2, f_1)D_2 + (f - f_2)D_1$$

Utilizând relația (2.32) se determină  $\varphi(f_3, f_2, f_1)$ ,  $\varphi(f_3, f_1)$  și  $\varphi(f_2, f_1)$ , după cum urmează:

$$\varphi(f_3, f_2, f_1) = \frac{f_3 - f_2}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$
$$\varphi(f_3, f_1) = \frac{f_3 - f_1}{A_{11}(f_3) - A_{11}(f_1)}$$
$$\varphi(f_2, f_1) = \frac{f_2 - f_1}{A_{11}(f_2) - A_{11}(f_1)}$$

Odată determinați acești parametri, funcția  $R_2(f)$  se va obține apelând la relațiile (2.31) și (2.32). În figura 2.13 se pot observa cele trei eșantioane corespunzătoare frecvențelor  $f_1$ ,  $f_2$  și  $f_3$ . Pentru cele trei frecvențe au fost calculate funcțiile  $R_1$  și  $R_2$ , iar diferența maximă între valorile celor două interpolări a condus la apariția unui nou eșantion  $f_3$  pentru care s-a realizat o nouă măsurare. Ulterior, s-au calculat  $R_2$  și  $R_3$  rezultând eșantionul  $f_4$ .



Fig. 2.13 – Reprezentarea celor cinci eșantioane și a interpolărilor  $R_3$  și  $R_4$  [B29].

În figura 2.13 se poate observa cum diferența dintre noua interpolare  $R_4$  și interpolarea din pasul anterior  $R_3$  conduce la identificarea unor distanțe maxime pe intervalele determinate de fiecare două frecvențe consecutive, marcate pe grafic prin lentilele 1, 2 și 3. Se alege distanța maximă marcată ca lentila 3, se identifică frecvența corespunzătoare pe grafic și se realizează o măsurare pentru determinarea parametrului S corespunzător.

Sintetic, acest algoritm presupune adăugarea unui eșantion nou la fiecare iterație. Noul eșantion va fi adăugat în punctul de frecvență în care se identifică diferența maximă între două interpolări raționale, după cum se poate observa și în figura 2.13 prin lentilele 1, 2 și 3.

Pentru a putea testa performanțele acestui algoritm, au fost implementate relațiile de recurență (2.32) în mediul Matlab<sup>®</sup> conform specificațiilor din referințele [B33], [B34] și [B35]. Rezultatele obținute au indicat două limitări majore, care vor fi prezentate în cele ce urmează.

 <u>Limitarea 1.</u> Pentru fiecare iterație la care se adaugă un nou eșantion se realizează un nou sweep, adică o nouă baleiere completă a frecvențelor. Din acestă cauză, pentru fiecare iterație se consumă un interval de timp relativ mare, motiv pentru care ar fi mai utilă adăugarea mai multor eșantioane la o singură baleiere.

Limitarea 2. O altă problemă este reprezentată de memoria pe stivă ocupată de situațiile când recurența atinge valori mari pentru numărul k, valori dependente și de configurația sistemului pe care se execută codul Matlab<sup>®</sup>. În plus, la fiecare adăugare de eșantion, arborele în care se descompune funcția  $R_k$  necesită un efort de calcul considerabil, ceea ce conduce de cele mai multe ori la un timp de calcul mai mare decât cel de lucru al unui VNA, experiment detaliat în capitolul 3.5.

Pentru a preveni astfel de situații, în subcapitolul 3.5. se va propune un procedeu de îmbunătățire a acestui algoritm, prin care se va *elimina recurența*. De asemenea, tot în subcapitolul 3.5. vor fi testate performanțele algoritmului *Rational fitting* îmbunătățit.

#### 2.5. Algoritmul Vector fitting

Algoritmul *Vector fitting* se bazează pe un număr limitat de eșantioane, iar răspunsul sistemului este aproximat cu ajutorul unei funcții raționale de forma [B36]:

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_N s^{N-1}}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_N s^N}$$
(2.35)

În lucrările [B36] și [B37] acest algoritm este recomandat pentru domeniul de frecvențe 0 - 100 kHz, ceea ce nu îl face utilizabil pentru domeniul microundelor, respectiv pentru domeniul 300 MHz – 300 GHz.

Un alt dezavantaj al acestui algoritm constă în necesitatea definirii gradului *N*, pe care utilizatorul aplicației nu îl cunoaște. În plus, conform documentației algoritmului prezentat în lucrarea [B38], dacă acest ordin este mare, algoritmul returnează o eroare prin care utilizatorul este înștiințat că aproximarea nu se poate realiza cu succes.

În concluzie, acest algoritm poate fi utilizat pentru aproximări cu forme de reprezentare simple, însă pentru măsurări cu un domeniu de frecvențe mare, aproximarea răspunsului se dovedește a fi ineficientă.

#### 2.6. Concluzii ale capitolului 2

În cadrul acestui capitol s-au pus în evidență factorii care influențează timpii mari de măsurare ai algoritmilor preimplementați pe VNA-uri. Timpii necesari unei măsurări variază în funcție de granularitatea și domeniul de frecvență analizat. Valorile intervalelor de timp depind și de protocolul prin care se achiziționează datele (TCP sau VXI), dar și de alți factori precum: viteza de transfer, numărul dispozitivelor conectate, etc.

Dispozitivele necesar a fi testate în domeniul microundelor sunt diverse, fiecare astfel de dispozitiv având anumite particularități. Din această cauză, nu poate exista o metodă universal valabilă care să poată fi aplicată tuturor dispozitivelor care urmează a fi testate (DUT – Device Under Test).

Tot în cadrul acestui capitol, s-au prezentat modalitățile de aproximare utilizate cu precădere în domeniul ingineriei respectiv: metoda celor mai mici pătrate și metoda de interpolare spline. Ulterior, au fost analizate posibilitățile de utilizare ale acestor metode pentru testarea dispozitivelor cu microunde utilizând eșantioane uniform distribuite în domeniul de lucru.

În ultima parte a capitolului au fost prezentați unii algoritmi dezvoltați în cadrul unor lucrări de specialitate, având ca principal obiectiv reducerea numărului de eșantioane și obținerea unui răspuns apropiat de cel al algoritmului clasic în scopul îmbunătățirii vitezei de achiziție a datelor de la VNA. Dintre algoritmii analizați din literatura de specialitate, metoda adecvată utilizării parametrilor *S* pentru dispozitivele cu microunde este *Rational fitting*, care va fi îmbunătățită în cadrul capitolului 3 al tezei de doctorat.

## Capitolul 3. Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi pentru selecția optimă a frecvențelor aplicate analizoarelor vectoriale de rețea

Algoritmii de îmbunătățire a vitezei de lucru a analizoarelor vectoriale de rețea (VNA), respectiv de scurtare a timpului de procesare, dezvoltați de către autoare și prezentați în subcapitolele următoare, își propun următoarele obiective:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări și implicit scurtarea timpului de obținere a parametrilor S pentru numărul redus de frecvențe;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior).

Caracterul optimal al algoritmilor provine din modalitatea de selecție a frecvențelor, optimalitatea fiind asigurată de identificarea tuturor spike-urilor.

Pe parcursul activității de cercetare referitoare la îmbunătățirea vitezei de lucru a analizoarelor vectoriale de rețea au fost dezvoltați algoritmii evidențiați în tabelul 3.1.

Denumire algoritm	Abreviere
Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe distanța euclidiană	ASF_DE
Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil	ASF_PEV
Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem	ASF_PE
Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive	ASF_DMAP
Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe interpolarea rațională îmbunătățită	ASF_IRI

Tabelul 3.1 – Algoritmi propuși pentru îndeplinirea obiectivelor stabilite.

După cum se va demonstra, prin aplicarea oricăruia dintre algoritmii dezvoltați se reduce timpul de obținere a parametrilor *S*, respectiv se îmbunătățesc performanțele dinamice ale analizoarelor vectoriale de rețea.

Abordarea de tip intrare – ieșire pentru cei cinci *algoritmi de selecție a frecvențelor* (abreviat *ASF*) este prezentată în figura 3.1, mărimile de intrare pentru toți algoritmii fiind:

- lista frecvențelor corespunzătoare eșantionului inițial (*f<sub>i</sub>*);
- lista parametrilor *S* din eșantionul inițial ( $S_{11}$ ).

Mărimile de ieșire specificate pentru cei cinci algoritmi sunt:

- lista redusă de frecvențe (a cărei dimensiune este referită în continuare ca numărul redus de frecvențe);
- lista redusă a parametrilor *S* asociați listei reduse de frecvențe.



Fig. 3.1 - Abordarea de tip intrare – ieșire a unui ASF.

În Anexa 4 la prezenta teză de doctorat se prezintă lista inițială cu 321 de frecvențe, utilizate pentru fiecare dintre algoritmii dezvoltați. În Anexa 4 Bis se găsește tabelul restrâns cu rezultatele măsurărilor pentru cele 321 de frecvențe.

Toți algoritmii se referă la parametrii  $S_{11}$ , pentru ceilalți parametrii  $S_{12}, S_{21}, S_{22}$ abordarea fiind similară<sup>18</sup>.

Performanțele algoritmilor care au fost implementați în mediul Matlab<sup>®</sup> vor fi analizate din următoarele perspective:

- numărul redus de frecvențe utilizate pentru simularea măsurării complete;
- timpul necesar execuției algoritmului;
- eroarea relativă pe intervale în procente calculată cu relația:

$$e_{r\_int} = \frac{\left|A_{11\_m\check{a}surat} - A_{11\_aproximat}\right|}{\left|A_{11\_m\check{a}surat}\right|} \cdot 100$$
(3.1)

unde:

 $e_{r_{int}}$  este eroarea relativă pe intervale în procente;

 $A_{11_m \check{a}surat}$  – amplitudinea calculată pentru parametrul  $S_{11}$ ;

 $A_{11\_aproximat}$  – amplitudinea aferentă parametrului  $S_{11}$ , determinată în cadrul algoritmului cu funcția de interpolare obținută pentru numărul redus de frecvențe.

Referitor la eroarea relativă pe intervale în procente, aceasta exprimă numărul de erori în procente, din totalul de *N* corespunzător numărului de frecvențe inițiale, care aparțin fiecărui subinterval [0, 10), [10,20), ...[90, 100]. Ulterior se reprezintă grafic frecvența de apariție a erorii relative pe intervale în procente pentru a evalua distribuția erorilor. *Dacă majoritatea erorilor relative în procente, respectiv peste 90%, este concentrată în intervalul* 

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Se reamintește în acest context reciprocitatea parametrilor *S*, respectiv  $S_{11} = S_{22}$  și  $S_{12} = S_{21}$ .
[0, 10), atunci se consideră că algoritmul aproximează bine reprezentarea originală, folosind însă numărul redus de frecvențe.

• eroarea relativă globală în procente, calculată cu relația:

$$e_{r\_glob} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |A_{11\_m\check{a}surat\_i} - A_{11\_aproximat\_i}|}{\sum_{i=1}^{N} |A_{11\_m\check{a}surat\_i}|} \cdot 100$$
(3.2)

unde:

 $e_{r_{_qlob}}$  este eroarea relativă globală în procente;

*N* – numărul total de frecvențe inițiale;

 $A_{11_m \check{a}surat_i}$  – amplitudinea măsurată pentru parametrul S<sub>11</sub>, aferent frecvenței *i*;

 $A_{11\_aproximat\_i}$  – amplitudinea aferentă parametrului S<sub>11</sub> pentru frecvența *i*, determinată în cadrul algoritmului cu funcția de interpolare obținută pentru numărul redus de frecvențe.

Principial, fiecare algoritm ASF presupune parcurgerea următoarelor etape:

E1 - se calculează factorul de normare propus de autoare, cu relația:

$$fact = (f_{max} - f_{min}) \cdot 10 \ [GHz];$$
 (3.3)

unde:

fact este factorul de normare;

 $f_{max}$  – frecvenţa maximă;

 $f_{min}$  – frecvența minimă.

Factorul de normare este necesar pentru a obține frecvențe adimensionale care vor fi reprezentate împreună cu amplitudinile adimensionale în coordonate carteziene.

**E2** - se normează frecvențele inițiale prin scalarea acestora cu factorul de normare *fact*. Cu notațiile de mai sus și ținând cont de relația (3.3), se obține relația (3.4), pentru calcularea frecvențelor normate, după cum urmează:

$$f_{i\_normat} = \frac{f_i [GHz]}{f_{act} [GHz]} [adimensional], i = \overline{1, N}$$
(3.4)

unde:

 $f_{i normat}$  este frecvența normată;

 $f_i$  – frecvența numărul *i* din lista frecvențelor inițiale (din Anexa 4);

N-numărul total de frecvențe.

E3 - se calculează, pentru fiecare frecvență, amplitudinea  $A_{11}$  folosind componentele reale și imaginare ale parametrului  $S_{11}$  după cum urmează:

$$A_{11}(S_{11}) = \sqrt{Re(S_{11})^2 + Im(S_{11})^2} [adimensional]$$
(3.5)

E4 - se aplică unul din cei cinci algoritmi de selecție a frecvențelor;

E5 - se realizează conversia frecvențelor normate adimensionale în frecvențe  $f_i$  dimensionale prin aplicarea aceluiași factor de normare *fact*, conform relației (3.6).

$$f_i = f_{i\_normat} * fact, i = 1, M \tag{3.6}$$

unde:

 $f_i$  este frecvența înainte de normare;

M – numărul redus de frecvențe utilizate de ASF;

 $f_{i normat}$  – frecvența normată;

fact – factorul de normare.

E6 - se interpolează cele *M* valori obținute în pașii anteriori folosind *metoda spline cubică*, deoarece în urma analizei metodelor de interpolare din capitolul 2 s-a stabilit că aceasta permite obținerea celor mai apropiate valori de cele originale.

Pentru ilustrarea principiului fiecărui algoritm *ASF* propus, se prezintă câte un exemplu referitor la un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz. Anexa 4 la prezenta teză de doctorat conține fișierul asociat rezultatelor măsurărilor pentru 321 de frecvențe uniform distribuite în domeniul menționat. În această anexă, prima coloană corespunde frecvențelor exprimate în GHz. Următoarele opt coloane corespund valorilor părții reale, respectiv imaginare pentru fiecare parametru *S*, respectiv:  $Re(S_{11})$ ,  $Im(S_{11})$ ,  $Re(S_{21})$ ,  $Im(S_{21})$ ,  $Re(S_{12})$ ,  $Im(S_{12})$ ,  $Re(S_{22})$  și  $Im(S_{22})$ . În detalierea care urmează, pentru fiecare algoritm, se va analiza numai parametrul  $S_{11}$ .

Propunerile de algoritmi au presupus investigarea a numeroase resurse, indicate în bibliografia tezei de doctorat după cum urmează:

- pentru ASF\_DE referințele [B40 B48];
- pentru ASF\_PEV referințele [B50 B58];
- pentru ASF\_PE referințele [B60 B68];
- pentru ASF\_DMAP referințele [B70 B75];
- pentru ASF\_IRI referințele [B77 B86].

Rezultatele cercetărilor din teza de doctorat, concretizate printre altele în dezvoltarea și testarea celor cinci algoritmi, au fost diseminate în următoarele publicații care sunt indicate în bibliografia tezei de doctorat:

- pentru ASF\_DE: publicația de la referința [B49];
- pentru ASF\_PEV: publicația de la referința [B59];

- pentru ASF\_PE: publicația de la referința [B69];
- pentru ASF\_DMAP: publicația de la referința [B76];
- pentru ASF\_IRI: publicația de la referința [B87];
- pentru analiza comparativă a algoritmilor, publicația de la referința [B87].

# 3.1. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe distanța euclidiană

*Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe distanța euclidiană* (abreviat ASF\_DE) își propune următoarele obiective:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări și implicit scurtarea timpului de obținere a parametrilor S pentru numărul redus de frecvențe rezultate;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior).

# 3.1.1. Ilustrarea principiului ASF\_DE

Pentru ilustrarea principiului ASF\_DE se prezintă un exemplu referitor la un filtru cu domeniului de lucru 4.7 - 5.5 GHz din care s-au selectat cele 321 de frecvențe uniform distribuite conținute în Anexa 4.

Principial, ASF\_DE se bazează pe calculul distanței euclidiene (geometrice) între două puncte, care corespund la două frecvențe consecutive, reprezentate în planul *amplitudine - frecvență* normată ( $f_{i\_normat}$ ), conform figurii 3.2. Deoarece frecvența este exprimată în GHz, iar amplitudinea este adimensională, este necesară normarea tuturor frecvențelor pentru a obține valori adimensionale. Normarea frecvențelor se va face prin scalarea acestora cu factorul de normare calculat cu relația (3.7).

$$fact = (f_{max} - f_{min}) \cdot 10 \ [GHz];$$
 (3.7)

unde:

fact este factorul de normare;

 $f_{max}$  – frecvenţa maximă;

 $f_{min}$  – frecvenţa minimă.

Cu notațiile de mai sus și ținând cont de relația (3.7), se obține relația (3.8), pentru calcularea frecvențelor normate, după cum urmează:

$$f_{i\_normat} = \frac{f_i [GHz]}{f_{act} [GHz]} [adimensional], i = \overline{1, N}$$
(3.8)

unde:

 $f_{i\_normat}$  este frecvența normată;

 $f_i$  – frecvența asociată rândului *i* în ANEXA 4;

N – numărul total de frecvențe (respectiv 321).

Pentru filtrul considerat, valoarea factorului de normare rezultă:

$$fact = (5.5 - 4.7) \cdot 10 = 8 \ [GHz], \tag{3.9}$$

De exemplu, pentru f = 4.7 GHz se obține:

$$f_{1\_normat} = \frac{4.7}{8} = 0.58$$
 [adimensional] (3.10)

În mod analog se vor exprima toate frecvențele incluse în Anexa 4.

Principiul ASF\_DE, care este ilustrat în figura 3.2, implică alegerea pentru început a trei frecvențe uniform distribuite în domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz din fișierul prezentat în Anexa 4, respectiv frecvențele: 4.7 GHz, 5.1 GHz și 5.5 GHz (notate în tabelul 3.2 cu A, B și C). În acest tabel sunt prezentate pe prima coloană cele trei frecvențe inițiale, iar pe coloana a doua frecvențele normate folosind factorul de normare calculat cu relația (3.9). Tot din Anexa 4 se preiau și valorile reale și imaginare corespunzătoare parametrului  $S_{11}$ , pentru care se va calcula amplitudinea pe baza relației (3.11). Pentru exemplificare, în relația (3.11) este evidențiată obținerea valorii amplitudinii asociate parametrului  $S_{11}$  (notată în continuare  $A_{11}$ ) pentru frecvența de 4.7 GHz. În Anexa 4, acestei frecvențe îi corespund următoarele valori:  $Re(S_{11}) = 0.46$  și  $Im(S_{11}) = 0.85$ . Așa cum rezultă din relația (3.11), pentru frecvența de 4.7 GHz, ân pultudinea  $A_{11}$  ca fiind adimensională. În mod analog au fost calculate și celelalte două amplitudini pentru frecvențele de 5.1 și 5.5 GHz.

$$A_{11}(S_{11}) = \sqrt{Re(S_{11})^2 + Im(S_{11})^2} = \sqrt{(0.461122^2 + 0.856565^2)}$$
(3.11)  
= 0.9728

Pe coloanele trei și patru ale tabelului 3.2 se află valorile pentru  $\text{Re}(S_{11})$ , respectiv  $\text{Im}(S_{11})$ , citite din Anexa 4, iar în coloana cinci, sunt incluse valorile amplitudinii, calculate cu relația (3.11).

Motivația aplicării distanței euclidiene între două puncte și identificarea valorii maxime provine din necesitatea reducerii gradului de incertitudine cu privire la cele mai mari variații ale valorii amplitudinii, corespunzătoare parametrului  $S_{11}$  .între două puncte consecutive.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	Im( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
5.1	0.6375	0.020177	0.061667	0.0649	<b>B</b> (0.6375, 0.0649)
5.5	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>C</b> (0.6875, 0.9509)

Tabelul 3.2 - Valorile din cadrul ASF\_DE pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele normate și valorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

Metoda specifică ASF\_DE presupune calculul distanței euclidiene dintre fiecare două puncte consecutive cu relația:

$$d_{i} = \sqrt{(f_{(i+1)\_normat} - f_{i\_normat})^{2} + (A_{11_{i+1}} - A_{11_{i}})^{2}}$$
(3.12)

unde:

 $d_i$  este distanța între punctele de coordonate  $(f_{(i+1)\_normat}, S_{11\_normat}_{i+1})$  și  $(f_{i\_normat}, S_{11\_normat}_i)$ , cu  $i = \overline{1, M - 1}$ ;

M – numărul de eșantioane utilizate de ASF\_DE.



Fig. 3.2 – Ilustrarea alegerii celor trei frecvențe normate uniform distribuite în cadrul aplicării ASF\_DE.

Pentru exemplul din figura 3.2, în care sunt reprezentate punctele A, B, C cu coordonatele din tabelul 3.2, se calculează distanțele  $d_1$  și  $d_2$  cu relația (3.12) după cum urmează:

$$d_{1} = d_{AB} = \sqrt{(0.6375 - 0.5875)^{2} + (0.06488 - 0.9728)^{2}} = \sqrt{0.05^{2} + (-0.9079)^{2}}$$
$$= \sqrt{0.0025 + 0.8243} = 0.9093$$
$$d_{2} = d_{BC} = \sqrt{(0.6875 - 0.6375)^{2} + (0.9509 - 0.06488)^{2}} = \sqrt{0.05^{2} + 0.88602^{2}}$$
$$= \sqrt{0.0025 + 0.7850} = 0.8874$$

Comparând cele două distanțe, rezultă  $d_1 > d_2$ , ceea ce impune determinarea unei noi frecvențe normate la jumătatea intervalului  $[f_{1\_normat}, f_{2\_normat}]$ , respectiv în intervalul [0.5875, 0.6375], cu relația:

$$f_{nou\_normat} = f_{i\_normat} + \frac{f_{(i+1)\_normat} - f_{i\_normat}}{2}.$$
(3.13)

Aplicând relația (3.13) se obține pentru intervalul [0.5875, 0.6375]:

$$f_4 = 0.5875 + \frac{0.6375 - 0.5875}{2} = 0.5875 + 0.025 = 0.6125$$

Ulterior, se caută această nouă frecvență normată  $f_4$  în lista frecvențelor normate conținute în Anexa 4. În cazul în care această listă nu conține frecvența  $f_4$ , se preia valoarea imediat superioară acesteia, după care se identifică valoarea parametrului  $S_{11}$  asociat, tot în Anexa 4.

În continuare se calculează valoarea amplitudinii corespunzătoare  $(A_{11})$ , iar algoritmul este reluat pentru cele trei frecvențe inițiale cărora li se adaugă noua frecvență identificată (punctul din plan fiind notat cu D), conform tabelului 3.3 și a figurii 3.3. În pasul următor se recalculează distanțele pentru fiecare două puncte consecutive și se identifică distanța maximă, urmând să se stabilească o nouă frecvență normată.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.9	0.6125	0.583211	-0.17675	0.6094	<b>D</b> (0.6125, 0.6125)
5.1	0.6375	0.020177	0.061667	0.0649	<b>B</b> (0.6375, 0.0649)
5.5	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>C</b> (0.6875, 0.9509)

Tabelul 3.3 – Adăugarea unei noi frecvențe în cadrul ASF\_DE.

Aceste etape sunt reluate până când toate distanțele au o valoare mai mică decât o valoare impusă, notată în algoritm cu *eps*, această valoare fiind în corelație cu precizia dorită. De asemenea, algoritmul își mai poate încheia execuția dacă numărul total de frecvențe (puncte) calculate este egal cu un număr maxim prestabilit.



Fig. 3.3 – Adăugarea punctului D având coordonatele (0.6125,0.6094) în cadrul aplicării ASF DE.

Algoritmul codifică în variabila *progress* dacă unul dintre cele două criterii este îndeplinit astfel: *progress = true* echivalează cu neîndeplinirea niciunei condiții, iar *progress = false* semnifică îndeplinirea uneia dintre condiții.

Odată încheiat algoritmul, se trece la realizarea conversiei frecvențelor normate în frecvențe dimensionale pe baza relației:

$$f_i = f_{i\_normat} * fact, i = \overline{1, M}$$
(3.14)

unde:

 $f_i$  este frecvența inițială (dimensională);

 $f_{i normat}$  – frecvența normată;

M – numărul redus de frecvențe utilizate de ASF\_DE.

De exemplu, pentru  $f_{i\_normat} = 0.5875$  și factorul de normare fact = 8 GHz, prin aplicarea relației 3.14 se obține frecvența inițială  $f_i = 4.7$  GHz.

În final, se interpolează cele *M* valori obținute în pașii anteriori folosind metoda *spline cubică*.

## 3.1.2. Etapele aplicării ASF\_DE

Conform celor evidențiate în paragraful precedent, aplicarea algoritmului bazat pe determinarea distanței euclidiene (ASF\_DE) implică parcurgerea etapelor evidențiate în cele ce urmează.

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fișierul specific unei măsurări clasice și se citesc valorile corespunzătoare tuturor frecvențelor și parametrilor  $S_{11}$  corespunzători.
- <u>Etapa 2</u>. Se calculează un factor de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale.
- <u>Etapa 3</u>. Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în frecvențe adimensionale și se calculează amplitudinile  $A_{11}$  corespunzătoare parametrilor  $S_{11}$ .
- <u>Etapa 4</u>. Se aleg trei puncte corespunzătoare frecvenței minime, maxime și celei identificate la jumătatea intervalului dintre acestea.
- <u>Etapa 5</u>. Se calculează distanța dintre fiecare două puncte consecutive. Dacă toate distanțele au o valoare mai mică decât toleranța admisă *eps* (setată de utilizator), atunci algoritmul își încheie execuția, în caz contrar, algoritmul continuând cu etapa 6.
- <u>Etapa 6</u>. Se identifică distanța maximă și se calculează jumătatea intervalului pe abscisă (axa Ox) corespunzător acesteia rezultând valoarea noii frecvențe normate.
- <u>Etapa 7</u>. Se caută noua frecvență normată sau, dacă aceasta nu există în lista frecvențelor convertite în coordonate carteziene din etapa 3, se caută valoarea imediat superioară.
- <u>Etapa 8</u>. Se identifică valoarea amplitudinii A<sub>11</sub> corespunzătoare în planul *amplitudine* - *frecvență*;
- <u>Etapa 9</u>. Se reia algoritmul de la etapa 4, adăugând de fiecare dată o nouă frecvență normată în lista frecvențelor normate evaluate de către ASF\_DE. Dacă una dintre condițiile de oprire, evidențiate la prezentarea principiului ASF\_DE este îndeplinită atunci se realizează trecerea inversă din frecvențe normate în frecvențele inițiale, iar algoritmul își încheie execuția.



# *Fig. 3.4 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF\_DE.*

Pe baza etapelor evidențiate mai sus și ținând cont de abordarea intrare – ieșire din figura 3.4, a fost realizată schema logică a ASF\_DE ilustrată în figura 3.5.

În această schemă logică, variabila *GLOBAL\_freq\_list* este un vector căruia i se atribuie frecvențele inițiale (intrare). Obiectivul principal al ASF\_DE reprezintă reducerea dimensiunii acestui vector. Astfel, variabila de ieșire *GLOBAL\_current\_freq\_list* reprezintă un vector care va conține un număr redus de frecvențe din vectorul frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list*.

În figura 3.5 se poate observa că după procedura de extragere a frecvențelor și a parametrilor *S*, se calculează factorul de normare *fact* care este aplicat întregului vector de frecvențe *GLOBAL\_freq\_list*. De asemenea, se realizează conversia parametrului *S* analizat  $(S_{11})$  în amplitudinea  $A_{11}$ .

În secventa următoare a schemei logice, se aleg cele trei frecvente initiale din vectorul GLOBAL\_freq\_list uniform distribuite în domeniul [frecvență minimă, frecvență maximă]. Aceste valori depun în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, se iar vectorul GLOBAL current meas list va contine valorile corespunzătoare lui GLOBAL\_current\_freq\_list din GLOBAL\_meas\_list. Variabila progress este setată cu valoarea *true*. Cu ajutorul acestei variabile, algoritmul se va executa ciclic, până când toate distantele calculate în pasul următor vor fi mai mici decât eps (oprire normală) sau până când dimensiunea vectorului GLOBAL\_current\_freq\_list va fi mai mare decât nmax (oprire forțată).

Tot din figura 3.5 rezultă că atâta timp cât variabila *progress* (având rolul descris la prezentarea algoritmului) are valoarea *true*, se parcurg următoarele secvențe:

- se calculează distanța euclidiană pentru fiecare două puncte consecutive determinate de perechile (GLOBAL\_current\_freq\_list(k), GLOBAL\_current\_meas\_list(k)) şi (GLOBAL\_current\_freq\_list(k + 1), GLOBAL\_current\_meas\_list(k + 1));
- se identifică distanța maximă;
- se testează dacă valoarea acesteia este mai mică decât valoarea variabilei *eps*;
  - la condiție îndeplinită, variabilei *progress* i se atribuie valoarea *false*, urmată de extragerea rezultatelor și oprirea algoritmului;
  - ✤ la neîndeplinirea condiției se execută următoarele secvențe:
    - se calculează jumătatea intervalului de frecvențe pe care a fost identificată distanța maximă;
    - se caută frecvența corespunzătoare acestei valori în vectorul GLOBAL\_freq\_list;

- noua valoare este adăugată în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, precum şi valoarea amplitudinii *A*<sub>11</sub> corespunzătoare în *GLOBAL\_current\_meas\_list*;
- valoarea variabilei n este incrementată cu o unitate;
- algoritmul își reia execuția ciclică.

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine false, valorile vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a reveni la scara inițială.

Este de menționat faptul că pe baza schemei logice din figura 3.5, a fost dezvoltată în mediul Matlab<sup>®</sup> aplicația de implementare MAT\_ASF\_DE al cărei cod este prezentat în Anexa 5.



Fig. 3.5 – Schema logică aferentă ASF\_DE.

# 3.1.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF\_DE

Validarea performanțelor algoritmului ASF\_DE s-a realizat prin efectuarea a două teste diferențiate prin numărul de puncte impuse (*nmax*) și prezentate sintetic în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4 – Numărul impus de puncte pentru cele două familii de teste aplicate ASF\_DE.

Nr. test	nmax
$T_1$	50
$T_2$	100

# • **Rezultatele testului T**<sub>1</sub>

Pentru validarea rezultatelor obținute cu ASF\_DE prin simulare utilizând aplicația MAT\_ASF\_DE, se va analiza exemplul propus în subcapitolul 3.1.1 (un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz) prin intermediul dependenței *amplitudine*  $A_{11}$ -*frecven*ță.

În figura 3.6a este ilustrat graficul obținut pe baza datelor prezentate în Anexa 4 (respectiv pentru 321 de puncte), iar în figura 3.6b sunt reprezentate grafic rezultatele obținute prin execuția ASF\_DE.

Pentru evaluarea în cele 321 de puncte s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> *interp1* (cu parametrii descriși în Anexa 5), a cărei execuție a permis generarea graficului ilustrat în figura 3.6b. Pe baza celor  $n_{max_TI} = 50$  de puncte s-a obținut o funcție de interpolare, care a fost evaluată pentru toate cele 321 de frecvențe folosite pentru graficul inițial din figura 3.6a. În acest fel, s-a putut realiza o comparație între graficul inițial trasat cu cele 321 de puncte și graficul cu numărul redus de 50 de puncte. În figura 3.6b, cele  $n_{max_TI} = 50$  de puncte sunt marcate cu simbolul "\*", iar linia roșie marchează curba de interpolare spline cubică.

Pentru a realiza o comparație între cele două caracteristici prezentate în figura 3.6 a fost generat graficul din figura 3.7. Acesta a fost obținut prin suprapunerea graficului inițial care utilizează 321 de puncte (culoare albastră) și graficul obținut prin aplicarea ASF\_DE care utilizează 50 de puncte (culoare roșie). Analizând figura 3.7 se poate observa că există o zonă marcată prin Lentila 1, care nu este reconstruită prin aplicarea ASF\_DE din cauza numărului maxim de 50 de puncte impus (care s-a dovedit a fi prea mic). Mai exact, atunci când numărul de eșantioane este epuizat, algoritmul se oprește chiar dacă mai există zone care ar trebui investigate, așa cum este cea evidențiată prin Lentila 1.

Din acest exemplu, se deduce o primă concluzie, și anume, **necesitatea unei metode** de reducere a numărului de frecvențe achiziționate a căror distribuție să fie poziționată în zonele de maxim și minim, astfel încât să nu se omită *spike-uri*.



Fig. 3.6 – Reprezentarea caracteristicilor A<sub>11</sub> – frecvență rezultate din testul T<sub>1</sub> asociat ASF\_DE:
a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4);
b) pentru cele 50 de puncte obținute în urma execuției ASF\_DE.



Fig. 3.7 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul  $T_1$  aferent ASF\_DE: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 50 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_DE.

O altă problemă aflată în atenția autoarei a fost cea reprezentată de precizie, care a fost evaluată în urma calculului erorii relative cu relația:

$$e_{r\_int} = \frac{|A_{11\_m\check{a}surat} - A_{11\_aproximat}|}{|A_{11\_m\check{a}surat}|} \cdot 100$$
(3.15)

unde:

 $e_{r_int}$  este eroarea relativă pe intervale în procente;

 $A_{11_m asurat}$  – amplitudinea calculată pentru parametrul S<sub>11</sub> din Anexa 4;

 $A_{11\_aproximat}$  – amplitudinea determinată pentru parametrul S<sub>11</sub> cu funcția de interpolare calculată pentru cele 50 de puncte.

Datele obținute au fost sintetizate în figura 3.8 în care intervalele de reprezentare sunt: [0, 10), [10,20), ...[90, 100] %. Din graficul 3.8 rezultă că cea mai mare parte a erorilor (respectiv 315) este concentrată în intervalul 0 – 10%. Pentru eroarea globală calculată cu relația 3.2, a fost obținută valoarea  $e_{r_glob_TI} = 0.9\%$ . Este de menționat faptul că această valoare a fost obținută pentru  $n_{max_TI} = 50$ , ceea ce reprezintă 15.57% din totalul celor 321 de frecvențe inițiale conținute în Anexa 4. În ceea ce privește timpul de execuție, acesta a fost  $t_{ex_TI} = 0.12$  secunde. Rezultatele de mai sus sunt evidențiate și în tabelul 3.5.



Fig. 3.8 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului  $T_1$  aplicat ASF\_DE pentru 50 de frecvențe.

#### • Rezultatele testului T<sub>2</sub>

În acest test s-a utilizat același filtru cu domeniul de lucru 4.7 – 5.5 GHz și datele din Anexa 4, dar de această dată, s-a aplicat ASF\_DE pentru  $n_{max_T2} = 100$  de frecvențe din cele 321 de frecvențe inițiale (respectiv **31.15%**). Așa cum se prezintă și în tabelul 3.5 se poate observa că timpul de execuție a fost de  $t_{ex_T2} = 0.41$  secunde, iar pentru eroarea relativă globală s-a obținut valoarea  $e_{r_glob_T2} = 0.04\%$ . În figura 3.9 este prezentat graficul suprapus al datelor inițiale (din Anexa 4) – culoare albastră, împreună cu numărul redus de 100 de frecvențe (verde) rezultate în urma aplicării ASF\_DE – culoare roșie. Din figura 3.9 se poate observa că prin aplicarea algoritmul ASF\_DE rezultă un grafic apropiat de cel aferent testului  $T_1$  (când au fost utilizate 50 de puncte), deși numărul de puncte pentru testul curent a fost dublat.

Rezultatele prezentate în tabelul 3.5 pentru testul  $T_2$  evidențiază faptul că prin dublarea numărului de frecvențe evaluate de ASF\_DE, eroarea globală scade cu 3%, iar timpul de execuție crește cu 30%. Cu alte cuvinte, creșterea numărului de frecvențe evaluate conduce la scăderea erorii globale și la creștea timpului de execuție.

Analizând comparativ rezultatele furnizate din testele  $T_1$  și  $T_2$  se constată faptul că *o creștere a numărului de eșantioane nu garantează neapărat și obținerea reprezentării grafice a tuturor spike-urilor*. Din aceste considerente, următorii algoritmi propuși de către autoarea prezentei teze de doctorat vor avea ca obiectiv și *identificarea punctelor de extrem*.



Fig. 3.9 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> aferent ASF\_DE: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 100 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_DE.

Tabelul 3.5 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_DE pentru un număr diferit de frecvențe evaluate.

Test	Pondere frecvențe evaluate din totalul de 321 [%]	Eroare relativă globală [%]	Timp de execuție [s]
T <sub>1</sub>	15.57	0.9	0.12
T <sub>2</sub>	31.15	0.04	0.41

### 3.2. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil

Ca și pentru ASF\_DE, obiectivele importante ale acestui algoritm (abreviat ASF\_PEV) sunt:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări şi implicit scurtarea timpului de obținere a parametrilor S pentru numărul redus de frecvențe rezultat;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior).

# 3.2.1. Ilustrarea principiului ASF\_PEV

Pentru ilustrarea principiului algoritmului propus se prezintă același exemplu din subcapitolul anterior 3.1, respectiv un filtru cu domeniului de lucru 4.7 - 5.5 GHz pentru care

s-au utilizat 321 de frecvențe uniform distribuite în domeniul menționat, care au fost extrase tot din Anexa 4, cu semnificația detaliată anterior.

Principial, ASF\_PEV se bazează pe utilizarea unui pas de explorare a cărui valoare este determinată de pozițiile ultimelor două puncte reprezentate în planul *amplitudine - frecvență* normată, acest pas de explorare fiind utilizat pentru determinarea unei noi frecvențe. Variabilitatea pasului de explorare este impusă de granularitatea dorită a punctelor într-o anumită zonă, după cum urmează:

- dacă pasul de explorare este prea mare, atunci punctele vor fi dispersate (granularitate mare, precizie scăzută);
- dacă pasul de explorare este prea mic, atunci punctele vor fi concentrate (granularitate mică, precizie ridicată).

Algoritmul ASF\_PEV presupune, ca și în cazul algoritmului ASF\_DE, normarea tuturor frecvențelor pentru a obține valori adimensionale. Normarea frecvențelor se va face prin scalarea acestora cu un factor de normare calculat cu relația (3.7) detaliată la prezentarea algoritmului ASF\_DE. Calculul frecvențelor normate s-a realizat cu relația (3.8), acestea fiind notate în continuare  $f_{i normat}$ , conform explicațiilor din subcapitolul 3.1.1.

Principiul ASF\_PEV, care este ilustrat în figura 3.10, presupune utilizarea unui pas (*step*) de explorare variabil, a cărui valoare inițială este calculată ca diferența între două frecvențe consecutive, conform relației:

$$step = initial_{step} = f_{2\_normat} - f_{1\_normat}$$
(3.16)

unde:

step este pasul de explorare variabil;

*initial<sub>step</sub>* – pasul de explorare inițial;

 $f_{1\_normat}$  – valoarea frecvenței normate corespunzătoare primei frecvențe incluse în Anexa 4;

 $f_{2\_normat}$  – valoarea frecvenței normate corespunzătoare celei de-a doua frecvențe conținute în Anexa 4 la prezenta teză de doctorat.

Pentru filtrul cu domeniul 4.7 – 5.5 GHz, prin aplicarea relației (3.16) se obține pasul de explorare inițial:

$$step = 0.5878 - 0.5875 = 0.0003 [adimensional]$$
 (3.17)

Pentru început se aleg primele două frecvențe din fișierul prezentat în Anexa 4, respectiv frecvențele: 4.7000 GHz și 4.7025 GHz, frecvențe ce reprezintă în formă normată

abscisele punctelor A și B figurate în tabelul 3.6. Semnificația datelor reprezentate în acest tabel este aceeași cu cea a datelor din tabelul 3.2. Și în cazul acestui algoritm se utilizează relațiile (3.8) și (3.11) pentru conversia frecvenței și a parametrului  $S_{11}$  în coordonate carteziene pe baza cărora s-a trasat graficul din figura 3.10, în care sunt ilustrate punctele A și B. Pe coloanele trei și patru ale tabelului 3.6 se găsesc valorile pentru Re( $S_{11}$ ), respectiv Im( $S_{11}$ ), preluate din Anexa 4, iar în coloana cinci, sunt incluse valorile amplitudinii, calculate cu relația (3.11).

Tabelul 3.6 - Valorile din cadrul ASF\_PEV pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele normate și<br/>valorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.7025	0.5878	0.466663	0.853191	0.9725	<b>B</b> (0.5878, 0.9725)

În continuare, se pune problema modificării valorii pasului de explorare variabil (*step*) pe baza valorii amplitudinii  $A_{11}$  pentru ultimele puncte, astfel încât noua frecvență să poată fi calculată pe baza relației (3.18), respectiv:

$$f_{(i+1)\_normat} = f_{i\_normat} + step, \text{cu } i = \overline{1, N-1}$$
(3.18)

unde:

 $f_{(i+1)\_normat}$  este noua frecvență normată;

 $f_{i\_normat}$  – ultima frecvență evaluată cu algoritmul ASF\_PEV;

step – pasul de explorare variabil;

N – numărul total de frecvențe corespunzător Anexei 4, respectiv 321.

În cele ce urmează, se propune o modalitate de calcul a pasului de explorare care presupune ca acesta să crească atunci când amplitudinile corespunzătoare ultimelor două frecvențe nu diferă cu mai mult decât o valoare impusă, după cum este ilustrat în figura 3.10 prin punctele A și B. Atunci când pentru ultimele două frecvențe variația amplitudinii este superioară unei valori prestabilite se impune scăderea pasului de explorare.

Cele două situații sunt evidențiate în figura 3.10. În această figură, pentru determinarea punctului care va succeda punctul B trebuie mărit pasul de explorare, iar pentru determinarea punctului care va succeda punctului D se impune micșorarea pasului de explorare.

Pentru descrierea consistenței ASF\_PEV, lentilele 1 și 2 din figura 3.10 au fost mărite și reprezentate în figurile 3.11 (Lentila 1) și 3.12 (Lentila 2).



Fig. 3.10 – Ilustrarea variației de amplitudine pentru ASF\_PEV: Lentila 1 – variație mică între punctele A și B; Lentila 2 - variație mare între punctele C și D.

În continuare, se pune problema cuantificării variațiilor mari sau mici ale amplitudinii. Deoarece o clasificare a variațiilor mari, respectiv a celor mici, este dificil sau chiar imposibil de stabilit, se propune evaluarea unghiului format de dreapta determinată de ultimele două puncte din secvență cu axa Ox (respectiv axa frecvențelor) ca măsură (modalitate de clasificare) a variațiilor amplitudinii  $A_{11}$ .

Pentru exemplificare, în figura 3.11 este prezentat unghiul  $\alpha$  determinat de dreapta (care trece prin punctele A și B din figura 3.10) cu axa din Ox (respectiv cu axa frecvențelor normate).



Fig. 3.11 – Ilustrarea situației  $\alpha < \theta$  pentru care se propune creșterea pasului de explorare în cazul ASF\_PEV: A, B puncte extrase din Lentila 1 - figura 3.10.

Se poate observa că acest unghi  $\alpha$  are o valoare mai mică decât un unghi impus  $\theta$  format de dreapta  $d_1$  (colorată în roșu) cu o paralelă la axa Ox, ceea ce înseamnă că pasul de explorare poate fi crescut.

În figura 3.12 este ilustrat cazul când unghiul  $\alpha$  are o valoarea mai mare decât unghiul  $\theta$  format de dreapta  $d_1$  cu o paralelă la axa Ox, ceea ce înseamnă variații majore ale amplitudinii și, implicit, necesitatea scăderii pasului de explorare.



Fig. 3.12 - Ilustrarea situației  $\alpha \ge \theta$  pentru care se propune scăderea pasului de explorare în cazul ASF\_PEV: C, D puncte extrase din Lentila 2 - figura 3.10.

Observațiile proprii și experimentele efectuate de către autoare au condus la concluziile formulate sintetic în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7 - Concluzii referitoare la sensul de variație a pasului de explorare aferent ASF\_PEV.

Relația între unghiul $\alpha$ și $\theta$	Concluzie referitoare la pasul de explorare (step)
$\alpha < \theta$ (figura 3.11)	step trebuie crescut
$\alpha \ge \theta$ (figura 3.12)	step trebuie micșorat

Figura 3.13 ilustrează principial modalitatea de calcul a unghiului  $\alpha$  pentru două puncte  $P(p_x, p_y)$  și  $Q(q_x, q_y)$  conținute în planul yOx.





$$tg(\alpha) = \frac{|q_y - p_y|}{|q_x - p_x|}$$
(3.19)

de unde:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{|q_y - p_y|}{|q_x - p_x|}\right) \tag{3.20}$$

Aplicând relația (3.20) pentru coordonatele punctelor A și B din tabelul 3.6 se obține:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|0.9725 - 0.9728|}{|0.5878 - 0.5875|}\right) = \arctan(1) = 45^{\circ}$$
(3.21)

o ilustrare fiind prezentată în figura 3.14.



Fig. 3.14 – Ilustrarea unghiului α asociat dreptei care trece prin punctele A și B aferente Lentilei 1 din figura 3.10.

Analizele experimentale efectuate de autoare pentru dispozitive diferite și pentru o largă gamă de frecvențe, au condus la ideea ajustării pasului de explorare conform relațiilor din tabelul 3.8, unde *step\_c* este pasul curent, iar *step\_a* este pasul anterior.

Tip variație pentru pas (step)Relație propusă pentru actualizare pas (step)step crește $step\_a = 2 * step\_c$ step scade $step\_a = \frac{step\_c}{4}$ 

Tabelul 3.8 - Relațiile propuse pentru actualizarea pasului de explorare aferent ASF\_PEV.

Pentru exemplul filtrului cu domeniul de lucru 4.6 - 5.5 GHz, calculul noii valori a pasului de explorare se face cu relația de mai jos care transpune relațiile conținute în tabelul 3.8. Deoarece trebuie evitată situația în care pasul de explorare ar crește sau scade necontrolat, se impune ca acesta să poată lua valori în intervalul [*initial*<sub>step</sub>, 9\* *initial*<sub>step</sub>].

Relația (3.22) permite actualizarea pasului de explorare pe baza argumentelor din tabelele 3.7 și 3.8.

$$step\_a = \begin{cases} 2 * step\_c, & \alpha < \theta \\ \underline{step\_c} \\ \underline{4}, & \alpha \ge \theta \end{cases}$$
(3.22)

În continuare se compară valoarea unghiului  $\alpha$  cu valoarea unui unghi limită  $\theta$  corelat cu precizia dorită. Pentru acest exemplu s-a ales  $\theta = 50^\circ$ , astfel încât conform relației (3.22) rezultă dublarea pasului de explorare și calcularea unei noi frecvențe normate cu relația:

$$f_{nou\_normat} = f_{i\_normat} + step \tag{3.23}$$

Aplicând relația (3.22) pentru exemplul filtrului cu domeniul de lucru 4.7 – 5.5 GHz și pasul de explorare în intervalul [0.0003, 0.0027], rezultă:

*step* = 2 \* 0.0003 = 0.0006, deoarece 
$$\alpha < \theta$$

Aplicând relația (3.23) se obține noua frecvență:

$$f_3 = 0.5881 + 0.0006 = 0.5887$$

Pentru noua frecvență normată  $f_3$  se calculează valoarea amplitudinii corespunzătoare  $(A_{11})$ , iar algoritmul este reluat pentru cele două frecvențe inițiale cărora li se adaugă noua frecvență identificată (punctul din plan fiind notat cu C), conform tabelului 3.9. În pasul următor se recalculează pasul de explorare pentru ultimele două puncte consecutive (respectiv punctele B şi C) și se identifică unghiul realizat de dreapta BC cu axa Ox, urmând să se stabilească o nouă frecvență normată.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	Im(S <sub>11</sub> )	A <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.7025	0.5878	0.466663	0.853191	0.9725	<b>B</b> (0.5878, 0.9725)
4.7075	0.5884	0.846150	0.034033	0.9718	C (0.5884, 0.9718)

Tabelul 3.9 – Adăugarea unei noi frecvențe prin metoda ASF\_PEV.

Aceste etape sunt reluate până când ultima frecvență calculată depășește valoarea ultimei frecvențe din Anexa 4 (aceasta reprezentând frecvența maximă).

Odată încheiat algoritmul, se realizează conversia frecvențelor normate în domeniul frecvențelor inițiale  $f_i$  prin aplicarea factorului de normare *fact*, introdus prin relația (3.7), în subcapitolul 3.1.1. În ultima etapă, se interpolează prin metoda spline cubică valorile calculate cu algoritmul ASF\_PEV.

## 3.2.2. Etapele aplicării ASF\_PEV

Conform celor evidențiate în paragraful precedent, aplicarea *algoritmului de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil* (ASF\_PEV) implică parcurgerea etapelor descrise în cele ce urmează.

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fișierul specific unei măsurări clasice și se citesc valorile corespunzătoare tuturor frecvențelor și parametrilor  $S_{11}$  corespunzători.
- <u>Etapa 2</u>. Se calculează un factor de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale.
- <u>Etapa 3</u>. Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în frecvențe normate și a parametrilor  $S_{11}$  în amplitudinile  $A_{11}$  (pentru fiecare frecvență).
- <u>Etapa 4</u>. Se aleg două frecvențe consecutive normate și amplitudinile corespunzătoare acestora. Punctele rezultate în planul xOy (x corespunde frecvențelor normate și y – amplitudinilor) constituie puncte inițiale pentru algoritm.
- <u>Etapa 5</u>. Se calculează pasul inițial de explorare ca diferență între primele două frecvențe identificate în fișierul Anexa 4 și prelucrate conform etapei 3.
- <u>Etapa 6</u>. Se calculează unghiul format de dreapta determinată de cele două puncte cu axa Ox (sau cu o dreaptă paralelă cu aceasta).
- Etapa 7. Dacă unghiul calculat este mai mic decât o valoare θ impusă, atunci pasul de explorare este mărit. În caz contrar, pasul de explorare este micşorat, ambele actualizări se realizează conform relației (3.22).

 <u>Etapa 8</u>. Se calculează o nouă frecvență corespunzătoare noului pas de explorare. Dacă valoarea acestei frecvențe este mai mică decât frecvența maximă, atunci algoritmul se reia de la etapa 6, adăugând de fiecare dată o nouă frecvență normată în lista frecvențelor normate evaluate de către ASF\_PEV. Algoritmul își încheie execuția atunci când noua frecvență normată este mai mare decât frecvența maximă.

În figura 3.15 este prezentată abordarea de tip intrare – ieșire a algoritmului ASF\_PEV.



Fig. 3.15 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF\_PEV.

Figura 3.16 prezintă schema logică aferentă algoritmului ASF\_PEV care a fost elaborată ținând cont de abordarea sistemică a acestuia ilustrată în figura 3.15. Ca și în cazul algoritmului ASF\_DE, variabila *GLOBAL\_freq\_list* este un vector care conține frecvențele inițiale. Variabila de ieșire *GLOBAL\_current\_freq\_list* reprezintă un vector care conține un număr redus de frecvențe din vectorul frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list* (identificat în figura 3.15 ca variabilă de ieșire).

În schema logică din figura 3.16 se observă că după extragerea frecvențelor și a parametrilor *S*, se calculează factorul de normare *fact*, care este aplicat întregului vector de frecvențe *GLOBAL\_freq\_list* (din Anexa 4). În continuare, se realizează calculul pentru fiecare frecvență a amplitudinii  $A_{11}$  pe baza parametrilor  $S_{11}$ .

În etapa următoare se aleg primele două frecvențe consecutive din vectorul *GLOBAL\_freq\_list*. Amplitudinile corespunzătoare celor două frecvențe se depun în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

În algoritmul ASF\_PEV se cuantifică în variabila logică *progress* astfel:

- c) progress = false: semnifică faptul că frecvența calculată depăşeşte frecvența maximă (ultima frecvență din vectorul GLOBAL\_freq\_list) și prin urmare algoritmul se opreşte;
- d) progress = true: semnifică faptul că frecvența maximă nu a fost depăşită şi prin urmare algoritmul continuă cu o nouă iterație.

Cât timp variabila progress are valoarea true, se parcurge secvența:

- P1 se calculează unghiul α conform relației (3.20) unde se consideră ultimele două puncte de forma (GLOBAL\_current\_freq\_list(k),
- GLOBAL\_current\_meas\_list(k)) și (GLOBAL\_current\_freq\_list(k 1), GLOBAL\_current\_meas\_list(k - 1));
- P2 se testează dacă valoarea unghiului  $\alpha$  este mai mică decât valoarea unghiului  $\theta$  (valoare impusă);
  - P21 la condiție îndeplinită (adică  $\alpha < \theta$ ), pasul de explorare este dublat, după care:
    - P211 se testează dacă noua valoare a pasului de explorare este peste limita superioară impusă pentru acesta (respectiv 9\*initial\_step);
    - P212 la condiție îndeplinită, valoarea noului pas este setată cu valoarea limitei superioare de variație a pasului (9\*initial\_step);
  - P22 la neîndeplinirea condiției referitoare la unghiul α, pasul de explorare se stabileşte la o pătrime din valoarea anterioară (conform relației (3.22), după care:
    - P221 se testează dacă noua valoare a pasului de explorare este sub limita inferioară impusă pentru acesta (respectiv initial\_step);
      - P2211 la condiție îndeplinită, valoarea noului pas este setată cu valoarea limitei inferioare de variație a pasului (initial\_step).
- P3 se calculează noua frecvență (conform relației (3.23));
- P4 se caută frecvența corespunzătoare acestei valori în vectorul GLOBAL\_freq\_list;
- P5 noua valoare este adăugată în vectorul  $GLOBAL\_current\_freq\_list$ , precum și valoarea calculată a amplitudinii  $A_{11}$  corespunzătoare în  $GLOBAL\_current\_meas\_list;$

P6 - algoritmul își reia execuția ciclică.

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine *false*, valorile vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a reveni la frecvențele inițiale.

Pe baza schemei logice aferente ASF\_PEV ilustrată în figura 3.16, a fost elaborat în mediul Matlab<sup>®</sup> aplicația MAT\_ASF\_PEV al cărui cod este prezentat în Anexa 6 la prezenta teză de doctorat.



Fig. 3.16 – Schema logică aferentă algoritmului ASF\_PEV.

# 3.2.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF\_PEV

Performanțele algoritmului ASF\_PEV au fost validate prin efectuarea a două familii de teste pentru valori diferite ale unghiului  $\theta$ . Consecința modificării unghiului  $\theta$  se reflectă în modificarea numărului de puncte evaluate de ASF\_PEV, prezentate sintetic în tabelul 3.10.

Nr. test	θ	Nr. puncte
$T_1$	82°	50
$T_2$	68.5°	100

Tabelul 3.10 – Numărul de puncte evaluate de către ASF\_PEV pentru familiile de teste  $T_1$  și  $T_2$ .

# • Rezultatele testului T<sub>1</sub>

Pentru validarea rezultatelor obținute cu ASF\_PEV prin simulare utilizând codul  $MAT\_ASF\_PEV$  dezvoltat în Matlab<sup>®</sup> și prezentat în Anexa 6, rezultă dependența *frecvență* – *amplitudine*  $A_{11}$  pentru filtrul cu domeniul de lucru 4.7 – 5.5 GHz. Analog graficelor din subcapitolul 3.1.4, unde au fost detaliate reprezentările pentru ASF\_DE, se evidențiază pentru algoritmul ASF\_PEV următoarele reprezentări:

- figura 3.17a conține caracteristica amplitudine frecvență pentru cele 321 de puncte din Anexa 4;
- figura 3.17b conține caracteristica amplitudine frecvență pentru rezultatele obținute prin execuția ASF\_PEV considerând  $\theta = 82^{\circ}$ . Așa cum reiese din tabelul 3.10, algoritmul reduce numărul de puncte la *50* (față de *321* numărul inițial). Pentru cele *50 de puncte* s-a aplicat metoda interpolării spline cubică, după care s-a procedat ca în Testul T<sub>1</sub> asociat algoritmului ASF\_DE (prezentat în subcapitolul 3.1.3).
- figura 3.18 ilustrează o comparație între cele două grafice prezentate în figura 3.17. Această figură a rezultat prin suprapunerea graficului inițial care utilizează 321 de puncte (culoare albastră) și caracteristica obținută prin execuția ASF\_PEV care utilizează θ = 82° (50 de puncte culoare roșie). Analizând figura 3.18 se poate observa că în zona marcată prin lentila 3, graficul celor 50 de puncte interpolate nu se suprapune în totalitate cu graficul celor 321 de puncte.

**O primă concluzie** a rezultatelor testului  $T_1$  este aceea că *modalitatea de alegere a* pasului de explorare nu garantează poziționarea punctelor rezultate prin execuția

algoritmului în zonele de maxim și de minim. Există situații când menținerea pasului de explorare la o valoare scăzută face posibilă alegerea punctelor în zone de maxim sau minim (cum este cazul lentilelor 1 și 2 din figura 3.18). Cu toate acestea, obiectivul algoritmului ASF\_PEV este de a reduce numărul de puncte, ceea ce înseamnă că pasul de explorare trebuie menținut la o valoare cât mai mare, fără a fi afectată consistența informațională.

**O a doua concluzie** desprinsă din analiza rezultatelor testului  $T_1$  arată că *alegerea* unui unghi cu o valoare mare (care să permită evaluarea unui număr redus de puncte) nu reușește să mențină în totalitate consistența informațională, după cum se observă în lentila 3 din figura 3.18.



Fig. 3.17 – Reprezentarea caracteristicilor A<sub>11</sub> – frecvență rezultate din testul T<sub>1</sub> asociat ASF\_PEV:
a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4);
b) pentru cele 50 de puncte obținute în urma execuției ASF\_PEV cu θ = 82°.



Fig. 3.18 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul  $T_1$  aferent ASF\_PEV: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 50 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_PEV.

Analog abordării din subcapitolul 3.1.4, pentru evaluarea preciziei ASF\_PEV, se calculează cu relația (3.15) frecvența de apariție pentru acest algoritm a erorii relative pe intervale ( $e_{r_int}$ ) exprimată în [%]. Conform reprezentării din figura 3.19, se poate observa că cea mai mare parte a erorilor este concentrată în intervalul 0 – 10%.



Fig. 3.19 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului  $T_1$  aplicat ASF\_PEV pentru 50 de frecvențe.

Valoarea erorii relative globale,  $e_{r\_glob}$ , este de  $e_{r\_glob\_T1} = 0.14\%$  pentru cele 50 de frecvențe rezultate (care reprezintă 15.57% din totalul frecvențelor). Timpul de execuție al acestui test a fost de  $t_{ex\_T1} = 0.48$  secunde. În tabelul 3.11 sunt centralizate aceste rezultate pentru a putea analiza performanțele algoritmului pentru diferite teste.

### • Rezultatele testului T<sub>2</sub>

A doua familie de teste a presupus aplicarea ASF\_PEV pentru  $\theta = 68.5^{\circ}$ , în urma executării programului au rezultat  $N_2 = 100$  de frecvențe care reprezintă **31.15%** din numărul total de frecvențe. În tabelul 3.11 se poate observa că timpul de execuție este  $t_{ex_T2} =$ **0.48** secunde, iar  $e_{r_glob_T2} =$ **0.01%**. În figura 3.20 este prezentat graficul datelor inițiale (din Anexa 4) – culoare albastră, suprapus cu numărul redus de 100 de frecvențe (verde), împreună cu rezultatele interpolării celor 100 de frecvențe – culoare roșie. În figura 3.20 se poate observa o distribuție a punctelor diferită de cea aferentă testului T<sub>1</sub>. Tot această figură conduce la concluzia că prin creșterea preciziei (respectiv prin micșorarea unghiului  $\theta$ ) se obține o eroare globală relativă mai mică decât în cazul testului T<sub>1</sub>. În plus, testul T<sub>2</sub> arată rezultatele foarte bune ale algoritmului atât din punct de vedere al erorii globale relative, cât și din punct de vedere al timpului de execuție care este identic cu cel obținut la testului T<sub>1</sub>, în condițiile dublării numărului de puncte.



Fig. 3.20 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> aferent ASF\_PEV: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 100 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_PEV.

Tabelul 3.11 prezintă sintetic rezultatele celor două teste  $T_1$  și  $T_2$ . Se constată că în cazul algoritmul ASF\_PEV, prin dublarea numărului de puncte, eroarea relativă globală scade cu 14%, iar timpul de execuție rămâne constant. Cu alte cuvinte, creșterea numărului de frecvențe evaluate conduce la scăderea considerabilă a erorii globale.

Tabelul 3.11 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_PEV pentru un număr diferit de frecvențe evaluate.

Test	Pondere frecvențe evaluate din totalul de 321 [%]	Eroare relativă globală [%]	Timp de execuție [s]
$T_1$	15.57	0.14	0.48
$T_2$	31.15	0.01	0.48

Rezultatele obținute în cadrul testelor  $T_1$  și  $T_2$  conduc la o concluzie globală referitoare la ASF\_PEV, și anume: *creșterea numărului de eșantioane se reflectă într-o eroare relativă globală mai mică, dar care nu garantează obținerea reprezentării grafice a tuturor spike-urilor*.

## 3.3. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem

Acest al treilea algoritm propus pentru selecția frecvențelor utilizează punctele de extrem ale caracteristicii amplitudine – frecvență. Obiectivele importante ale acestui algoritm (abreviat ASF\_PE) sunt similare cu ale algoritmilor precedenți, și anume:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări și implicit scurtarea timpului de achiziție a parametrilor S pentru numărul redus de frecvențe rezultat;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior). Ca notă specifică, pentru identificarea *spike-urilor*, algoritmul ASF\_PE se bazează pe identificarea *punctelor de extrem aferente* caracteristicii *amplitudine frecvență*.

### 3.3.1. Ilustrarea principiului ASF\_PE

Pentru ilustrarea principiului algoritmului ASF\_PE se va folosi același exemplu din subcapitolele precedente, respectiv un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz pentru care sau utilizat 321 de frecvențe uniform distribuite în acest domeniu, care sunt incluse în Anexa 4 împreună cu alte date asociate filtrului.

Motivația determinării punctelor de extrem provine din necesitatea identificării tuturor spike-urilor aferente reprezentării caracteristicii amplitudine – frecvență prin utilizarea unui număr redus de frecvențe.

Pentru ilustrarea principiului ASF\_PE, s-au utilizat inițial un număr de patru frecvențe uniform distribuite, conform datelor din tabelul 3.12 și figura 3.21.

Algoritmul ASF\_PE presupune, ca și în cazul algoritmilor ASF\_DE și ASF\_PEV, normarea tuturor frecvențelor pentru obținerea valorilor adimensionale.

Pentru normarea frecvențelor, în subcapitolul 3.1.1 s-a propus relația:

$$fact = (f_{max} - f_{min}) \cdot 10 \ [GHz];$$
 (3.24)

unde:

fact este factorul de normare;

 $f_{max}$  – frecvenţa maximă;

 $f_{min}$  – frecvența minimă.

Pentru calculul frecvențelor normate se utilizează relația de mai jos propusă în același subcapitol, respectiv:

$$f_{i\_normat} = \frac{f_i [GHz]}{f_{act} [GHz]} [adimensional], i = \overline{1, N}$$
(3.25)

unde:

 $f_{i\_normat}$  este frecvența normată;

 $f_i$  – frecvența asociată rândului *i* în Anexa 4;

N – numărul total de frecvențe (respectiv 321).

Ilustrarea principului algoritmului se va face pentru patru puncte, evidențiate în tabelul 3.12, cu coordonatele reprezentate de: *frecvențe normate* (rezultate prin aplicarea relației (3.25)) și *amplitudini* (calculate cu relația (3.5)).

Tabelul 3.12 - Valorile din cadrul ASF\_PE pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențele normate șivalorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.9675	0.6209	0.187144	0.174148	0.2556	<b>B</b> (0.6209, 0.2556)
5.2350	0.6544	0.128186	-0.09490	0.1595	<b>C</b> (0.6544, 0.1595)
5.5000	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>D</b> (0.6875, 0.9509)

Se consideră, în cele ce urmează, funcția polinomială asociată amplitudinii:

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$
(3.26)

unde variabila x este corespunde frecvenței și al cărei grafic conține punctele A, B, C și D (ilustrate în figura 3.21).

Pentru determinarea coeficienților a, b, c și d se formează sistemul.

$$\begin{cases} a \cdot 0.5875^{3} + b \cdot 0.5875^{2} + c \cdot 0.5875 + d = 0.9728 \\ a \cdot 0.6209^{3} + b \cdot 0.6209^{2} + c \cdot 0.6209 + d = 0.2556 \\ a \cdot 0.6544^{3} + b \cdot 0.6544^{2} + c \cdot 0.6544 + d = 0.1595 \\ a \cdot 0.6875^{3} + b \cdot 0.6875^{2} + c \cdot 0.6875 + d = 0.9509 \end{cases}$$
(3.27)

care poate exprimat în formă matriceală:

$$V \cdot N = Y$$

unde:

V este matricea coeficienților, respectiv:

$$V = \begin{pmatrix} 0.2028 & 0.3452 & 0.5875 & 1 \\ 0.2394 & 0.3855 & 0.6209 & 1 \\ 0.2802 & 0.4282 & 0.6544 & 1 \\ 0.3250 & 0.4727 & 0.6875 & 1 \end{pmatrix}$$

*Y* este vectorul termenilor liberi:

$$Y = \begin{pmatrix} 0.9728\\ 0.2556\\ 0.1595\\ 0.9509 \end{pmatrix}$$

*N* este vectorul necunoscutelor:

$$N = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}$$

Rezolvarea sistemului se realizează prin metoda Cramer, care pentru determinarea componentelor vectorului N presupune calculul determinantului matricei V și a determinanților obținuți prin înlocuirea fiecărei coloane cu coloana terminilor liberi Y, după cum se indică în relația (3.28).

$$det(V) = 1.6501 \cdot 10^{-8}$$

$$det(V_a) = det \begin{pmatrix} 0.9728 & 0.3452 & 0.5875 & 1\\ 0.2556 & 0.3855 & 0.6209 & 1\\ 0.1595 & 0.4282 & 0.6544 & 1\\ 0.9509 & 0.4727 & 0.6875 & 1 \end{pmatrix} = 2.0458 \cdot 10^{-5}$$

$$a = \frac{det(V_a)}{det(V)} = 1.2398 \cdot 10^3 = 1239.8$$
(3. 28)

În mod similar se obțin pentru coeficienți b, c și d valorile:

b = -2031.4c = 1075.1d = -180.92

Înlocuind în relația (3.26) valorile determinate pentru coeficienții *a*, *b*, *c* și *d*, se obține funcția f(x), respectiv:

$$f(x) = 1239.8x^3 - 2031.4x^2 + 1075.1x - 180.92$$
(3.29)

al cărei grafic este trasat în figura 3.21.

În pasul următor se evaluează funcția f(x), respectiv amplitudinea, pentru toate cele 321 de frecvențe normate din Anexa 4 Bis, care constituie valori aproximate pentru amplitudini. Aceste valori trebuie *comparate* cu valorile experimentale (măsurate) conținute în Anexa 4 Bis.

În acest scop, se asociază eroarea în amplitudine relația:

$$er_A = |val_{aprox\_A} - val_{m\breve{a}s\_A}|$$
(3.30)

unde:

*er\_A* este eroarea în amplitudine;

*valaprox\_A* – valoarea aproximată cu funcția (3.29) a amplitudinii;

*val<sub>măs\_A</sub>* – valoarea măsurată a amplitudinii conform Anexei 4 Bis.

În șirul de valori obținut prin aplicarea relației (3.29) se identifică amplitudinea minimă, respectiv  $A_{min\_aprox} = 0.0868$  căreia îi corespunde frecvența normată  $f_{normat} = 0.6422$ . Din Anexa 4 Bis rezultă  $A_{min\_mas} = 0.1668$ . Valorile pentru  $f_{normat}$  și  $A_{min\_aprox}$  sunt coordonatele punctului de minim E(0.6422, 0.0868) evidențiat în figura 3.21.



Fig. 3.21 – Ilustrarea principiului ASF\_PE care utilizează puncte de extrem.

Aplicând relația (3.30) pentru cele două amplitudini evidențiate mai sus, rezultă:

$$er_A = |0.0868 - 0.1668| = 0.800$$

La pasul următor, celor patru frecvențe inițiale (corespunzătoare punctelor *A*, *B*, *C*, *D*) li se adaugă frecvența corespunzătoare punctului de minim *E* identificat în pasul anterior. În tabelul 3.13 sunt înscrise coordonatele celor cinci puncte (*A*, *B*, *C*, *D și E*), puncte pentru care se va determina o nouă funcție polinomială (de această dată de gradul 4).

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.9675	0.6209	0.187144	0.174148	0.2556	<b>B</b> (0.6209, 0.2556)
5.1375	0.6422	0.078480	0.147168	0.1668	E (0.6422, 0.1668)
5.2350	0.6544	0.128186	-0.09490	0.1595	<b>C</b> (0.6544, 0.1595)
5.5000	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>D</b> (0.6875, 0.9509)

Tabelul 3.13 - Adăugarea unei noi frecvențe prin metoda ASF\_PE.

Pașii de mai sus sunt executați atâta timp cât variabila *progress* are valoarea *true*, respectiv atâta timp cât eroarea  $er_A$  are o valoarea mai mare decât o valoare eps impusă, conform corelațiilor sintetizate în tabelul 3.14.

Relația între <i>er</i> și <i>eps</i>	Concluzie referitoare la continuarea algoritmului prin variabila <i>progress</i>
er > eps	progress = true
$er \le eps$	progress = false

Tabelul 3.14 – Codificarea variabilei progress pentru ASF\_PE.

<u>Observație:</u> După cum se va vedea ulterior, variabila *progress* mai poate lua valoarea *false* și la epuizarea unui număr prestabilit de frecvențe.

După ce variabila *progress* capătă valoarea *false*, se realizează conversia frecvențelor normate adimensionale în frecvențe dimensionale  $f_i$  prin aplicarea factorului de normare *fact*, introdus prin relația (3.14), după cum s-a arătat în subcapitolul 3.1.1. În ultima etapă, se interpolează prin metoda *spline cubică* valorile amplitudinilor selectate în cadrul algoritmului ASF\_PE, rezultatul interpolării reprezentând noua caracteristică *amplitudine – frecvență* obținută pe baza numărului redus de frecvențe.

# 3.3.2. Etapele aplicării ASF\_PE

Conform celor evidențiate în subcapitolul precedent, aplicarea *algoritmului de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem* (ASF\_PE) implică parcurgerea etapelor detaliate în cele ce urmează.

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fișierul cu rezultatele unei măsurări complete (cum ar fi cel din Anexa 4) și se citesc valorile tuturor frecvențelor și parametrilor  $S_{11}$  asociați.
- <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale.
- <u>Etapa 3</u>. Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale dimensionale în frecvențe normate și se determină amplitudinile  $A_{11}$  folosind parametrii  $S_{11}$  (pentru fiecare frecvență).
- <u>Etapa 4</u>. Se selectează *ninit*=5% din totalul frecvențelor prezentate în Anexa 4, uniform distribuite în domeniul frecvențelor normate după care se extrag din Anexa 4 Bis amplitudinile corespunzătoare acestora. Punctele rezultate în planul xOy (x corespunde frecvențelor normate şi y amplitudinilor) constituie puncte inițiale pentru algoritm.
- <u>Etapa 5</u>. Se calculează coeficienții funcției polinomiale *f* de grad *ninit* 1 determinată de cele *ninit* puncte (respectiv 5%). Folosind funcția *f* obținută, se calculează valoarea amplitudinii pentru fiecare frecvență *i* din Anexa 4 (*i* este o variabilă de tip întreg cu rol de contor care ia valori întregi între 3 și *ninit*), rezultând *valori aproximate* (în raport cu cele reale).
- <u>Etapa 6</u>. În lista valorilor aproximate pentru amplitudini se identifică valorile extreme ce respectă una dintre condițiile:

a) valoare\_aproximat $\check{a}_{i-2} < valoare_aproximat\check{a}_{i-1} > valoare_aproximat\check{a}_i$ , unde valoare\_aproximat $\check{a}_{i-1}$  reprezintă punct de maxim;

b)  $valoare\_aproximat\breve{a}_{i-2} > valoare\_aproximat\breve{a}_{i-1} < valoare\_aproximat\breve{a}_i$ , unde  $valoare\_aproximat\breve{a}_{i-1}$  reprezintă punct de minim,

unde variabila *i* are semnificația evidențiată mai sus.

<u>Etapa 7</u>. Pentru valorile extreme calculate se identifică frecvențele normate corespunzătoare (respectiv f<sub>i\_normat</sub> = 0.6422 din figura 3.21), împreună cu amplitudinile acestora (respectiv A<sub>11\_i</sub> = 0.1668) din Anexa 4 Bis, reprezentând valorile reale (măsurate).
• <u>Etapa 8</u>. Pentru fiecare frecvență din Anexa 4 Bis se calculează (utilizând relația (3.30)) eroarea *er\_A*. Dacă această eroare este mai mare decât valoarea impusă pentru *eps*, atunci algoritmul se reia de la etapa 5, adăugând de fiecare dată noile frecvențe normate corespunzătoare punctelor de maxim și minim în lista frecvențelor normate evaluate de către ASF\_PE. Algoritmul își încheie execuția atunci când nicio diferență dinte valorile aproximate și cele măsurate nu depășește valoarea stabilită pentru *eps*.

În figura 3.22 este prezentată abordarea de tip intrare – ieșire a algoritmului ASF\_PE de care s-a ținut cont la realizarea schemei logice asociate acestui algoritm și ilustrată în figura 3.23.



Fig. 3.22 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF\_PE.

Ca și în cazul algoritmilor precedenți, variabila *GLOBAL\_freq\_list* reprezintă un vector în care se înscriu valorile frecvențelor inițiale care constituie o mărime de intrare în abordarea sistemică din figura 3.22. Variabila de ieșire *GLOBAL\_current\_freq\_list* reprezintă un vector care conține un număr redus de frecvențe din vectorul frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list* (identificat în figura 3.22 ca variabilă de ieșire).

În schema logică din figura 3.23 se observă că după extragerea frecvențelor și a parametrilor *S*, se calculează factorul de normare *fact*, care este aplicat întregului vector de frecvențe *GLOBAL\_freq\_list* (din Anexa 4). În continuare, se calculează pentru fiecare frecvență amplitudinea  $A_{11}$  pe baza parametrului  $S_{11}$ .

În etapa următoare se aleg *ninit*=5% frecvențe din vectorul *GLOBAL\_freq\_list* uniform distribuite în domeniul 4.7 - 5.5 GHz. Valorile amplitudinilor corespunzătoare acestor frecvențe se înscriu în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

În cadrul algoritmului ASF\_PE, variabila logică progress se cuantifică astfel:

- a) progress = false: semnifică faptul că diferențele dintre valoarea aproximată pentru amplitudini şi valoarea măsurată (din Anexa 4) corespunzătoare punctelor de extrem au valori mai mici decât *eps*;
- b) *progress = true*: semnifică faptul că există puncte de extrem pentru care diferența între valoarea aproximată și valoarea măsurată are o valoare mai mare decât *eps*.

În algoritm, variabila progress intervine după cum urmează:

- a) dacă *progress = false*, algoritmul se oprește;
- b) dacă *progress = true*, algoritmul continuă cu o nouă iterație.

Cât timp variabila *progress* are valoarea *true*, se parcurge secvența care conține pașii descriși în continuare.

- **P1.** Se determină funcția polinomială f determinată de punctele ( $GLOBAL\_current\_freq\_list$ ,  $GLOBAL\_current\_meas\_list$ ). Ulterior, funcția polinomială f este evaluată pentru toate frecvențele normate  $GLOBAL\_freq\_list$ . Pentru implementarea acestui pas se utilizează funcția Matlab<sup>®</sup> *interp1* care aproximează funcția polinomială f în cele  $GLOBAL\_freq\_list$  frecvențe fără determinarea analitică a acesteia.
- **P2.** Folosind valorile funcției polinomiale *f* pentru vectorul frecvențelor normate *GLOBAL\_freq\_list* se identifică indicii corespunzători punctelor de extrem, astfel:
  - P2.1: dacă ((aprox(i 2) > aprox (i -1)) și (aprox(i 1) < aprox(i))) atunci *aprox (i -1)* este identificat ca *punct de minim*;
  - P2.2: dacă ((aprox(i 2) < aprox (i -1)) și (aprox(i 1) > aprox(i))) atunci *aprox (i -1)* este identificat ca *punct de maxim*.
- **P3.** Se identifică frecvențele  $f_{normat_i-1}$  corespunzătoare punctelor de minim și maxim.
- **P4.** Noile valori  $f_{normat\_i-1}$  ale frecvențelor adimensionale se includ în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, la care se adaugă valorile calculate ale amplitudinii  $A_{11}$  corespunzătoare în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.
- **P5.** Pentru fiecare punct de minim sau maxim se calculează cu relația (3.30) eroarea *er* astfel:  $er = |aprox(puncte\_extreme) - GLOBAL\_meas\_list(puncte\_extreme)|$ 
  - P5.1: dacă er≤eps, atunci progress = true şi algoritmul îşi reia execuția ciclică de la pasul P2;
  - P5.2: dacă *er>eps*, atunci *progress = false*, iar algoritmul își încheie execuția.

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine *false*, valorile vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a se reveni la frecvențele inițiale dimensionale.

Pe baza schemei logice din figura 3.23, aferente ASF\_PE, a fost elaborat în mediul Matlab<sup>®</sup> programul MAT\_ASF\_PE al cărui cod este prezentat în Anexa 7 la prezenta teză de doctorat.



Fig. 3.23 – Schema logică aferentă algoritmului ASF\_PE.

# 3.3.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF\_PE

Performanțele algoritmului ASF\_PE au fost validate prin efectuarea a două familii de teste diferențiate prin precizia *eps* impusă. Consecința modificării preciziei *eps* se reflectă în numărul necesar de puncte a fi evaluate de către ASF\_PE, evidențiate în tabelul 3.15.

*Tabelul 3.15 – Numărul de puncte necesar a fi evaluate de către ASF\_PE pentru cele două familii de teste.* 

Nr. test	eps	Nr. puncte (ninit)
T <sub>1</sub>	0.1	26
T <sub>2</sub>	0.01	37

## • Rezultatele testului T<sub>1</sub>

Pentru testul T<sub>1</sub> a fost impus  $eps_1 = 0.1$  și a rezultat un număr de puncte  $ninit_{T_1} = 26$ . Utilizând programul *MAT\_PAS\_PE* s-a obținut dependența  $A_{11}$  - *frecvență* pentru filtrul cu domeniul 4.7 – 5.5 GHz, ilustrată în figurile 3.24 și 3.25 după cum urmează:

- figura 3.24a conține caracteristica amplitudine frecvență pentru cele 321 de puncte din Anexa 4;
- figura 3.24b conține caracteristica amplitudine frecvență pentru rezultatele obținute prin execuția algoritmului ASF\_PE (pentru 26 de puncte) considerând  $eps_1 = 0.1$ ;
- figura 3.25 ilustrează o comparație între cele două grafice prezentate în figurile 3.24a și 3.24b.

Figura 3.25 a rezultat prin suprapunerea graficului inițial care utilizează *321* de puncte (culoare albastră) și graficul ASF\_PE care utilizează eps = 0.1 (26 de puncte - culoare roșie). Din analiza acestei figuri rezultă că în zonele marcate prin lentilele 1, 2 și 3, graficul care conține cele 26 de puncte interpolate nu se suprapune cu graficul asociat caracteristicii care conține cele *321* de puncte.

O primă concluzie care se desprinde din analiza rezultatelor testului  $T_1$  este aceea că modalitatea de alegere a preciziei eps este foarte importantă, deoarece există situații când algoritmul ASF\_PE nu asigură consistența informațională.



Fig. 3.24 – Reprezentarea caracteristicilor A<sub>11</sub> – frecvență rezultate din testul T<sub>1</sub> asociat ASF\_PE:
a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4);
b) pentru cele 26 de puncte obținute în urma execuției ASF\_PE cu eps = 0.1.



Fig. 3.25 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul  $T_1$  aferent ASF\_PE: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 26 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_PE.

Analog abordării din subcapitolul 3.1.4, pentru evaluarea preciziei ASF\_PE se calculează cu relația (3.15), frecvența de apariție pentru evaluarea erorii relative pe intervale  $(e_{r\_int})$  exprimată în [%] și reprezentată în figura 3.26. Din această figură reiese că cea mai mare parte a erorilor este concentrată în intervalul 0 – 10% (respectiv 276 de puncte reprezentând 85.98% din cele 321 de puncte inițiale), iar pentru 45 de puncte (reprezentând 14% din cele 321) erorile sunt mai mari de 10%.



Fig. 3.26 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului  $T_1$  aplicat ASF\_PE pentru 26 de frecvențe.

Valoarea erorii relative globale,  $e_{r\_glob}$ , este  $e_{r\_glob\_T1} = 2.48\%$  pentru cele 26 de frecvențe rezultate (care reprezintă 8.1% din totalul frecvențelor). Timpul de execuție aferent acestui test a fost  $t_{ex\_T1} = 0.02$  secunde. În tabelul 3.16 sunt înscrise rezultatele testului T<sub>1</sub> în vederea comparației cu rezultatele testului T<sub>2</sub> care va fi prezentat în continuare.

#### • Rezultatele testului T<sub>2</sub>

Al doilea test a presupus execuția programului MAT\_ASF\_PE pentru  $eps_2 = 0.01$ , rezultând  $ninit_{T_2} = 37$  de frecvențe care reprezintă **11.5%** din numărul total de frecvențe. În cazul acestui test, algoritmul și-a încheiat execuția înainte de atingerea preciziei impuse, deoarece au fost evaluate toate punctele de extrem ale caracteristicii amplitudine – frecvență pentru cele *321* de puncte din Anexa 4.

Din tabelul 3.16, în care sunt înscrise rezultatele testului T<sub>2</sub>, se poate observa că timpul de execuție pentru T<sub>2</sub> a fost  $t_{ex_T2} = 0.03$  secunde, iar pentru eroarea relativă globală a rezultat valoarea  $e_{r_glob_T2} = 0.77\%$ . În figura 3.27 este prezentat graficul datelor inițiale (din Anexa 4) – culoare albastră, suprapus cu numărul redus de 37 de frecvențe (culoare verde), împreună cu rezultatele interpolării celor 37 de frecvențe – culoare roșie. În această figură se poate observa că în cazul testului T<sub>2</sub> apare o distribuție a punctelor diferită de cea aferentă testului T<sub>1</sub>.



Fig. 3.27 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> aferent ASF\_PE: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 37 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_PE.

De asemenea, din figura 3.27 se poate concluziona că prin creșterea preciziei (*eps*) se obține o eroare globală relativă mai mică decât în cazul testului  $T_1$ . În plus, testul  $T_2$  indică o îmbunătățire a rezultatelor obținute cu algoritmul APE\_PE atât din punct de vedere al erorii globale relative, cât și din punct de vedere al timpului de execuție.

Din tabelul 3.16 care prezintă sintetic rezultatele celor două teste  $T_1$  și  $T_2$ , se constată că în cazul algoritmul ASF\_PE, creșterea preciziei conduce la identificarea tuturor punctelor de extrem și în consecință a tuturor spike-urilor.

Rezultatele testelor  $T_1$  și  $T_2$  au demonstrat că în cazul algoritmului ASF\_PE creșterea numărului de eșantioane se reflectă în scăderea erorii relative globale, scădere concretizată în reprezentări grafice care **surprind** toate spike-urile.

Tabelul 3.16 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_PE pentru un număr diferit de frecvențe evaluate.

Test	Pondere frecvențe evaluate din totalul de 321 [%]	Eroare relativă globală [%]	Timp de execuție [s]
$T_1$	8.1	2.48	0.02
$T_2$	11.5	0.77	0.03

# **3.4.** Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte

Al patrulea algoritm propus de către autoare (abreviat ASF\_DMAP) se bazează pe evaluarea diferențelor maxime între aproximări polinomiale și aproximări liniare.

Ca și algoritmii precedenți și acesta își propune ca obiective:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări și implicit scurtarea timpului de obținere a parametrilor S pentru numărul redus de frecvențe rezultat;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior).

# 3.4.1. Ilustrarea principiului aferent ASF\_ DMAP

Pentru ilustrarea principiului algoritmului propus ASF\_DMAP se apelează tot la un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz pentru care s-au utilizat 321 de frecvențe (incluse în Anexa 4) uniform distribuite în acest domeniu.

Principial, ASF\_ DMAP se bazează pe identificarea diferențelor maxime dintre valorile pentru 321 de frecvențe a două categorii de funcții și anume:

- o funcție polinomială de ordin *k* - *1*, care conține *k* frecvențe dintre cele 321;

- funcții liniare determinate pentru fiecare două frecvențe consecutive.

O justificare a acestei abordări provine din faptul că în zonele cu *spike-uri*, granularitatea punctelor trebuie să fie atât de mare (respectiv punctele să fie atât de apropiate) încât zona respectivă să poată fi aproximată liniar pe porțiuni, după cum se exemplifică în figura 3.28b care conține imaginea mărită a lentilei 1 din figura 3.28a.



Fig. 3.28 – Reprezentarea caracteristicii  $A_{11}$  – frecvență a filtrului utilizat în cadrul testelor asociate celor cinci algoritmi propuși:

a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4);

b) exemplificarea aproximării prin funcții liniare pe porțiuni a curbei din Lentila 1 prin intermediul unei granularități mari (concentrație mare de puncte).

În imaginea mărită, se poate observa o aglomerare de puncte între care au fost trasate funcții liniare g. Rezultatul este că totalitatea acestor aproximări g, permite identificarea *spike-ului* din lentila 1.

Așa cum a fost menționat și în subcapitolul 3.3.1 (unde a fost prezentat algoritmul bazat pe distanța euclidiană), analizele experimentale efectuate de către autoare pentru dispozitive diferite și pentru o largă gamă de frecvențe, au condus la ideea alegerii inițiale a 5% din numărul total de frecvențe (respectiv 16 frecvențe din totalul de 321). Pentru ilustrarea principiului ASF\_DMAP, dar și pentru a putea realiza o comparație cu performanțele algoritmului prezentat în subcapitolul anterior (respectiv, ASF\_PE) s-au utilizat inițial aceleași patru frecvențe uniform distribuite după cum rezultă din tabelul 3.17.

Tabelul 3.17 - Valorile din cadrul ASF\_ DMAP pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențelenormate și valorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	A <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.9675	0.6209	0.187144	0.174148	0.2556	<b>B</b> (0.6209, 0.2556)
5.2350	0.6544	0.128186	-0.09490	0.1595	<b>C</b> (0.6544, 0.1595)
5.5000	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>D</b> (0.6875, 0.9509)

Și în cazul algoritmului ASF\_DMAP se realizează normarea tuturor frecvențelor pentru obținerea valorilor adimensionale folosind factorul de normare descris anterior.

Apoi, se determină funcția polinomială de gradul trei, obținută pe baza punctelor A, B, C și D din tabelul 3.17 folosind modalitatea de calcul detaliată în subcapitolul 3.3.1. Pentru datele din tabelul 3.17 s-a obținut funcția:

$$f(x) = 1239.8x^3 - 2031.4x^2 + 1075.1x - 180.92.$$
(3.31)

unde:

funcția f este asociată amplitudinii;

variabila x este asociată frecvenței.

La pasul următor se trasează graficul funcției f ilustrat în figura 3.29 (culoare roșie) pe care sunt indicate punctele A, B, C și D prin marcaje circulare albastre.

Ulterior se determină câte o funcție liniară pentru fiecare două puncte consecutive considerate la determinarea funcției *f*. Pentru cele patru puncte considerate, funcțiile liniare sunt:  $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$  și  $g_3(x)$  (culoare albastră – figura 3.29).

În continuare, se identifică diferențele maxime pe intervale între funcția f și funcția  $g_i$  aferentă fiecărui interval, fiecărei diferențe maxime identificate pe intervale corespunzându-i

o anumită frecvență. Pentru exemplul considerat, în figura 3.29 sunt identificate trei diferențe maxime (notate  $d_1, d_2, d_3$  – culoare verde), cărora le corespund în ordine frecvențele normate: 0.6050, 0.6381 și 0.6713, pentru care se calculează amplitudinile.



Fig. 3.29 – Ilustrarea principiului ASF\_DMAP pentru aproximarea polinomială de grad 3.

În figura 3.29 se poate observa că pe intervalul dintre punctele A și B există o diferență semnificativă între amplitudinile asociate funcției polinomiale f(x) (culoare roșie pentru grafic), respectiv funcției liniare  $g_1(x)$  (culoare albastră pentru grafic). Mărimea acestei diferențe conduce la ipoteza că în această zonă pot exista și alte funcții care să aproximeze caracteristica amplitudine – frecvență. Această funcție se poate obține prin introducerea unui nou punct între punctele A și B, punct notat cu E în figura 3.30. Frecvența normată cu valoarea 0.6050 corespunzătoare punctului E a rezultat din grafic, iar în ceea ce privește amplitudinea (cu valoarea 0.9054) corespunzătoare acestei frecvențe a fost preluată din Anexa 4 Bis.

Printr-un raționament similar, pentru intervalele [B, C] și [C, D] se determină punctele F și G corespunzătoare diferențelor maxime  $d_2$  și  $d_3$  ilustrate în figura 3.29. Datele referitoare la cele trei puncte E, F și G nou introduse sunt prezentate în tabelul 3.18.

În cadrul pasului următor se determină funcția polinomială f de gradul 6 al cărei grafic, care este ilustrat în figura 3.30, include punctele A, B, C, D, E, F și G.

f[GHz]	fi_normat	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	A <sub>11</sub>	Notație
4.7000	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
4.84	0.6050	0.816326	0.391691	0.9054	E (0.6050, 0.9054)
4.9675	0.6209	0.187144	0.174148	0.2556	<b>B</b> (0.6209, 0.2556)
5.1050	0.6381	0.019834	0.078458	0.0809	F (0.6381, 0.0809)
5.2350	0.6544	0.128186	-0.09490	0.1595	<b>C</b> (0.6544, 0.1595)
5.3725	0.6713	-0.47932	-0.71907	0.8602	G (0.6713, 0.8602)
5.5000	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>D</b> (0.6875, 0.9509)

Tabelul 3.18 - Adăugarea unui nou set de frecvențe în cadrul ASF\_DMAP.





Din figura 3.30 reiese că pe porțiunea [E, F] nu există diferențe semnificative între funcțiile f(x) și g(x), g(x) reprezentând funcția liniară care conține punctele E și F, aceeași concluzie fiind valabilă și pentru porțiunea [C, G]. Pentru celelalte porțiuni (respectiv [A, E], [B, F], [F, C] și [G, D]) se introduc puncte suplimentare, conform pașilor descriși anterior.

Paşii descrişi mai sus sunt reluați atâta timp cât variabila *progress* are valoare *true*, respectiv până când toate diferențele maxime pe intervale au valori *mai mari* decât o valoare impusă, sau atâta timp cât numărul de puncte evaluate de către ASF\_DMAP este mai mic decât o valoare, de asemenea impusă.

Odată îndeplinită una dintre condiții, se trece de la frecvențele normate adimensionale la frecvențe dimensionale prin aplicarea factorului de normare *fact*, după cum s-a arătat în subcapitolul 3.1.1.

În ultima etapă, se interpolează prin metoda spline cubică valorile calculate, vederea obținerii unei noi caracteristici *amplitudine – frecvență* bazată pe numărul redus de frecvențe selectate cu ajutorul ASF\_DMAP.

# 3.4.2. Etapele aplicării algoritmului ASF\_DMAP

Conform celor evidențiate în subcapitolul precedent, *aplicarea algoritmului de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive* (ASF\_DMAP) implică parcurgerea etapelor ilustrate în schema logică din figura 3.32 și detaliate în cele ce urmează.

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fișierul specific unui set de măsurări clasice și se citesc valorile tuturor frecvențelor și parametrilor  $S_{11}$  corespunzători (Anexa 4).
- <u>Etapa 2.</u> Se calculează factorul de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale.
- <u>Etapa 3</u>. Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale dimensionale în frecvențe normate adimensionale și se determină amplitudinile A<sub>11</sub> pe baza parametrilor S<sub>11</sub> (pentru fiecare frecvență).
- <u>Etapa 4</u>. Se aleg *ninit=5%* din frecvențele preluate care sunt selectate astfel încât să fie uniform distribuite în domeniul frecvențelor normate. Dacă *ninit* nu reprezintă întreg, atunci se preiau [*ninit*] + 1 frecvențe. Ulterior, se extrag din fișier (Anexa 4 Bis) amplitudinile corespunzătoare acestor frecvențe. Punctele rezultate în planul xOy (x corespunde frecvențelor normate și y amplitudinilor) reprezintă puncte inițiale pentru algoritm.
- <u>Etapa 5</u>. Se determină funcția polinomială f(x) de grad *ninit* 1 al cărei grafic să treacă prin cele *ninit* puncte selectate.
- <u>Etapa 6.</u> Se determină funcțiile liniare g<sub>k</sub>(x) ale căror grafice să treacă prin câte două puncte consecutive (k şi k+1) din planul xOy.
- <u>Etapa 7</u>. Se evaluează, în vectorul diferență, diferența maximă  $|f g_k|$  pe fiecare interval situat între două puncte consecutive (vectorul diferență este format din diferențele dintre funcția *f* și fiecare dintre funcțiile *g<sub>k</sub>*).
- <u>Etapa 8.</u> Algoritmul își încheie execuția dacă este îndeplinită una din următoarele condiții:
  - a) toate diferențele maxime au o valoarea mai mică decât o valoare (*dmax*) impusă;

b) numărul total de puncte este mai mare decât o valoare (nmax) prestabilită.

Conform etapizării descrise mai sus, se identifică intrările și ieșirile ASF\_DMAP reprezentate în abordarea de tip intrare - ieșire din figura 3.31.



## *Fig. 3.31 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF\_DMAP.*

Potrivit schemei logice ilustrate în figura 3.32, variabila *GLOBAL\_freq\_list* este un vector căruia i se atribuie frecvențele inițiale care constituie o mărime de intrare în abordarea sistemică din figura 3.31. Variabila de ieșire *GLOBAL\_current\_freq\_list* reprezintă un vector care conține un număr redus de frecvențe din vectorul frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list* (identificat în figura 3.31 ca variabilă de ieșire).

Din schema logică ilustrată în figura 3.32 rezultă că după extragerea frecvențelor și a parametrilor *S*, se calculează factorul de normare *fact*, care este aplicat întregului vector de frecvențe *GLOBAL\_freq\_list* (din Anexa 4). În continuare, se realizează calculul pentru fiecare frecvență a amplitudinii  $A_{11}$  pe baza parametrilor  $S_{11}$  corespunzători.

În etapa următoare se aleg *ninit=5%* frecvențe din vectorul *GLOBAL\_freq\_list* uniform distribuite în domeniul de lucru. Amplitudinile corespunzătoare celor două frecvențe se depun în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

În cadrul algoritmului ASF\_DMAP, se cuantifică valorile pentru variabila logică *progress* astfel:

*a)* progress = false:

- semnifică fie faptul că toate diferențele maxime pe intervale între valorile funcției polinomiale și valorile funcției liniare au valori mai mici decât *dmax* (situație în care algoritmul se oprește);
- sau că numărul total de puncte din *GLOBAL\_current\_freq\_list* este mai mare decât *nmax* (situație în care, de asemenea, algoritmul se oprește);

*b)* progress = true:

semnifică faptul că există diferențe maxime pe intervale (între valorile funcției polinomiale și valorile funcțiilor liniare) ale căror valori sunt mai mari decât *dmax* (situație în care algoritmul continuă cu o nouă iterație).

Cât timp variabila *progress* are valoarea *true*, se execută secvența care include pașii P1 - P5 detaliați în cele ce urmează.

> **P1.** Se determină în format tabelar funcția polinomială f(x) care conține punctele (*GLOBAL\_current\_freq\_list*, *GLOBAL\_current\_meas\_list*). Ulterior, funcția f(x) este evaluată pentru toate frecvențele normate *GLOBAL\_freq\_list*. Pentru implementarea acestui pas se utilizează funcția Matlab<sup>®</sup> *interp1* care aproximează funcția f(x) în cele *GLOBAL\_freq\_list* frecvențe fără determinarea analitică a acesteia.

> **P2.** Se determină funcțiile  $g_k(x)$  tot în format tabelar utilizând funcția Matlab<sup>®</sup> *interp1* pentru fiecare interval determinat de (*GLOBAL\_current\_freq\_list(k)*, *GLOBAL\_current\_freq\_list(k + 1)*). Fiecare funcție  $g_k(x)$  este evaluată pentru toate frecvențele normate *GLOBAL\_freq\_list*, rezultând vectorul *g*.

**P3.** Se calculează diferențele  $dif_k = f - g_k$ .

**P4.** Se identifică prin căutare diferențele maxime pe fiecare interval  $(GLOBAL\_current\_freq\_list(k), GLOBAL\_current\_freq\_list(k + 1))$  care se înscriu în vectorul *dif\_max*.

**P5.** Se verifică dacă valorile din vectorului *dif\_max* sunt mai mici decât diferența maximă impusă *dmax*:

P5.1. La condiție îndeplinită (respectiv *dif\_max <dmax*), *progress = false*, iar algoritmul își încheie execuția;

P5.2. La condiție neîndeplinită (respectiv  $dif_max \ge dmax$ ) se parcurg pașii următori:

P.5.2.1. Pentru fiecare  $dif_max$  se identifică frecvențele corespunzătoare în  $GLOBAL_freq_list$  și se adaugă în vectorul  $GLOBAL_current_freq_list$ , precum și valorile calculate ale amplitudinii  $A_{11}$  corespunzătoare în  $GLOBAL_current_meas_list$ ;

P.5.2.2. Valoarea numărului de puncte *n* este actualizată cu numărul total de elemente din vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list* (fiecare element corespunzând unei noi frecvențe adăugate).

P.5.2.3. Dacă pentru *n* rezultă o valoare mai mică decât limita maximă admisă *nmax*, atunci:

- a) variabila *progress = true* păstrează valoarea *true* și algoritmul își reia execuția de la pasul P2.
- b) în caz contrar, progress = false şi algoritmul îşi încheie execuția.

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine *false*, valorile vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a reveni la frecvențele inițiale dimensionale.

Pe baza schemei logice aferente ASF\_DMAP și ilustrată în figura 3.32, a fost elaborat în mediul Matlab<sup>®</sup> programul *MAT\_ASF\_DMAP* al cărui cod este prezentat în Anexa 8 a acestei teze de doctorat.



Fig. 3.32 – Schema logică aferentă ASF\_DMAP.

## 3.4.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF\_DMAP

Performanțele algoritmului ASF\_DMAP au fost validate prin efectuarea a două familii de teste diferențiate prin precizia *dmax*. Consecința modificării preciziei *dmax* se reflectă în modificarea numărului de puncte (*nmax*) evaluate de ASF\_DMAP prezentate în tabelul 3.19.

Tabelul 3.19 – Numărul de puncte evaluate de către ASF\_DMAP pentru cele două familii de teste  $T_1$  și  $T_2$ .

Nr. test	dmax	nmax
<b>T</b> <sub>1</sub>	0.01	25
T <sub>2</sub>	0.01	40

#### • Rezultatele testului T<sub>1</sub>

Pentru validarea rezultatelor obținute cu ASF\_DMAP prin simulare utilizând codul  $MAT\_ASF\_DMAP$  (amintit anterior), rezultă dependența *amplitudine - frecvență* din figura 3.33 pentru filtrul cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz. Această figură ilustrează suprapunerea graficului inițial care utilizează 321 de puncte (culoare albastră) și graficul obținut ca urmare a execuției ASF\_DMAP pentru *nmax\_T1=25* de puncte (culoare roșie).



Fig. 3.33 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul  $T_1$  aferent ASF\_ DMAP: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 25 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_DMAP.

Pentru testul T<sub>1</sub> (*dmax\_T1*=0.01 și *nmax\_T1*=25), se calculează cu relația (3.15) frecvența de apariție pentru ASF\_DMAP a erorii relative pe intervale ( $e_{r_int}$ ) exprimată în

[%]. Conform reprezentării din figura 3.34, rezultă că cea mai mare parte a erorilor este concentrată în intervalul 0 – 10%, adică 229 de puncte, la care se adaugă 22 de puncte (reprezentând 6.8% din cele 321) au erori mai mari de 10%. Valoarea erorii relative globale,  $e_{r\_glob\_T1} = 0.6\%$  pentru cele  $nmax\_T1 = 25$  de frecvențe rezultate (care reprezintă 7.7% din totalul frecvențelor), iar timpul de execuție pentru acest test a fost de  $t_{ex\_T1} = 0.06$  secunde.



*Fig. 3.34 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului T*<sub>1</sub> *aplicat ASF\_DMAP pentru 25 de frecvențe.* 

# • Rezultatele testului T<sub>2</sub>

Al doilea test a presupus aplicarea ASF\_DMAP pentru  $nmax_T2 = 40$  de puncte și  $dmax_T2 = 0.01$ . În urma executării programului  $MAT_ASF_DMAP$  au fost evaluate **12.46%** din numărul total de frecvențe. Pentru testul T<sub>2</sub> timpul de execuție a fost de  $t_{ex_T2} = 0.07$  secunde, iar eroarea relativă globală a fost de  $e_{r_glob_T2} = 0.04\%$ .

Performanțele deosebit de bune ale acestui algoritm sunt vizibile atât prin raportul număr scăzut de puncte utilizate (12.46%) – eroare relativă globală (0.04%), cât și prin rezultatele prezentate în figura 3.35, de unde reiese că toate erorile sunt concentrate în intervalul 0 - 10%.



*Fig.* 3.35 – *Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului T*<sup>1</sup> *aplicat ASF\_DMAP pentru 40 de frecvențe.* 

Pentru a pune în evidență performanțele algoritmului, în figura 3.36a este prezentată caracteristica amplitudine – frecvență pentru cele 321 de puncte, iar în figura 3.36b este ilustrată caracteristica amplitudine – frecvență pentru rezultatele obținute prin aplicarea ASF\_DMAP considerând  $nmax_T1 = 40$  de puncte.

Pentru a realiza o comparație între cele două grafice prezentate în figura 3.36 a fost generat graficul din figura 3.37, reprezentând suprapunerea graficului inițial care utilizează 321 de puncte (culoare albastră) și graficul ASF\_DMAP care utilizează 40 de puncte (culoare roșie). Analizând figura 3.37 se poate observa că cele două grafice se suprapun aproape perfect, ceea ce conduce la erori relative mici, după cum rezultă din figura 3.35. Mai exact, algoritmul ASF\_DMAP reușește să obțină o eroare relativă globală foarte mică (0.04%), utilizând numai 40 de puncte din cele 321.



Fig. 3.36 - Reprezentarea caracteristicilor A<sub>11</sub> – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> asociat ASF\_DMAP:
a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4);
b) pentru cele 40 de puncte obținute în urma execuției ASF\_DMAP.



Fig. 3.37 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> aferent ASF\_DMAP: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 40 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF\_DMAP.

Rezultatele testelor  $T_1$  și  $T_2$  care sunt prezentate în tabelul 3.20 au confirmat faptul că algoritmul ASF\_DMAP asigură în condițiile unei constrângeri rezonabile a numărului de puncte, o eroare globală redusă și identificarea tuturor spike-urilor.

Tabelul 3.20 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_DMAP pentru un număr diferit de frecvențe evaluate.

Test	Pondere frecvențe evaluate din totalul de 321 [%]	Eroare relativă globală [%]	Timp de execuție [s]
$T_1$	7.7	0.6	0.06
$T_2$	12.46	0.04	0.07

În capitolul 4 al tezei de doctorat se prezintă o implementare practică a algoritmului ASF\_DMAP.

#### 3.5. Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe interpolarea rațională îmbunătățită

Al cincilea algoritm propus pentru selecția frecvențelor se bazează pe *interpolarea rațională îmbunătățită* (abreviat ASF\_IRI). Acesta păstrează obiectivele principale ale algoritmilor anteriori, cărora li se adaugă următoarele obiective secundare:

- eliminarea relațiilor recurente (detaliate în subcapitolul 2.5) pentru a micșora timpul de execuție și spațiul de memorie necesar execuției algoritmului;
- utilizarea într-o nouă iterație a valorilor deja calculate în iterațiile anterioare.

#### 3.5.1. Ilustrarea principiului ASF\_ IRI

Ca și pentru algoritmii precedenți, ilustrarea principiului algoritmului ASF\_ IRI se va face pentru un filtru cu banda de frecvențe 4.7 - 5.5 GHz pentru care s-a dispus de 321 de frecvențe uniform distribuite în acest domeniu după cum reiese din Anexa 4.

În subcapitolul 2.5 a fost prezentat algoritmul *Rational fitting* și a fost identificat un un dezavantaj major al acestuia reprezentat de necesarul *crescut de memorie primară ocupată de situațiile unui număr ridicat de iterații*. În plus, la adăugarea unei noi frecvențe, arborele în care se descompune funcția de interpolare  $R_k$  necesită un efort de calcul considerabil, ceea ce conduce de cele mai multe ori la un timp de calcul mai mare decât cel al unui algoritm de măsură preimplementat pe un VNA. În cele ce urmează, se prezintă o propunere de eliminare a relațiilor recurente.

Conform referinței [B28], funcția de interpolarea rațională de ordin k se determină conform relației:

$$R_k(f) = \frac{a_0 + a_1 f + \dots + a_k f^k}{b_0 + b_1 f + \dots + b_k f^k}, \quad k = \overline{1, M}$$
(3.32)

unde:

*M* este numărul redus de frecvențe

Deoarece este dificil de operat cu rapoarte de funcții polinomiale, se propune utilizarea unor funcții recurențiale. În lucrarea [B27] sunt prezentate relațiile de calcul pentru obținerea unei funcții raționale de ordin k de forma:

$$R_k(f) = \frac{N_k(f)}{D_k(f)} \tag{3.33}$$

 $\operatorname{cu} k = \overline{1, M}$ 

unde:

*M* este numărul redus de frecvențe;

f – oricare frecvență dintre cele 321 de frecvențe din Anexa 4.

În aceeași lucrare se presupune următoarea formă pentru  $N_k(f)$ :

$$N_{k}(f) = \varphi(f_{k}, f_{k-1}, \dots, f_{1})N_{k-1} + (f - f_{k-1})N_{k-2};$$

$$D_{k}(f) = \varphi(f_{k}, f_{k-1}, \dots, f_{1})D_{k-1} + (f - f_{k-1})D_{k-2};$$
(3.34)

unde:

*k* este numărul noii frecvențe adăugate, cu  $k \ge 3$ ;

f – păstrează semnificația din relațiile (3.33)

Pentru a determina funcția  $\varphi$  din relația (3.34) se introduce variabila *i* prin intermediul căreia se verifică îndeplinirea condiției de oprire a algoritmului.

Se consideră că i 
$$\in \{k - 1, k - 2, \dots 1\}$$
 pentru  $k \ge 2$ , iar (3.35)

$$\varphi(f_k, f_i, \dots, f_1) = \begin{cases} \frac{f_k - f_i}{\varphi(f_k, f_{i-1}, \dots, f_1) - \varphi(f_i, f_{i-1}, \dots, f_1)}, pentru \ i \ge 2\\ \frac{f_k - f_1}{A_{11}(f_k) - A_{11}(f_1)}, pentru \ i = 1 \end{cases}$$

În relația (3.35),  $\varphi(f_i, f_{i-1}, ..., f_1)$  este cunoscut din etapa k - 1, iar pentru k = 1 și k = 2, funcțiile  $R_k$  sunt:

$$k = 1$$

$$R_{1}(f) = \frac{N_{1}(f)}{D_{1}(f)};$$

$$N_{1}(f) = A_{11}(f_{1});$$

$$D_{1}(f) = 1;$$

$$k = 2$$

$$R_{2}(f) = \frac{N_{2}(f)}{D_{2}(f)};$$

$$N_{2}(f) = \varphi(f_{2}, f_{1})N_{1} + (f - f_{1});$$

$$D_{2}(f) = \varphi(f_{2}, f_{1});$$

În relațiile (3.34) se poate observa că pe lângă calculul recurent al numărătorului  $N_k$  și numitorului  $D_k$  mai există coeficientul  $\varphi$  pentru care calculul se bazează de asemenea pe recurența din relația (3.35).

Pentru exemplificare, se utilizează relațiile de calcul anterioare pentru valorile din tabelul 3.21.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	Im(S <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
5.1	0.6375	0.020177	0.061667	0.0649	<b>B</b> (0.6375, 0.0649)
5.5	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>C</b> (0.6875, 0.9509)

Tabelul 3.21 - Valorile din cadrul ASF\_IRI pentru cele trei frecvențe inițiale, frecvențele normate și<br/>valorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

În lucrarea de la referința [B76], autoarea prezentei teze de doctorat prezintă aplicarea relației (3.35) pentru k = 3, respectiv:

$$\varphi(f_3, f_2, f_1) = \frac{f_3 - f_2}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$
(3.36)

În continuare, se aplică din nou relația (3.35) până când se obține o funcție  $\varphi$  cu numai doi parametri, respectiv:

$$\varphi(f_3, f_1) = \frac{f_3 - f_1}{A_{11}(f_3) - A_{11}(f_1)}$$
(3.37)

$$\varphi(f_2, f_1) = \frac{f_2 - f_1}{A_{11}(f_2) - A_{11}(f_1)}$$
(3.38)

În figura 3.38 este ilustrat arborele asociat calculului funcției  $\varphi$ , când *k*=3, funcțiile  $\varphi$  fiind evaluate cu relația (3.35).



*Fig. 3.38 - Arborele asociat al funcției*  $\varphi$  *pentru* k = 3 *în cadrul ASF\_IRI.* 

În continuare se prezintă un exemplu de interpolare rațională pentru obținerea funcției  $R_3(f)$ , unde k=3:

$$R_3(f) = \frac{N_3}{D_3} \tag{3.39}$$

$$i = 1 R_1(f) = \frac{N_1}{D_1}; (3.40)$$

$$N_1(f) = A_{11}(f_1) = 0.9728;$$

$$D_1 = 1;$$

$$i = 2 R_2(f) = \frac{N_2}{D_2}; (3.41)$$

$$N_2(f) = \varphi(f_2, f_1)N_1 + (f - f_1);$$

$$D_2 = \varphi(f_2, f_1);$$

$$\varphi(f_2, f_1) = \frac{f_2 - f_1}{A_{11}(f_2) - A_{11}(f_1)} = \frac{0.6875 - 0.5875}{0.9509 - 0.9728} = -4.5662$$

$$\Rightarrow \begin{cases} N_2 = (-4.5662 \cdot 0.9728) + (f - 0.5875) \\ D_2 = -4.5662 \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_2(f) = \frac{-4.4420 + (f - 0.5875)}{-4.5662}$$

unde f primește toate valorile frecvențelor normate din Anexa 4

$$i = 3 N_3(f) = \varphi(f_3, f_2, f_1)N_2 + (f - f_2)N_1; (3.42) D_3(f) = \varphi(f_3, f_2, f_1)D_2 + (f - f_2)D_1;$$

$$\begin{split} \varphi(f_3, f_2, f_1) &= \frac{f_3 - f_2}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)} = \tag{3.43} \\ &= \frac{0.6375 - 0.6875}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)} = \frac{-0.05}{\varphi(f_3, f_1) + 4.5662} \\ \varphi(f_3, f_1) &= \frac{f_3 - f_1}{A_{11}(f_3) - A_{11}(f_1)} = \frac{0.6375 - 0.5875}{0.0649 - 0.9728} = -0.0551 \\ &\Rightarrow \varphi(f_3, f_2, f_1) = \frac{-0.05}{-0.0551 + 4.5662} = -0.0111 \\ &\Rightarrow R_3(f) = \frac{-0.0111N_2 + (f - f_2)N_1}{-0.0111D_2 + (f - f_2)D_1} \end{split}$$

În figura 3.39 cu marcaj roșu este reprezentată funcția  $R_3$  și cu marcaj albastru funcția  $R_2$ , iar punctul (0.6369, 36.65) este asociat diferenței maxime dintre  $R_3$  și  $R_2$ .



Fig. 3.39 – Identificarea unui nou punct de frecvență prin calculul valorii  $max(R_3(f) - R_2(f))$  în cadrul ASF\_IRI.

Pentru noua frecvență normată  $f_4 = 0.6369$  din Anexa 4 se calculează valoarea corespunzătoare amplitudinii  $A_{11}$  prin intermediul parametrilor  $S_{11}$ . Algoritmul este reluat pentru cele trei frecvențe inițiale cărora li se adaugă noua frecvență identificată (punctul din plan fiind notat cu D), potrivit datelor din tabelul 3.22.

Tabelul 3.22 - Valorile din cadrul ASF\_ IRI pentru cele patru frecvențe inițiale, frecvențele normate<br/>și valorile  $A_{11}$  corespunzătoare.

f[GHz]	f <sub>i_normat</sub>	<b>Re</b> ( <i>S</i> <sub>11</sub> )	<b>Im</b> ( <b>S</b> <sub>11</sub> )	<i>A</i> <sub>11</sub>	Notație
4.7	0.5875	0.461122	0.856565	0.9728	<b>A</b> (0.5875, 0.9728)
5.0950	0.6369	0.023767	0.044456	0.0504	<b>D</b> (0.6369, 0.0504)
5.1	0.6375	0.020177	0.061667	0.0649	<b>B</b> (0.6375, 0.0649)
5.5	0.6875	-0.95079	0.015957	0.9509	<b>C</b> (0.6875, 0.9509)

La pasul următor sunt reluate calculele, apelând tot la relația (3.36) pentru k = 4, funcția *f* căpătând forma:

$$\varphi(f_4, f_3, f_2, f_1) = \frac{f_4 - f_3}{\varphi(f_4, f_2, f_1) - \varphi(f_3, f_2, f_1)}$$
(3.45)

În continuare, se aplică din nou relațiile (3.34) și (3.35) până când se obține funcție  $\varphi$  cu numai doi parametri, respectiv:

$$\varphi(f_4, f_2, f_1) = \frac{f_4 - f_2}{\varphi(f_4, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$
(3.46)

$$\varphi(f_3, f_2, f_1) = \frac{f_3 - f_2}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$
(3.47)

$$\varphi(f_4, f_1) = \frac{f_4 - f_1}{A_{11}(f_4) - A_{11}(f_1)}$$
(3.48)

$$\varphi(f_3, f_1) = \frac{f_3 - f_1}{A_{11}(f_3) - A_{11}(f_1)}$$
(3.49)

$$\varphi(f_2, f_1) = \frac{f_2 - f_1}{A_{11}(f_2) - A_{11}(f_1)}$$
(3.50)





*Fig.* 3.40 – *Arborele asociat funcției*  $\varphi$  *pentru* k = 4 *în cadrul ASF\_IRI.* 

Din analiza arborilor prezentați în figurile 3.38 și 3.40 se desprind următoarele concluzii:

a) întotdeauna pentru subarborele din partea dreaptă a arborelui funcția  $\varphi$  este cunoscută dintr-un pas anterior (de exemplu, în figura 3.40 valoarea funcției  $\varphi(f_3, f_2, f_1)$  a fost calculată în pasul anterior reprezentat grafic în figura 3.38).

b) în general, pentru k = N, adâncimea arborelui, respectiv numărul de niveluri este N - 1(de exemplu, pentru k = 3, adâncimea arborelui a fost 2, iar pentru k = 4, adâncimea arborelui a fost 3).

Chiar cu îmbunătățirile aduse (respectiv explicitarea funcției  $\phi$ ), algoritmul prezintă în continuare o serie de dezavantaje între care:

 a) timpul de execuție este foarte mare din cauza necesității de parcurgere a arborelui în ambele sensuri;

b) creșterea gradului k al funcției raționale de interpolare R determină o creștere exponențială a timpului de execuție deoarece în fiecare etapă se calculează  $2^{k-1}$  elemente (corespunzând nodurilor în arborele asociat);

c) recursivitatea blochează zona de memorie primară pentru un număr mare de puncte<sup>19</sup>.

d) algoritmul nu oferă întotdeauna un rezultat (respectiv nu are întotdeauna o soluție) deoarece valoarea unui element al matricei  $D_k(f)$  poate fi zero, ceea ce va conduce la un  $R_k(f) = NaN$  (Not a Number) după cum rezultă din figura 3.41.



Fig. 3.41 – Exemplu de situație când interpolarea rațională din cadrul ASF\_IRI nu oferă o soluție.

Pentru îmbunătățirea în continuare a acestui algoritm, se propune o nouă modalitate de calcul a funcției raționale de interpolare prin eliminarea recursivității, ceea ce determină excluderea descompunerii arborelui de recursivitate.

În acest sens, se propune parcurgerea a k - l etape pentru calcularea funcției  $\varphi$ , etape descrise în continuare.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> De obicei, mediul Matlab<sup>®</sup> impune o limită de 500 de iterații, iar mărirea acestei limite nu este recomandată de către Matlab<sup>®</sup>. Din cauza efortului mare de calcul și a blocurilor masive de date care sunt stocate pentru calculul recursivității se impune un număr limită de 200 de eșantioane.

<u>Etapa 1.</u> Se calculează toate funcțiile aferente frunzelor (respectiv nivelului de bază) de forma  $\varphi(f_i, f_1)$ , cu  $i = \overline{2, k}$ ;

<u>Etapa 2.</u> Se introduce o funcție  $F(i,j) = \frac{f_i - f_j}{\varphi(f_i, f_{j-1}) - \varphi(f_j, f_{j-1})}$ , unde  $j = \overline{2, k-1}$  iar  $i = \frac{1}{2, k-1}$ 

 $\overline{j+1,k}$ .

Pentru exemplificarea relațiilor de calcul introduse, se alege k = 4. În prima etapă se calculează funcțiile aferente primului nivel, respectiv:

$$i = 2 \Rightarrow \qquad \varphi(f_2, f_1) = \frac{f_2 - f_1}{A_{11}(f_2) - A_{11}(f_1)}$$

$$i = 3 \Rightarrow \qquad \varphi(f_3, f_1) = \frac{f_3 - f_1}{A_{11}(f_3) - A_{11}(f_1)}$$

$$i = 4 \Rightarrow \qquad \varphi(f_4, f_1) = \frac{f_4 - f_1}{A_{11}(f_4) - A_{11}(f_1)}$$

Ulterior se calculează funcțiile F(i, j) după cum urmează:

**j** = 2

$$i = 3 \Rightarrow F(3, 2) = \frac{f_3 - f_2}{\varphi(f_3, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$
$$i = 4 \Rightarrow F(4, 2) = \frac{f_4 - f_2}{\varphi(f_4, f_1) - \varphi(f_2, f_1)}$$

Deoarece  $i = k = 4 \Rightarrow \mathbf{j} = \mathbf{3}$ 

$$i = 4 \Rightarrow F(4,3) = \frac{f_4 - f_3}{F(f_4, f_2) - F(f_3, f_2)}$$

Deoarece i = k = 4 și  $j = 3 = k - 1 \Rightarrow$  algoritmul se va opri

În figura 3.42 este prezentat schematic reducerea arborelui plecând de la trei funcții  $\varphi$ , corespunzătoare factorului k = 4, până la obținerea unei singure funcții F(4,3).



Fig. 3.42 – Schema redusă a modelului bazat pe interpolarea rațională pentru k = 4 în cadrul  $ASF_IRI$ .

# 3.5.2. Etapele aplicării ASF\_IRI

Conform celor evidențiate în paragraful precedent, aplicarea algoritmului pentru *achiziția parametrilor S utilizând interpolarea rațională îmbunătățită* (abreviat ASF\_IRI) implică parcurgerea etapelor evidențiate în continuare.

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fișierul specific unei măsurări clasice și se citesc valorile corespunzătoare tuturor frecvențelor și parametrilor  $S_{11}$  corespunzători.
- <u>Etapa 2</u>. Se calculează un factor de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale.
- <u>Etapa 3</u>. Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în coordonate carteziene și a parametrilor  $S_{11}$  în amplitudinile  $A_{11}$  corespunzătoare.
- <u>Etapa 4</u>. Se aleg trei puncte corespunzătoare frecvenței minime, maxime și celei identificate la jumătatea intervalului dintre frecvența minimă și maximă.
- <u>Etapa 5</u>. Se calculează funcțiile raționale  $R_1(f)$ ,  $R_2(f)$  și  $R_3(f)$ , folosind relația (3.33) pentru toate cele 321 de frecvențe din Anexa 4.
- <u>Etapa 6</u>. Se calculează diferențele  $|R_2(f) R_3(f)|$  pentru toate cele 321 de frecvențe din Anexa 4 și se selectează diferența maximă.
- <u>Etapa 7</u>. Se identifică frecvența normată corespunzătoare valorii diferenței maxime, evaluate în etapa anterioară.
- <u>Etapa 8.</u> Se preia din Anexa 4 Bis, valoarea amplitudinii  $A_{11}$  corespunzătoare frecvenței de la etapa 7.
- <u>Etapa 9</u>. Se testează îndeplinirea uneia dintre condițiile de oprire:
  - a) dacă k < nmax;

b) dacă  $|R_k(f) - R_{k-1}(f)| < dmax;$ 

unde *nmax* reprezintă un număr maxim de frecvențe impus;

 $R_k(f)$  și  $R_{k-1}(f)$  – funcțiile raționale corespunzătoare pasului curent, respectiv pasului anterior;

dmax – valoarea maximă admisibilă pentru diferența  $|R_k(f) - R_{k-1}(f)|$ .

• <u>Etapa 10</u>. Algoritmul se oprește dacă este îndeplinită oricare dintre condițiile de oprire normală *a*) sau oprire forțată *b*). În caz contrar, algoritmul se reia cu etapa 5.

În afara etapelor evidențiate, construcția schemei logice aferente ASF\_IRI are în vedere și abordarea de tip intrare – ieșire a acestui algoritm ilustrată în figura 3.43.



Fig. 3.43 – Abordarea de tip intrare – ieșire a ASF\_IRI.

Figura 3.44 ilustrează schema logică aferentă algoritmului ASF\_IRI, păstrând identificatorii de variabile de la algoritmii prezentați anterior.

Inițial se aleg cele trei frecvențe din vectorul *GLOBAL\_freq\_list* uniform distribuite în domeniul [frecvență\_minimă, frecvență\_maximă]. Aceste valori se depun în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, iar vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list* va conține valorile corespunzătoare lui *GLOBAL\_current\_freq\_list* din *GLOBAL\_meas\_list*. Variabila *progress* este setată cu valoarea *true*. Secvența se va executa ciclic, până când diferența maximă  $|R_k(f) - R_{k-1}(f)|_{max}$  va fi mai mică decât *eps (oprire normală)* sau până când dimensiunea vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* va fi mai mare decât *nmax (oprire forțată)*, întrucât nu s-a atins precizia impusă.

Cuantificarea uneia dintre condițiile de oprire se face în variabila  $progress \in \{true, false\}$ . Cât timp variabila *progress* are valoarea *true*, se parcurge următoarea secvență:

- se calculează funcțiile  $R_1(f)$  și  $R_2(f)$  cu relația (3.33);
- pentru  $nmax \ge 3$ , se calculează  $R_k(f)$ , unde  $k = \overline{3, nmax}$ ;
- se calculează  $R_k(f) R_{k-1}(f)$  și se identifică valoarea maximă;
- se testează dacă valoarea maximă este mai mică decât valoarea variabilei dmax;
  - la condiție îndeplinită, variabilei *progress* i se atribuie valoarea *false*, urmată de extragerea rezultatelor și oprirea algoritmului;
  - ✤ la neîndeplinirea condiției se execută secvența:
    - se identifică în vectorul frecvențelor GLOBAL\_freq\_list frecvența normată corespunzătoare diferenței maxime;
    - această nouă frecvență este adăugată în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, precum și valoarea amplitudinii *A*<sub>11</sub> corespunzătoare în *GLOBAL\_current\_meas\_list*;

- valoarea variabilei k este incrementată cu o unitate;
- algoritmul își reia execuția ciclică.

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine *false*, valorile din vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a reveni la scara inițială.

Este de menționat faptul că relațiile prezentate în schema logică ilustrată în figura 3.44 corespund codului dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> și inclus în Anexa 9, sub numele MAT\_ASF\_IRI.



Fig. 3.44 – Schema logică aferentă ASF\_IRI.

## 3.5.3. Validarea prin simulare a rezultatelor aplicării algoritmului ASF\_IRI

Validarea performanțelor algoritmului ASF\_IRI s-a realizat prin efectuarea a două familii de teste diferențiate prin numărul impus de puncte (frecvențe), respectiv *nmax*, conform tabelului 3.23.

Tabelul 3.23 – Numărul de puncte pentru cele două familii de teste  $T_1$  și  $T_2$  în cadrul ASF\_IRI.

Nr. test	nmax
$T_1$	50
T <sub>2</sub>	100

## • Rezultatele testului T<sub>1</sub>

Pentru validarea prin simulare a rezultatelor obținute cu ASF\_IRI utilizând aplicația MAT\_ASF\_IRI, se va analiza exemplul propus în subcapitolul 3.1.1 (un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz) prin intermediul dependenței *amplitudine*  $A_{11}$  - *frecvență*.

Figura 3.45 prezintă caracteristicile amplitudine – frecvență pentru cele *321* de puncte (figura 3.45a), respectiv pentru frecvențele selectate cu ASF\_IRI (figura 3.45b).

În ceea ce privește figura 3.46, aceasta ilustrează o comparație între cele două grafice prezentate în figura 3.45. Această figură a rezultat prin suprapunerea graficului inițial care utilizează *321* de puncte (culoare albastră) și graficul ASF\_IRI care utilizează *nmax* = 50 puncte (culoare roșie). Analizând figura 3.46 se poate observa că în zonele marcate cu Lentilele 1 și 2, graficul celor 50 de puncte interpolate nu se suprapune cu graficul celor *321* de puncte inițiale.

Figura 3.47 prezintă frecvența de apariție a erorii relative (care presupune calcularea erorii relative pe intervale,  $e_{r\_int}$ ) în procente. În acest grafic, se poate observa că cea mai mare parte a erorilor este concentrată în intervalul 0 – 10% (respectiv 294 de frecvențe), însă o parte considerabilă a punctelor este dispersată și pe celelalte intervale. Valoarea erorii relative globale,  $e_{r\_glob}$ , este  $e_{r\_glob\_T1} = 1.11\%$  pentru 15.57% frecvențe evaluate de ASF\_IRI din cele 321 de frecvențe inițiale (respectiv,  $\frac{50}{321} \cdot 100$ ). Timpul de execuție al acestui test a fost  $t_{ex\_T1} = 0.60$  secunde. În tabelul 3.24 sunt centralizate aceste rezultate pentru a putea analiza performanțele algoritmului pentru mai multe teste.



Fig. 3.45 – Reprezentarea caracteristicilor A<sub>11</sub> – frecvență rezultate din testul T<sub>1</sub> asociat ASF\_IRI: a) pentru cele 321 de puncte obținute prin măsurare (Anexa 4); b) pentru cele 50 de puncte obținute în urma execuției ASF\_IRI.



Fig. 3.46 – Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul  $T_1$  aferent  $ASF_IRI$ : culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 50 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare  $ASF_IRI$ .



Fig. 3.47 – Graficul frecvenței de apariție a erorii relative asociat testului  $T_1$  aplicat ASF\_IRI pentru 50 de frecvențe.

## • Rezultatele testului T<sub>2</sub>

În acest test s-a utilizat același filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz și datele din Anexa 4, dar de această dată, s-a aplicat ASF\_IRI pentru 100 de frecvențe din cele 321 de frecvențe inițiale (respectiv pentru **31.15%**). Așa cum se prezintă și în tabelul 3.24 se poate
observa că timpul de execuție este  $t_{ex_T2} = 1.95$  secunde, iar eroarea relativă globală este  $e_{r\_glob\_T2} = 0.21\%$ . În figura 3.48 este prezentat graficul suprapus al datelor inițiale (din Anexa 4) – culoare albastră, împreună cu numărul redus de 100 de frecvențe (verde) rezultate în urma aplicării ASF\_IRI – culoare roșie. În figura 3.48 se poate observa că algoritmul ASF\_IRI nu reușește să aproximeze în totalitate reprezentarea datelor inițiale (aspect ilustrat prin intermediul lentilei 1), deși numărul de puncte pentru testul curent a fost dublat.



Fig. 3.48 - Suprapunerea caracteristicilor amplitudine – frecvență rezultate din testul T<sub>2</sub> aferent ASF\_IRI: culoare albastră - pentru 321 de puncte inițiale; culoare roșie - pentru cele 100 de puncte (marcate cu verde) corespunzătoare ASF IRI.

Rezultatele comparative ale celor două teste prezentate în tabelul 3.24 evidențiază faptul că prin dublarea numărului de frecvențe evaluate de către ASF\_IRI, eroarea globală scade cu 81.08% (de la 1.11% la 0.21%), iar timpul de execuție crește cu 225% (de la 0.60 s la 1.95 s).

Tabelul 3.24 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_IRI pentru un număr diferit de frecvențe evaluate.

Test	Pondere frecvențe evaluate din totalul de 321 [%]	Eroare relativă globală [%]	Timp de execuție [s]
$T_1$	15.57	1.11	0.60
$T_2$	31.15	0.21	1.95

Analizând rezultatele furnizate de testele  $T_1$  și  $T_2$  se constată faptul că *o creștere a numărului de eșantioane nu garantează surprinderea în reprezentarea grafică a tuturor spike-urilor*. De asemenea, se observă că eliminarea recurenței nu conduce la timpi de

execuție foarte buni. În plus, se constată că ASF\_IRI introduce erori globale mari ceea ce clasează acest algoritm ca fiind ineficient în raport cu alți algoritmi propuși de către autoare în prezenta teză de doctorat.

#### 3.6. Analiză comparativă a performanțelor algoritmilor propuși

În tabelul 3.25 sunt reamintiți cei cinci algoritmi dezvoltați în cadrul prezentei teze de doctorat.

Tabelul 3.25 – Algoritmi propuși de către autoare pentru îndeplinirea obiectivelor stabilite.

Nr. crt.	Denumire algoritm	Abreviere
1.	Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe distanța euclidiană	ASF_DE
2.	Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil	ASF_PEV
3.	Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem	ASF_PE
4.	Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive	ASF_DMAP
5.	Algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe interpolarea rațională îmbunătățită	ASF_IRI

După cum s-a văzut, obiectivele avute în vedere au fost unice pentru toți algoritmii propuși, și anume:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se realizează măsurări și implicit scurtarea timpului de obținere a parametrilor *S*;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor *spike-urilor* (în sensul în care acestea au fost definite anterior).

Principalul obiectiv, care a constat în reducerea numărului de puncte (frecvențe), poate avea în general ca efect o posibilă scădere a acurateței datelor obținute. Cu toate acestea, autoarea subliniază faptul că o distribuție neuniformă a punctelor, concentrate cu precădere în zonele cu *spike-uri* conduce la o acuratețe apropiată de cea a utilizării tuturor punctelor disponibile.

Analiza comparativă a celor cinci algoritmi are în vedere următorii parametri:

- eroarea relativă globală care cuantifică consistența informațională;
- timpul de execuție care cuantifică performanța dinamică.

Pentru analiza care urmează, se propun următorii indicatori globali care să permită o clasificare unitară a algoritmilor dezvoltați:

- indicatorul procentual de calitate a erorii, în [%];
- indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție, în [s];
- indicatorul mediu ponderat al celor doi indicatori, în [%].
- Indicatorul procentual de calitate a erorii se calculează cu relația:

$$ic_{er} = \frac{e_{r_{glob}\_i}}{e_{r_{glob}\_max}} \cdot 100 \, [\%] \tag{3.51}$$

unde:

*icer* este indicatorul procentual de calitate a erorii, în [%];

 $e_{r_{alob}i}$  – eroarea relativă globală pentru algoritmul *i*;

 $e_{r_{glob}max}$  – valoarea maximă a erorii globale relative dintre cele cinci erori calculate pentru fiecare algoritm, în [%].

• Indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție se calculează cu relația:

$$ic_{te} = \frac{te_{i}}{te_{max}} \cdot 100 \, [\%] \tag{3.52}$$

unde:

 $ic_{te}$  este indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție pentru algoritmul *i*, exprimat în [%];

*te\_i* – timpul de execuție specific algoritmului *i*, exprimat în [s];

 $te_max$  – timpul de execuție maxim rezultat din execuția celor cinci algoritmi, exprimat în [s].

• Indicatorul mediu ponderat se calculează cu relația:

$$i_{mp} = p_1 \cdot ic_{er} + p_2 \cdot ic_{te} \, [\%] \tag{3.53}$$

unde:

 $i_{mp}$  este indicatorul mediu ponderat, exprimat în [%];

 $p_1$  – ponderea indicatorului  $ic_{er}$  (situat în intervalul [0, 1]);

 $p_2$  – ponderea indicatorului  $ic_{te}$  (situat în intervalul [0, 1]);

 $ic_{er}$ ,  $ic_{te}$  – prezintă semnificațiile din relațiile (3.51) și (3.52).

Având în vedere considerentele impuse de importanța celor doi indicatori, se propun pentru cele două ponderi valorile:  $p_1 = 0.7$  și  $p_2 = 0.3$ , astfel încât relația (3.53) capătă forma:

$$i_{mp} = 0.7 \cdot ic_{er} + 0.3 \cdot ic_{te} \, [\%] \tag{3.54}$$

formă care va fi utilizată în cele ce urmează.

Pentru cei cinci algoritmi prezentați au fost realizate patru teste de evaluare globală (TEG) nominalizate în tabelul 3.26 ale căror rezultate sintetice se prezintă în continuare.

Nr. crt.	Abreviere test	Dispozitiv testat (DUT)	Domeniu [GHz]	Număr inițial de frecvențe	Număr redus de frecvențe
1.	TEG1	Filtru	4.7 - 5.5	321	40
2.	TEG2	Filtru	13.5 – 15.5	400	50
3.	TEG3	Filtru	13.5 – 15.5	1600	100
4.	TEG4	Cablu coaxial	0.01-8	16000	1000

Tabelul 3.26 – Elemente aferente testelor de evaluare globală.

#### 3.6.1. Rezultatele testului TEG1

Așa cum rezultă din tabelul 3.26, pentru acest test, DUT a fost reprezentat de un filtru cu domeniul de lucru 4.7 - 5.5 GHz. Cei cinci algoritmi au fost aplicați pentru un număr redus de 40 de frecvențe. În tabelul 3.27 se pezintă rezultatele TEG1.

Tabelul 3.27 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG1.

Nr.	Denumire	Eroare relativă globală	Timp de execuție
crt.	algoritm	$e_{r_{glob_i}}$ [%]	<i>te_i</i> [s]
1.	ASF_DE	1.10	0.12
2.	ASF_PEV	1.70	0.48
3.	ASF_PE	0.77	0.02
4.	ASF_DMAP	0.04	0.07
5.	ASF_IRI	1.16	0.60

Pe baza datelor din tabelul 3.27 au fost construite graficele din figurile 3.49 și 3.50.



Fig. 3.49 - Graficul erorii globale asociate TEG1.



Fig. 3.50 – Graficul timpilor de execuție asociați TEG1.

Aplicând relațiile (3.51) - (3.54), s-au obținut indicatorii globali cu valorile evidențiate în tabelul 3.28.

Nr. crt.	Denumire algoritm	ic <sub>er</sub> [%]	<i>ic<sub>te</sub></i> [%]	<b>i</b> <sub>mp</sub> [%]	Punctaj TEG1
1.	ASF_DE	64.71	25.00	52.79	3
2.	ASF_PEV	100.00	100.00	100	1
3.	ASF_PE	45.29	4.17	32.96	4
4.	ASF_DMAP	2.35	14.58	6.02	5
5.	ASF_IRI	68.24	125.00	85.26	2

Tabelul 3.28 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG1.

În figura 3.51 sunt reprezentate grafic valorile indicatorului de calitate global pentru testul TEG1.



Fig. 3.51 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG1.

Observații TEG1:

1. Valorile indicatorului  $ic_{er}$  [%] din tabelul 3.27 au fost calculate pentru  $e_{r_{glob}max}$  = 1.7 % corespunzătoare ASF\_PEV.

2. Valorile indicatorului  $ic_{te}$  [%] din tabelul 3.27 au fost calculate pentru  $te_max = 0.48$  s corespunzătoare ASF\_PEV.

3. Conform valorilor rezultate pentru  $i_{mp}$  [%] s-a realizat o clasificare a algoritmilor evidențiați prin punctajul P\_TEG1. Pentru algoritmul cu cel mai mare  $i_{mp}$  au fost acordate 5 puncte, pentru următorul 4 puncte, ș.a.m.d.

În tabelul 3.29 se prezintă clasificarea algoritmilor propuși rezultați din testul TEG1.

Pozitio	Denumire	Punctaj
1 UZIĻIA	algoritm	P_TEG1
1.	ASF_DMAP	5
2.	ASF_PE	4
3.	ASF_DE	3
4.	ASF_IRI	2
5.	ASF_PEV	1

Tabelul 3.29 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG1.

Conform clasificării din tabelul 3.29, algoritmul ASF\_DMAP a rezultat ca fiind cel mai performant.

#### 3.6.2. Rezultatele testului TEG2

Conform datelor din tabelul 3.26, al doilea test a avut ca obiect evaluarea celor cinci algoritmi propuși pentru un filtru cu domeniului de lucru 13.5 - 15.5 GHz. Algoritmii au fost aplicați pentru un număr de 50 de frecvențe.

În tabelul 3.30 sunt prezentate valorile parametrilor globali  $e_{r_{glob_i}}$  [%] și  $te_i$  [s].

*Tabelul 3.30 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG2.* 

Nr.	Denumire	Eroare relativă globală	Timp de execuție
crt.	algoritm	$e_{r_{glob_i}}$ [%]	<i>te_i</i> [s]
1.	ASF_DE	29.53	0.16
2.	ASF_PEV	2.60	0.49
3.	ASF_PE	3.12	0.12
4.	ASF_DMAP	1.13	0.08
5.	ASF_IRI	5.18	0.46

Pe baza datelor din tabelul 3.30 au fost construite graficele din figurile 3.52 și 3.53.



Fig. 3.52 - Graficul erorii globale asociate TEG2.



Fig. 3.53 – Graficul timpilor de execuție asociați TEG2.

Prin aplicarea relațiilor (3.51) – (3.54) au rezultat indicatorii globali pentru TEG2, cu valorile reprezentate în tabelul 3.31.

Nr. crt.	Denumire algoritm	<i>ic<sub>er</sub></i> [%	ic <sub>te</sub> [%]	<b>i<sub>mp</sub> [%]</b>	Punctaj TEG2
1.	ASF_DE	100	32.65	79.80	1
2.	ASF_PEV	8.80	100	36.16	3
3.	ASF_PE	10.57	24.49	14.74	4
4.	ASF_DMAP	3.83	16.33	7.58	5
5.	ASF_IRI	17.54	93.88	40.44	2

Tabelul 3.31 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG2.

În figura 3.54 sunt reprezentate grafic valorile indicatorului mediu ponderat  $(i_{mp})$  preluate din tabelul 3.31.



*Fig. 3.54 - Graficul valorilor indicatorului i<sub>mp</sub>* [%] *pentru TEG2*. Observații TEG2:

1. Valorile pentru indicatorul  $ic_{er}$  [%] din tabelul 3.31 au fost calculate pentru  $e_{r_{glob_max}} = 29.53$  %, corespunzătoare ASF\_DE.

2. Valorile pentru indicatorul  $ic_{te}$  [%] din tabelul 3.31 au fost calculate pentru  $te_max$  = 0.49 s corespunzătoare ASF PEV.

3. Pentru clasificarea algoritmilor în cadrul TEG2, s-au acordat puncte în mod similar TEG1.

În tabelul 3.32 se prezintă clasificarea algoritmilor propuși rezultați din testul TEG2.

Poziția	Denumire algoritm	Punctaj P_TEG2
1.	ASF_DMAP	5
2.	ASF_PE	4
3.	ASF_PEV	3
4.	ASF_IRI	2
5.	ASF_DE	1

Tabelul 3.32 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG2.

Conform clasificării din tabelul 3.32 rezultă că în urma testului TEG2, algoritmul ASF\_DMAP este cel mai performant.

### 3.6.3. Rezultatele testului TEG3

După cum rezultă din tabelul 3.26, în cadrul testului TEG3, cei cinci algoritmi au fost evaluați pentru un filtru de ultraînaltă frecvență cu domeniului de lucru 13.5 - 15.5 GHz. Algoritmii au fost aplicați pentru un număr de 100 de frecvențe.

În tabelul 3.33 sunt prezentate valorile rezultate ale parametrilor globali  $e_{r_{glob_i}}$  [%] și  $te_i$  [s].

Nr. crt.	Denumire algoritm	Eroare relativă globală e <sub>rglob.i</sub> [%]	Timp de execuție <i>te_i</i> [s]
1.	ASF_DE	27.84	0.53
2.	ASF_PEV	0.49	0.48
3.	ASF_PE	0.76	0.12
4.	ASF_DMAP	0.25	0.09
5.	ASF_IRI	0.94	0.53

Tabelul 3.33 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG3.

Datele din tabelul 3.33 au reprezentat suportul pentru construcția graficelor din figurile 3.55 și 3.56.



Fig. 3.55 - Graficul erorii globale asociate TEG3.





Aplicând relațiile (3.51) - (3.54) s-au calculat indicatorii globali pentru TEG3, valorile rezultate fiind evidențiate în tabelul 3.34.

Nr. crt.	Denumire algoritm	ic <sub>er</sub> [%	ic <sub>te</sub> [%]	<b>i<sub>mp</sub> [%]</b>	Punctaj TEG3
1.	ASF_DE	100	100	100	1
2.	ASF_PEV	1.76	90.56	28.4	3
3.	ASF_PE	2.72	24.48	9.24	4
4.	ASF_DMAP	0.89	16.98	5.7	5
5.	ASF_IRI	3.37	100	32.34	2

Tabelul 3.34 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG3.

În figura 3.57 sunt reprezentate grafic valorile indicatorului mediu ponderat (i<sub>mp</sub>) preluate din tabelul 3.34.



Fig. 3.57 - Graficul valorilor indicatorului imp [%] pentru TEG3.

Observații TEG3:

1. Valorile pentru indicatorul  $ic_{er}$  [%] din tabelul 3.34 au fost calculate pentru  $e_{r_{glob_max}} = 27.84$  %, corespunzătoare ASF\_DE.

2. Valorile pentru indicatorul  $ic_{te}$  [%] din tabelul 3.34 au fost calculate pentru  $te_max$ = 0.53 s corespunzătoare ASF DE și ASF IRI.

3. Pentru clasificarea algoritmilor în cadrul TEG3, s-au acordat puncte în mod similar testelor TEG1 și TEG2.

În tabelul 3.35 se prezintă clasificarea algoritmilor propuși rezultați din testul TEG3.

Dozitio	Denumire	Punctaj
1 OZIĻIA	algoritm	P_TEG3
1.	ASF_DMAP	5
2.	ASF_PE	4
3.	ASF_PEV	3
4.	ASF_IRI	2
5.	ASF_DE	1

Tabelul 3.35 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG3.

Conform clasificării din tabelul 3.35 se observă că rezultatele din TEG3 situează ASF\_DMAP pe prima poziție.

#### 3.6.4. Rezultatele testului TEG4

Așa cum rezultă din tabelul 3.26, în cadrul testului TEG4, algoritmii propuși au fost evaluați pentru un cablu coaxial cu domeniului de lucru 0.01 - 8 GHz.

Algoritmii au fost aplicați pentru un număr de 1000 de frecvențe.

În tabelul 3.36 sunt prezentate valorile parametrilor globali  $e_{r_{glob_i}}$  [%] și  $te_i$  [s] rezultați.

Nr. crt.	Denumire algoritm	Eroare relativă globală e <sub>rglob.i</sub> [%]	Timp de execuție <i>te_i</i> [s]
1.	ASF_DE	3.41	35.35
2.	ASF_PEV	0.0056	1.02
3.	ASF_PE	0.007	0.12
4.	ASF_DMAP	0.0068	0.09
5.	ASF_IRI	-	-

Tabelul 3.36 – Erorile relative globale și timpii de execuție calculați în cadrul TEG4.

<u>Observație:</u> Algoritmul ASF\_IRI nu a furnizat rezultate din cauza efortului de calcul care nu a putut fi acoperit de echipamentul utilizat în cadrul testului.



Pe baza datelor din tabelul 3.36 au fost construite graficele din figurile 3.58 și 3.59.

Fig. 3.58 - Graficul erorii globale asociate TEG4.





Prin aplicarea relațiilor (3.51) – (3.54) au rezultat indicatorii globali asociați TEG4, valorile acestora fiind prezentate în tabelul 3.37.

Nr. crt.	Denumire algoritm	ic <sub>er</sub> [%]	ic <sub>te</sub> [%]	i <sub>mp</sub> [%]	Punctaj TEG4
1.	ASF_DE	100	100	100	2
2.	ASF_PEV	1.64	2.88	2.00	3
3.	ASF_PE	0.20	0.33	0.22	4
4.	ASF_DMAP	0.19	0.25	0.20	5
5.	ASF_IRI	-	-	-	1

Tabelul 3.37 – Indicatorii globali calculați în cadrul TEG4.

În figura 3.60 sunt reprezentate grafic valorile indicatorului mediu ponderat ( $i_{mp}$ ) așa cum au rezultat din tabelul 3.37.



*Fig. 3.60 - Graficul valorilor indicatorului i<sub>mp</sub>* [%] *pentru TEG4*. Observații TEG4:

1. Valorile pentru indicatorul  $ic_{er}$  [%] din tabelul 3.37 au fost calculate pentru  $e_{r_{glob}\ max} = 3.41$  %, corespunzătoare ASF\_DE.

2. Valorile pentru indicatorul  $ic_{te}$  [%] din tabelul 3.37 au fost calculate pentru  $te_max$  = 35.35 s corespunzătoare ASF\_DE.

3. Pentru clasificarea algoritmilor în cadrul TEG4, s-a acordat un punct ASF\_IRI, iar punctele acordate pentru ceilalți patru algoritmi au fost 5, 4, 3, 2 funcție de valorile  $i_{mp}$  (similar testelor TEG1, TEG2 și TEG3).

În tabelul 3.38 se prezintă clasificarea algoritmilor propuși rezultați din testul TEG4.

Poziția	Denumire algoritm	Punctaj P_TEG4
1.	ASF_DMAP	5
2.	ASF_PE	4
3.	ASF_PEV	3
4.	ASF_DE	2
5.	ASF_IRI	1

Tabelul 3.38 – Clasificarea algoritmilor propuși rezultați din TEG4.

Ca și în cazul testelor precedente, conform clasificării din tabelul 3.38 algoritmul ASF DMAP oferă cele mai bune performanțe.

#### 3.6.5. Sinteza rezultatelor testelor de evaluare globală

După cum s-a văzut în cadrul celor patru teste, s-au determinat pentru cei cinci algoritmi propuși trei indicatori, și anume:

- indicatorul procentual de calitate a erorii;

- indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție;

- indicatorul mediu ponderat.

Pe baza acestui ultim indicator cuantificat în punctaje, s-au realizat clasificări în cadrul fiecărui test.

În tabelul 3.39 se prezintă o sinteză a punctajelor aferente fiecărui algoritm în cadrul celor patru teste.

Algoritm	P_TEG1	P_TEG2	P_TEG3	P_TEG4	P_TOT
ASF_DE	3	1	1	2	7
ASF_PEV	1	3	3	3	10
ASF_PE	4	4	4	4	16
ASF_DMAP	5	5	5	5	20
ASF_IRI	2	2	2	1	7

*Tabelul 3.39 – Punctajele cumulate (P\_TOT) aferente fiecărui algoritm în cadrul celor patru teste.* 

Pe baza datelor din tabelul 3.39, s-a realizat clasificarea evidențiată în tabelul 3.40 și ilustrată în grafiul din figura 3.61.

Tabelul 3.40 – Clasificarea algoritmilor rezultată ca urmare a însumării punctelor obținute în cadrul celor patru teste.

Poziția	Denumire algoritm	Punctaj P_TOT
1.	ASF_DMAP	20
2.	ASF_PE	16
3.	ASF_PEV	11
4.	ASF_DE	7
5.	ASF_IRI	7

După cum reiese și din rezultatele acestei sinteze, pe prima poziție se situează algoritmul ASF\_DMAP (*algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive*). Acest algoritm prezintă cel mai ridicat grad de încredere atât din punct de vedere al consistenței informaționale, cât și din cel al timpului de execuție.

Ținând cont de această poziționare, s-a optat pentru implementarea practică a acestui algoritm, implementare care va fi detaliată în capitolul 4 al prezentei teze de doctorat.



*Fig. 3.61 – Graficul punctajelor totale aferente fiecărui algoritm în cadrul celor patru teste.* 

#### 3.7. Concluziile capitolului 3

În acest capitol au fost propuși cinci algoritmi de selecție a frecvențelor pentru îmbunătățirea vitezei de lucru a analizoarelor vectoriale de rețea. Pentru prezentarea fiecărui algoritm propus, s-au parcurs următoarele etape:

- ilustrarea principiului de funcționare;
- detalierea etapelor aplicării algoritmului;
- validarea rezultatelor prin simulare, utilizând un filtru cu domeniul de lucru 4.7 5.5 GHz pentru care s-au folosit 321 de frecvențe uniform distribuite în domeniul menționat.

Performanțele individuale ale celor cinci algoritmi au fost analizate pe baza următoarelor criterii:

- numărul redus de frecvențe rezultat, frecvențele utilizate pentru simularea măsurării complete în raport cu numărul total de frecvențe inițiale;
- eroarea relativă pe intervale;
- eroarea relativă globală;
- timpul necesar execuției algoritmului, folosind funcții adecvate contorizării timpului din mediul Matlab<sup>®</sup>.

Pentru a stabili algoritmul cu cele mai bune performanțe, s-au realizat teste de evaluare globală (TEG) pe următoarele patru dispozitive (sintetizate în tabelul 3.26):

- un filtru trece bandă cu domeniul de lucru 4.7 5.5 GHz pentru care s-au utilizat 40 din 321 de frecvențe uniform distribuite în domeniul menționat;
- un filtru de trece bandă cu domeniul de lucru 13.5 15.5 GHz pentru care s-au utilizat 50 din 400 de frecvențe;
- un filtru trece bandă cu domeniul de lucru 13.5 15.5 GHz pentru care s-au utilizat 100 din 1600 de frecvențe;
- un cablu coaxial cu domeniul în frecvență 0.01 8 GHz pentru care s-au utilizat 1000 din 16000 de frecvențe.

Cele patru teste au fost analizate pe baza următorilor indicatori propuși de autoare:

- indicatorul procentual de calitate a erorii;
- indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție;
- indicatorul mediu ponderat.

Rezultatele analizei comparative între algoritmii prezentați au pus în evidență performanțele *algoritmului de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte* (abreviat *ASF\_DMAP*). În concluzie, acest algoritm s-a dovedit a fi cel mai performant, motiv pentru care a fost implementat practic.

## Capitolul 4. Contribuții privind proiectarea și implementarea unui sistem de acordare automată a filtrelor de înaltă frecvență bazat pe algoritmul ASF\_DMAP

În prima parte a acestui capitol, se vor prezenta rezultatele experimentale comparative între achiziția în timp real a datelor de la un analizor vectorial de rețea prin metoda convențională (clasică), respectiv cu algoritm preimplementat și achiziția în timp real a datelor prin aplicarea *algoritmului propus de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte* (abreviat *ASF\_DMAP*). Analiza efectuată la sfârșitul capitolului 3 a desemnat ASF\_DMAP ca fiind algoritmul cu cele mai bune rezultate.

Pentru compararea rezultatelor obținute prin aplicarea celor două modalități de achiziție se propun următorii indicatori:

- indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte  $(ip_{np})$ ;
- *indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție (ip<sub>ta</sub>).*

În a doua parte a prezentului capitol se propune un sistem de acordare automată a unui filtru cu cavități specific domeniului microundelor, care trebuie să asigure:

- obținerea unei caracteristici amplitudine frecvență pentru filtrul acordat similară caracteristicii amplitudine – frecvență etalon, în limita unei precizii impuse;
- reducerea timpului necesar procesului de acordare.

Ultima partea a capitolului este dedicată unei propuneri de adaptare a sistemului de acordare automată pentru un filtru de joasă frecvență.

# 4.1. Cercetări experimentale privind achiziția în timp real de la un analizor vectorial de rețea

După cum s-a arătat, analizoarele vectoriale de rețea (Vector Network Analyser abreviate VNA) realizează pe baza unor algoritmi preimplementați cu intrările și ieșirile evidențiate în figura 4.1 măsurări în timp real (referite în cele ce urmează ca măsurări convenționale).

Pentru ilustrarea modului de lucru asociat algoritmului convențional de măsurare se va considera același exemplu folosit în capitolul 3, respectiv un filtru al cărui domeniu de lucru este 4.7 - 5.5 GHz, pentru care s-au utilizat 321 de frecvențe uniform distribuite în domeniul menționat.



*Fig. 4.1 - Abordarea de tip intrare – ieșire a unui algoritm preimplementat pe un VNA.* 

Pentru obținerea datelor asociate filtrului, care sunt prezentate în Anexa 4, s-au parcurs etapele descrise în cele ce urmează:

- <u>Etapa 1</u>. S-a definit domeniul de lucru pentru care se realizează măsurarea, stabilind frecvența de start (respectiv frecvența minimă) și frecvența de stop (respectiv frecvența maximă). Pentru exemplul considerat, frecvența de start a fost setată la valoarea 4.7 GHz iar cea de stop la valoarea 5.5 GHz.
- <u>Etapa 2</u>. S-a stabilit numărul de puncte în care se realizează măsurarea (pentru filtrul considerat s-a considerat n = 321 puncte).
- <u>Etapa 3</u>. S-a împărțit domeniul de lucru la numărul de puncte, rezultând un pas de explorare (respectiv o deplasare, numită în cele ce urmează *span*) conform relației

$$span = (f_{max} - f_{min}) / n [GHz]$$

$$(4.1)$$

unde:

span este intervalul între fiecare două frecvențe consecutive;

 $f_{max}$  – frecvenţa maximă, în GHz;

 $f_{min}$  – frecvența minimă, în GHz;

*n* – numărul de puncte.

Pentru exemplul considerat, aplicând relația (4.1), a rezultat pentru pasul de explorare valoarea:

$$span = \frac{5.5 - 4.7}{321} = 0.0025[GHz]$$

• Etapa 4. S-a determinat lista frecvențelor pe baza relației:

$$f_i = (f_{min} + span \cdot (i - 1))$$
 [GHz]; cu i=2,3....,n-1 (4.2)  
unde:

 $f_i$  este frecvența curentă;

 $f_{min}$  – frecvenţa minimă;

span - intervalul între fiecare două frecvențe consecutive.

De exemplu, pentru cazul filtrului cu domeniul 4.7 - 5.5 GHz, cea de-a doua frecvență se va calcula aplicând relația (4.2) pentru i=2, respectiv:

$$f_2 = (4.7 + 0.0025 \cdot 1) = 4.7025 \ GHz;$$

unde:

 $f_2$  este frecvența curentă;

 $f_{min} = f_1 - \text{freevenţa minimă (respectiv 4.7 GHz)}.$ 

Este de menționat faptul că toate frecvențele incluse în Anexa 4 au fost generate cu utilizarea relației (4.2).

- <u>Etapa 5</u>. S-au obținut cu ajutorul VNA-ului parametrii *S* corespunzători fiecărei frecvențe.
- <u>Etapa 6</u>. Valorile frecvențelor și ale parametrilor *S* corespunzători au fost depuse într-un fișier specific al VNA, numit **\*s2p** și prezentat în Anexa 4.

Achiziția datelor în timp real de la un VNA a presupus realizarea unui stand experimental care a inclus:

- un instrument de măsurare (VNA);
- un dispozitiv măsurat / testat (DUT);
- un sistem de calcul (PC).

Se face precizarea că necesitatea PC se impune în cadrul ansamblului atunci când datele necesită prelucrări ulterioare. Dacă se dorește numai vizualizarea caracteristicii *amplitudine – frecvență*, atunci nu este necesară existența sistemului de calcul, deoarece VNA-ul are integrată propria resursă de calcul, împreună cu un sistem de afișare (display). Așa cum a fost menționat în capitolul 2, comunicația cu instrumentul de măsurare (VNA) se poate realiza în mod direct, prin intermediul comenzilor SCPI<sup>20</sup> utilizând unul din următoarele protocoalele de comunicație: GPIB, Serial, TCP/IP, UDP sau VISA [B23]. În ceea ce privește conexiunea fizică, aceasta este realizată în mod curent prin porturile USB sau Ethernet.

Conform referinței [B2], VISA este un API<sup>21</sup> utilizat pentru comunicația dintre un instrument de măsurare (VNA) și un sistem de calcul (PC) prin intermediul unei magistrale care permite trimiterea de comenzi și mesaje între dispozitive. VNA-ul are propriul set de comenzi specifice SCPI. În cele ce urmează, se va prezenta aplicația de implementare în

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> SCPI - Standard Commands for Programmable Instruments – standard utilizat pentru uniformizarea instrumentelor de măsurare interfațabile prin intermediul comenzilor transmise pe magistrala VXI, RS-232, etc.
<sup>21</sup> API – (Application Programming Interface) este un script (o aplicație) care permite comunicarea între două standarde.

Matlab<sup>®</sup> folosind un obiect VISA a algoritmului ASF\_DMAP. Cele mai importante funcții definite de către autoare în cadrul aplicației sunt: *acquire\_data* (dedicată conexiunii dintre sistemul de calcul și VNA) și *get\_current\_point* (dedicată protocolului SCPI pentru transmiterea de comenzi în vederea realizării măsurării efective).

- Funcția *acquire\_data* are ca parametru de intrare frecvența pentru care se dorește evaluarea (achiziționarea) parametrului S, iar parametrii de ieșire sunt reprezentați de:
  - lista de frecvențe (*freq\_arr*);
  - lista de valori măsurate corespunzătoare frecvențelor (*s11\_arr*).

În prima secvență a aplicației se crează un obiect de tip VISA (numit *device\_connection*), pentru care trebuie setat timpul maxim admis în care dispozitivul poate *trimite un răspuns (TimeOut –* de exemplu, 120 ms) și *deschide conexiunea* potrivit secvenței:

```
device_connection = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0B5B::0xFFF9::1046904_768_51::INSTR', 'Tag', '');
device_connection = visa('NI',
'USB0::0x0B5B::0xFFF9::1046904_768_51::INSTR');
device_connection.TimeOut = 120;
fopen(device_connection);
```

Ulterior, în cadrul funcției *acquire\_data*, întregul domeniu de frecvențe este divizat în subdomenii pentru a putea achiziționa o singură frecvență folosind funcția *get\_current\_point* după cum urmează:

```
[s] = get_current_point(device_connection, currentFreq);
```

- Funcția get\_current\_point primește ca parametrii de intrare:
  - obiectul care realizează conexiunea, *device\_connection*;
  - frecvența pentru care se dorește achiziționarea parametrului S, calculată cu relația (4.2) și denumită în apelul de mai sus *currentFreq*.

Această funcție returnează valoarea măsurată (evaluată) a parametrului S corespunzătoare frecvenței *currentFreq* (*s11*).

```
În cadrul funcției get_current_point sunt trimise comenzile SCPI de mai jos
freq = query(device_connection, ':SENSE:FREQUENCY:DATA?');
s11 = query(device connection, 'CALC:DATA? FDAT');
```

pentru a seta frecvența dorită și pentru a achiziționa valoarea parametrilor S corespunzători acesteia.

<u>Etapa 7</u>. În această ultimă etapă, se realizează prelucrarea datelor achiziționate pentru a obține formatul dorit. Datele achiziționate sunt salvate într-un fișier
 \*s2p (cum este cel inclus în Anexa 4).

În paragraful 4.1.1 al prezentului subcapitol se vor prezenta rezultatele obținute prin implementarea algoritmului ASF\_DMAP în cadrul VNA, utilizând în principiu etapele descrise anterior.

Paragraful 4.1.2 prezintă rezultatele unei analize comparative referitoare la performanțele obținute prin implementarea pe un VNA a algoritmului convențional (abreviat ASF\_CLASIC) și a algoritmului ASF\_DMAP. Este de menționat că ASF\_DMAP a fost implementat pe baza etapizării descrise mai sus.

#### 4.1.1. Implementarea algoritmului ASF\_DMAP

Pentru implementarea algoritmului ASF\_DMAP a fost realizată o aplicație în mediul Matlab<sup>®</sup>, în care citirea dintr-un fișier va fi înlocuită cu realizarea unei măsurări efective, datele fiind achiziționate de la un VNA.

În figura 4.2 este prezentată schema logică de implementare a algoritmului ASF\_DMAP care a fost obținută prin adaptarea schemei logice de simulare pentru același algoritm din figura 3.32, în vederea achiziției datelor în timp real. Adaptarea a presupus dezvoltarea de facilități pentru achiziția datelor în timp real de la un VNA folosind ASF\_DMAP, ceea ce implică parcurgerea etapelor ilustrate în schema logică din figura 4.2 și evidențiate în cele ce urmează.

- <u>Etapa 1</u>. Se citește frecvența minimă (*start<sub>freq</sub>*) și frecvența maximă (*stop<sub>freq</sub>*) care formează domeniul de lucru al dispozitivului testat (DUT).
- <u>Etapa 2</u>. Se citește numărul maxim de frecvențe *nmax* și precizia măsurărilor, *dmax*.
- <u>Etapa 3</u>. Se calculează pe baza relației (4.1) pasul de explorare *span*.
- <u>Etapa 4</u>. Se determină lista inițială de frecvențe, *GLOBAL\_freq\_list*, pe baza relației:

$$GLOBAL\_freq\_list = start_{freq} + (i - 1) * span, cu i = 2,3,..,nmax-1,$$
(4.3)  
unde:

*GLOBAL\_freq\_list* este lista inițială de frecvențe din care se vor selecta numai 5% valori;

start<sub>freq</sub> – frecvența minimă;

span – pasul de explorare calculat cu relația (4.1) în care n=nmax.

- <u>Etapa 5</u>. Se alege un număr inițial de frecvențe uniform distribuite (*ninit=5%*) din frecvențele aferente listei (vectorului) *GLOBAL\_freq\_list*.
- <u>Etapa 6</u>. Se realizează măsurări fizice cu ajutorul VNA-ului pentru cele *ninit* = 5% frecvențe folosind funcția *acquire\_data*. Frecvențele pentru care se realizează măsurări sunt depuse în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, iar valorile măsurate sunt adăugate în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.
- <u>Etapa 7</u>. Se calculează factorul de normare *fact*, care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale, folosind relația:

$$fact = (start_{freg} - stop_{freg}) * 10 [GHz].$$
(4.4)

• <u>Etapa 8</u>. Frecvențele inițiale dimensionale sunt convertite în frecvențe normate adimensionale folosind relația:

$$GLOBAL\_freq\_list = \frac{GLOBAL\_freq\_list}{fact} [adimensional].$$
(4.5)

- <u>Etapa 9</u>. Se determină funcția polinomială f(x) de grad *ninit 1* al cărei grafic să treacă prin cele *ninit* puncte selectate.
- <u>Etapa 10</u>. Se determină funcțiile liniare  $g_k(x)$  ale căror grafice să treacă prin puncte din planul  $xOy^{22}$  corespunzând la două frecvențe consecutive.
- <u>Etapa 11</u>. Se evaluează, în vectorul diferență ale cărui componente sunt diferențele maxime |f g| pentru fiecare interval ce corespund la două frecvențe consecutive.
- <u>Etapa 12</u>. Algoritmul își încheie execuția dacă este îndeplinită una din următoarele condiții:

a) toate diferențele maxime au o valoarea mai mică decât *dmax*, valoare impusă la inițializare ;

b) numărul total de puncte este mai mare decât *nmax*, valoare impusă la inițializare.

• <u>Etapa 13</u>. Dacă cel puțin una dintre condițiile anterioare nu este îndeplinită pentru toate diferențele maxime, se identifică frecvențele normate corespunzătoare, care sunt convertite în frecvențe inițiale dimensionale, folosind relația:

$$GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list * fact [GHz]$$
(4.6)

• <u>Etapa 14</u>. Se realizează măsurări fizice cu ajutorul VNA-ului pentru frecvențele identificate în etapa 13 folosind funcția *acquire\_data*. Frecvențele pentru care se

 $<sup>^{22}</sup>$ În acest plan pe axa *Ox* a absciselor sunt reprezentate frecvențele adimensionale, iar pe axa *Oy* a ordonatelor sunt reprezentate amplitudinile adimensionale.

realizează măsurări sunt adăugate în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, iar valorile măsurate sunt adăugate în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

• <u>Etapa 15</u>. Algoritmul este reluat din etapa 8, până când una din condițiile de oprire descrise în etapa 12 este îndeplinită.

În Anexa 10 este prezentat programul ASF\_COMPARE care implementează în mediul Matlab<sup>®</sup> algoritmul ASF\_DMAP. În paragraful următor se realizează o comparație între rezultatele măsurărilor obținute cu algoritmul ASF\_DMAP și cele obținute printr-o măsurare clasică.



Fig. 4.2 – Schema logică a algoritmului ASF\_DMAP aplicat achiziției datelor în timp real.

#### 4.1.2. Rezultate experimentale comparative

Pentru a pune în evidență performanțele algoritmului ASF\_DMAP a fost realizată aplicația Matlab<sup>®</sup> ASF\_COMPARE al cărui obiectiv principal vizează o analiză comparativă între algoritmul convențional (clasic) implementat în prezent pe VNA-uri (ASF\_CLASIC) și algoritmul propus ASF\_DMAP.

În această aplicație cei doi algoritmi sunt implementați după cum urmează:

- algoritmul ASF\_DMAP care realizează măsurări pentru un număr redus de frecvențe;
- algoritmul ASF\_CLASIC care realizează măsurări pentru toate frecvențele inițiale.

Analiza comparativă a celor doi algoritmi presupune evaluarea următorilor indicatori definiți de autoare după cum urmează:

• indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte calculat cu relația:

$$ip_{np} = \frac{(n_{ASF\_CLASIC} - n_{ASF\_DMAP})}{n_{ASF\_CLASIC}} \cdot 100 \,[\%]$$

$$(4.7)$$

unde:

 $ip_{np}$  este indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte;

 $n_{ASF_DMAP}$  – numărul de frecvențe utilizate de algoritmul ASF\_DMAP;

 $n_{ASF \ CLASIC}$  – numărul de frecvențe utilizate de algoritmul ASF\_CLASIC (impus).

• *indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție* calculat cu relația:

$$ip_{ta} = \frac{ta_{ASF\_CLASIC} - ta_{ASF\_DMAP}}{ta_{ASF\_CLASIC}} \cdot 100 \,[\%] \tag{4.8}$$

unde:

 $ip_{ta}$  este indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție;

 $ta_{ASF_DMAP}$  – timpul de achiziție aferent algoritmului ASF\_DMAP;

*ta<sub>ASF\_CLASIC</sub>* – timpul de achiziție aferent algoritmului ASF\_CLASIC.

#### Observații:

1. Indicatorul  $ip_{np}$  se obține prin raportarea diferenței dintre numărul de frecvențe aferente celor doi algoritmi (convențional ASF\_CLASIC, respectiv ASF\_DMAP) și numărul inițial de frecvențe (respectiv cel corespunzător ASF\_CLASIC).

2. Indicatorul  $ip_{ta}$  se calculează prin raportarea diferenței dintre timpi de achiziție specifici celor doi algoritmi (convențional ASF\_CLASIC, respectiv ASF\_DMAP) și timpul de achiziție specific algoritmului convențional (respectiv ASF\_CLASIC).

Pentru realizarea măsurărilor aferente celor doi algoritmi a fost realizat standul prezentat în figura 4.3 în care au fost integrate următoarele elemente:

- instrumentul de măsurare (Anritsu Handheld LMR Master S412E), reprezentat de un VNA portabil (https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/s412e);
- sistemul de calcul (PC), reprezentat de un laptop Asus Aspire 5736Z;
- dispozitivul măsurat (DUT), reprezentat de un diplexor<sup>23</sup> de microunde cu domeniul de lucru 2.7 - 3.5 GHz;
- cabluri și conectori de microunde pentru conexiunea dintre instrumentul de măsurare (VNA) și diplexor (DUT);



• cablu USB pentru conexiunea VNA – PC.

Fig. 4.3 – Standul experimental pentru achiziția și prelucrarea parametrilor S de la un VNA pentru un DUT de tip diplexor.

Pe acest stand au fost realizate mai multe teste pentru diferite tipuri de dispozitive (DUT), în continuare fiind prezentate și interpretate rezultatele a trei asemenea teste și anume:

- testul **T**<sub>1</sub> pentru un DUT de tip diplexor;

- testul T<sub>2</sub> pentru un DUT de tip cablu coaxial;

- testul **T**<sub>3</sub> pentru un DUT reprezentat de un ansamblu format dintr-un cablu coaxial și un conector OPEN - SHORT.

Pentru toate testele trecerea de la amplitudini la parametrii S se face cu relația:

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Diplexor de microunde reprezintă un dispozitiv care separă sau combină o frecvență înaltă și o frecvență joasă.

$$S_{11} = 20 \cdot \log_{10}(A_{11}) \ [dB] \tag{4.9}$$

Conform descrierii algoritmului ASF\_DMAP realizată în capitolul 3, eroarea  $d_{max}$  reprezintă diferența maximă admisă între valoarea amplitudinii aproximată liniar și valoarea aproximată polinomial. Deoarece testele s-au realizat pentru o reprezentare logaritmică, valoarea erorii maxime  $d_{max}$  va fi exprimată în dB.

#### • **Rezultatele testului T**<sub>1</sub>

Testul  $T_1$ , corespunzător diplexorului, a avut asociate valorile experimentale prezentate în tabelul 4.1

*Tabelul* 4.1 – *Valorile experimentale aferente testului*  $T_1$  *pentru un diplexor.* 

Algoritm	d <sub>max</sub> [dB]	Număr frecvențe		Timp achiziție [s]	
Algorium		<b>n</b> <sub>ASF_CLASIC_T1</sub>	<b>n</b> <sub>ASF_DMAP_T1</sub>	ta <sub>ASF_CLASIC_T1</sub>	ta <sub>ASF_DMAP_T1</sub>
ASF_CLASIC	0.02	100	-	922	-
ASF_DMAP	0.02	-	17	-	134

Pe baza acestor rezultate experimentale s-au calculat indicatorii din relațiile (4.7) și (4.8) după cum urmează:

• indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte:

$$ip_{np_{T1}} = \frac{(n_{ASF_{CLASIC_{T1}}} - n_{ASF_{DMAP_{T1}}})}{n_{ASF_{CLASIC_{T1}}}} \cdot 100$$
(4.9)

respectiv

$$ip_{np} = \frac{(100 - 17)}{100} \cdot 100 = 83\%$$

• indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție:

$$ip_{ta_{T1}} = \frac{ta_{ASF\_CLASIC\_T1} - ta_{ASF\_DMAP\_T1}}{ta_{ASF\_CLASIC\_T1}} \cdot 100 \,[\%]$$
(4.10)

respectiv

$$ip_{ta_T1} = \frac{(922 - 134)}{100} \cdot 100 = 85.4\%$$

Analizând aceste rezultate, se constată că algoritmul propus pentru îmbunătățirea vitezei de lucru a VNA-urilor, respectiv ASF\_DMAP, realizează o reducere a numărului de puncte cu 83%, reducere care se reflectă și în micșorarea timpului de achiziție cu 84.5%.

În figura 4.4 este prezentată interfața grafică a aplicației ASF\_COMPARE, unde se poate observa că numărul maxim de puncte impus este setat la valoarea 100 (respectiv  $n_{max}$  = 100). Pentru algoritmul ASF\_DMAP a fost setată în cod eroarea maximă la valoarea 0.02 (respectiv  $d_{max}$  = 0.02 dB). Tot din interfața prezentată în figura 4.4 rezultă că algoritmul ASF\_DMAP se oprește după evaluarea parametrilor *S* pentru 17 puncte (frecvențe).

De asemenea, în figura 4.4 sunt reprezentate dependențele  $S_{11}$  – frecvență după cum urmează: graficul de sus ilustrează caracteristica  $S_{11}$  – frecvență pentru algoritmul ASF\_CLASIC, iar cel de jos ilustrează caracteristica  $S_{11}$  – frecvență pentru algoritmul ASF\_DMAP în care cele 17 puncte sunt marcate cu simbolul "\*".



Fig. 4.4 – Interfața grafică a aplicației ASF\_COMPARE pentru testul T<sub>1</sub>.

Din examinarea celor două caracteristici rezultă că acestea sunt practic identice, ceea ce indică păstrarea consistenței informaționale în condițiile unei reduceri semnificative atât a numărului de puncte, cât și a timpului de achiziție.

• Rezultatele testului T<sub>2</sub>

**Testul T**<sub>2</sub> a utilizat în calitate de DUT un cablu coaxial, a cărui comportare a fost evaluată pentru domeniul de frecvențe 2 - 3 GHz. În figura 4.5 este prezentată o imagine a standului în care este conectat DUT reprezentat de cablul coaxial. Pentru testul T<sub>2</sub> au rezultat valorile experimentale înscrise împreună cu precizia  $d_{max}$  în tabelul 4.2.

*Tabelul* 4.2 – *Valorile experimentale aferente testului* T<sub>2</sub> *pentru un cablu coaxial.* 

Algonitm	dmax [dB]	Număr frecvențe		Timp achiziție [s]	
Algorium		$n_{ASF\_CLASIC\_T2}$	<b>n</b> <sub>ASF_DMAP_T2</sub>	$ta_{ASF\_CLASIC\_T2}$	$ta_{ASF\_DMAP\_T2}$
ASF_CLASIC	0.01	100	-	932	-
ASF_DMAP	0.01	-	60	-	471

Pe baza datelor din tabelul 4.2 au fost calculați utilizând relațiile (4.7) și (4.8) indicatorii procentuali de reducere după cum urmează:

• indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte:

$$ip_{np\_T2} = \frac{(n_{ASF\_CLASIC\_T2} - n_{ASF\_DMAP\_T2})}{n_{ASF\_CLASIC\_T2}} \cdot 100$$
(4.11)

respectiv

$$ip_{np\_T2} = \frac{(100 - 60)}{100} \cdot 100 = 40\%$$

• indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție:

$$ip_{ta\_T2} = \frac{ta_{ASF\_CLASIC\_T2} - ta_{ASF\_DMAP\_T2}}{ta_{ASF\_CLASIC\_T2}} \cdot 100 \,[\%] \tag{4.12}$$

respectiv

$$ip_{ta\_T2} = \frac{(932 - 471)}{932} \cdot 100 = 49.4\%$$

Comparând valorile indicatorilor calculați pentru cei doi algoritmi cu relațiile (4.11) și (4.12), rezultă că ASF\_DMAP se dovedește performant față de ASF\_CLASIC și pentru DUT de tip cablu coaxial. Astfel, în condițiile unei precizii impuse de 0.01 dB, numărul de frecvențe a fost redus cu 40%, iar timpul de achiziție a fost cu 49.4% mai mic.

Figura 4.5 prezintă o imagine a standului experimental utilizat pentru testul  $T_2$ , în care se remarcă modul de conectare al DUT de tip cablu coaxial.



Fig. 4.5 – Standul experimental pentru achiziția și prelucrarea parametrilor S de la un VNA pentru un DUT reprezentat de un cablu coaxial.

În figura 4.6 este ilustrată o captură de ecran a aplicației ASF\_COMPARE (aferentă testului T<sub>2</sub>) în care sunt ilustrate caracteristicile  $S_{11}$  – frecvență pentru algoritmul ASF\_CLASIC (secțiunea de sus), respectiv aceeași caracteristică pentru algoritmul ASF\_DMAP în care sunt marcate cu simbolul "\*" cele 60 de puncte aferente (secțiunea de jos).



Fig. 4.6 – Interfața grafică a aplicației ASF\_COMPARE pentru testul T<sub>2</sub>.

Ca și în cazul testului precedent, din examinarea celor două caracteristici rezultă că acestea sunt practic identice, ceea ce indică păstrarea consistenței informaționale pentru ASF\_DMAP, în condițiile unei importante reduceri atât a numărului de puncte, cât și a timpului de achiziție.

#### • Rezultatele testului T<sub>3</sub>

Pentru testul **T**<sub>3</sub>, dispozitivul testat (DUT) a fost reprezentat de un ansamblu format din cablul coaxial utilizat în testul **T**<sub>2</sub> și un conector *OPEN – SHORT*. Figura 4.7 prezintă detaliul de conectare a acestui DUT la VNA, în cadrul standului experimental realizat.



Fig. 4.7 – Ansamblul dispozitivului testat format din cablu coaxial și conector de tip OPEN – SHORT.

Pentru testul  $T_3$  au rezultat valorile experimentale înscrise, împreună cu precizia d<sub>max</sub> în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3 – Valorile experimentale asociate testului  $T_3$  pentru un ansamblu cablu coaxial – conector OPEN – SHORT.

Algonitm	dmax [dB]	Număr frecvențe		Timp achiziție [s]	
Algorium		<b>n</b> ASF_CLASIC_T3	<b>N</b> ASF_DMAP_T3	ta <sub>ASF_CLASIC_T3</sub>	ta <sub>ASF_DMAP_T3</sub>
ASF_CLASIC	0.01	100	-	931	-
ASF_DMAP	0.01	-	52	-	422

Și în cadrul acestui test au fost calculați indicatorii procentuali de reducere, utilizând relațiile (4.7) și (4.8), respectiv datele din tabelul 4.3 după cum urmează:

• indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte:

$$ip_{np_T3} = \frac{(n_{ASF\_CLASIC\_T3} - n_{ASF\_DMAP\_T3})}{n_{ASF\_CLASIC\_T3}} \cdot 100$$
(4.13)

respectiv

$$ip_{np_T3} = \frac{(100 - 52)}{100} \cdot 100 = 48\%$$

#### • indicatorul procentual de reducere a timpului de achiziție:

$$ip_{ta_{T3}} = \frac{ta_{ASF\_CLASIC\_T3} - ta_{ASF\_DMAP\_T3}}{ta_{ASF\_CLASIC\_T3}} \cdot 100 \,[\%]$$
(4.14)

respectiv

$$ip_{ta\_T3} = \frac{(931 - 422)}{931} \cdot 100 = 54.6\%$$

Valorile calculate pentru cei doi indicatori confirmă superioritatea ASF\_DMAP în raport cu algoritmul clasic și în cazul unui DUT constituit dintr-un ansamblu cablu coaxial – conector *OPEN – SHORT*. Această superioritate este concretizată în scăderea cu 48% (pentru numărul de puncte), respectiv cu 54.6% (pentru timpul de achiziție).

Figura 4.8 prezintă o captură de ecran a aplicației ASF\_COMPARE (aferentă testului **T**<sub>3</sub>) în care sunt ilustrate caracteristicile  $S_{11}$  – frecvență pentru algoritmul ASF\_CLASIC (secțiunea de sus), respectiv aceeași caracteristică pentru algoritmul ASF\_DMAP în care sunt marcate cu simbolul "\*" cele 52 de puncte aferente (secțiunea de jos).



Fig. 4.8 - Interfața grafică a aplicației ASF\_COMPARE pentru testul T<sub>3</sub>.

Ca și în cazul testelor precedente, din examinarea celor două caracteristici rezultă că acestea sunt practic identice, ceea ce indică păstrarea consistenței informaționale în condițiile unei reduceri atât a numărului de puncte, cât și a timpului de achiziție.

Tabelul 4.4 prezintă sintetic indicatorii procentuali de reducere care au fost calculați pe baza datelor experimentale obținute prin efectuarea testelor  $T_1$ ,  $T_2$  și  $T_3$ .

Nr. test	<i>ip<sub>np</sub></i> [%]	<i>ip<sub>ta</sub></i> [%]
$T_1$	83	84.5
$T_2$	40	49.4
$T_3$	48	54.6

Tabelul 4.4 - Rezultatele comparative ale aplicării ASF\_DMAP pentru cele trei teste.

Pe ansamblu, cele trei teste experimentale au confirmat performanțele algoritmului ASF\_DMAP, performanțe rezultate și în urma testelor de simulare detaliate în subcapitolul 3.6.

## 4.2. Contribuții privind dezvoltarea unui sistem de acordare automată a filtrelor pentru microunde

În cele ce urmează sunt prezentate caracteristicile unui sistem automat care a fost dezvoltat în scopul acordării filtrelor pentru microunde. Prezentarea sistemului automat este precedată de succinte referiri la utilizarea cavităților rezonante pentru realizarea acestor filtre.

#### 4.2.1. Filtre cu microunde realizate cu cavități rezonante

Un filtru este un dispozitiv pentru procesarea semnalelor, caracterizat printr-o comportare selectivă față de anumite frecvențe. Funcție de această selectivitate, filtrele pot fi încadrate într-unul dintre tipurile: *trece sus, trece jos, trece banda și stop bandă*.

Componentele utilizate pentru realizarea filtrelor, sunt în concordanță cu domeniile de frecvențe cărora acestea le sunt destinate. Astfel, pentru realizarea filtrelor pasive destinate frecvențelor mai mici decât 300 MHz se utilizează componente care încadrează rezistoare, bobine, condensatoare [B1].

În domeniul microundelor se utilizează cu precădere filtrele cu cavități rezonante. Acestea sunt utilizate datorită dimensiunilor reduse, costurilor mici, domeniului extins de frecvențe și a performanțelor ridicate [B88] și [B89]. Conform referinței [B90], o cavitate rezonantă reprezintă un rezonator electromagnetic de diferite forme (paralelipiped, cilindru, sferă) la nivelul căruia are loc o conversie de energie. Printre parametrii definitorii ai unui rezonator electromagnetic sunt de menționat: *frecvența de rezonanță* și *factorul de calitate*.

La rezonanță, energia câmpului electric, acumulat pe durata unei perioade de oscilație este transferată în totalitate unui câmp magnetic și invers.

În figura 4.9 este reprezentat un rezonator cilindric cu generatoarea și raza de lungimi *c* respectiv *a*, iar figura 4.10 conține o secțiune longitudinală prin acesta. După cum se observă, în interiorul rezonatorului se găsește un conductor interior mobil a cărui lungime poate fi mărită sau micșorată printr-o acțiune din exterior. Lungimea conductorului interior influențează frecvența de rezonanță a cavității [B91] și [W7]. De exemplu, în figura 4.10, rezonatorul este reprezentat de ansamblul *buton de reglare – tijă – conductor interior (fix și mobil*).



Fig. 4.9 - Rezonator cilindric



Fig. 4.10 – Secțiune transversală aferentă unei cavități rezonante [W7].

Conform referințelor [W8] și [B92], geometria unei cavități cilindrice dictează frecvența de rezonanță, pentru care variațiile sunt obținute conform relației:

$$\Delta f = -2f_0 \frac{\pi r^2}{a \cdot c} \tag{4.15}$$

unde:

 $\Delta f$  este variația frecvenței de rezonanță;

 $f_0$  – frecvența de rezonanță inițială (frecvența centrală)<sup>24</sup>;

r – raza tijei;

a – raza rezonatorului;

*c* – lungimea rezonatorului.

Relația (4.15) pune în evidență posibilitatea modificării frecvenței de rezonanță prin acționarea butonului de reglare, acționare prin care se ajustează adâncimea la care tija pătrunde în conductorul intern fix. Uzual, butonul de reglare se prezintă sub forma unui șurub solidar cu conductorul interior mobil.

Prin conectarea mai multor cavități se obține un filtru cu cavități. Fiecare cavitate rezonantă, împreună cu rezonatorul, poate fi echivalată cu un circuit oscilant *LC*, care va genera un câmp electromagnetic și va influența cavitățile învecinate. În figura 4.11 este prezentat un filtru cu trei cavități unde se găsesc trei rezonatori montați în fiecare cavitate rezonantă și două șuruburi de cuplare care afectează cuplajul capacitiv dintre cavități. Tot în figura 4.11 pot fi identificați și cei doi conectori coaxiali de intrare și ieșire cuplați la rezonatori prin intermediul unor sonde [B90].

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Frecvența centrală a unui filtru este media geometrică a frecvențelor de tăiere. Frecvența de tăiere este frecvența care separă banda de trecere a unui filtru de banda de blocare [B99].



Fig. 4.11 – Secțiune transversală aferentă unui filtru cu trei cavități: R – rezonatori; SR – șuruburi de reglare, SC – șuruburi de cuplare, PB – piulițe de blocare, Ci/e – conectori de intrare / ieșire [B90].

Figura 4.12 prezintă schema electrică echivalentă a filtrului cu trei cavități ilustrat în figura 4.11. În cadrul acestei scheme electrice, fiecărei cavități i se asociază câte o bobină și câte un condensator (respectiv  $L_1 - C_1$  pentru cavitatea  $1, L_2 - C_2$  pentru cavitatea  $2, L_3 - C_3$  pentru cavitatea 3). Cavitățile sunt grupate în serie, elementele de conectare fiind reprezentate de bobinele  $L_{c1}$  și  $L_{c2}$  [B90].



Fig. 4.12 – Schema electrică echivalentă a unui filtru cu trei cavități: R – rezonator; Cic – cuplaj inductiv între cavități [B90].

Conform referințelor [W9] și [B93], o cavitate este acordată prin ajustarea lungimii tijei aflată în conductorul mobil, ceea ce va avea ca efect principial modificarea inductanței bobinei și a capacității condensatorului aferent respectivei cavități. Acordarea unui filtru
reprezintă procesul de obținere a caracteristicii amplitudine – frecvență similară cu a unui filtru etalon (caracteristică obținută în urma unei măsurări de referință).

Conform referinței [B90], filtrele cu cavități pot fi acordate după cum urmează:

- prin acționarea șuruburilor de reglare se stabilește frecvența centrală a filtrului;
- prin acționarea șuruburilor de cuplare se stabilește lățimea de bandă a filtrului.

Așa cum s-a arătat în capitolul 1, pentru testarea și acordarea filtrelor pot fi utilizate Analizoarele Vectoriale de Rețea (Vector Network Analyser – VNA), în figura 4.13 fiind prezentată schema bloc a unui VNA la care este conectat un filtru pentru testare [B94].



Fig. 4.13 – Schema bloc a unui VNA cu evidențierea conectării DUT [B94].

În structura unui VNA sunt incluse următoarele entități:

- generatorul de frecvență care se constituie pentru dispozitivul testat în sursă de semnal;
- comutatorul de semnal care permite transmiterea selectivă a semnalului către unul dintre cele două porturi;
- cuploare direcționale care permit controlul transferului de semnal între mai multe porturi;

- receptoarele de microunde care sunt utilizate pentru conversia frecvenței semnalului într-o frecvență intermediară mai mică;<sup>25</sup>
- procesorul care efectuează procesarea digitală a semnalelor și aplică diferiți algoritmi de corecție a erorilor;
- dispozitivul de afișare prin intermediul căruia se prezintă rezultatele măsurării.

Figura 4.14 ilustrează conceptual conectarea informațională a unui filtru pentru microunde la un VNA. Sursa de semnal din interiorul VNA-ului generează un semnal sinusoidal, având frecvența  $f_i$ , care este aplicat filtrului. Semnalul la ieșirea din filtru (numit și semnal transmis) este tot un semnal sinusoidal, dar atenuat, având o altă frecvență,  $f_e$ . VNAul realizează prelucrarea acestor semnale și transmite către sistemul de calcul parametrii *S*, notați în figura 4.14 cu  $P_s$ . Există VNA-uri care au integrate sistemele de afișare (display uri), după cum se poate observa în figura 4.15. Cuplarea unui sistem de calcul la ansamblul VNA – dispozitiv testat (respectiv filtru) se realizează pentru procesarea ulterioară a datelor (reprezentate de  $f_i$  și  $P_s$ ). Dacă nu se dorește postprocesarea acestora, atunci conectarea sistemului de calcul la acest ansamblu nu mai este necesară.



Fig. 4.14 – Conectarea informațională a unui filtru la VNA.

În figura 4.15 se prezintă un stand integrat de autoare în care sunt prezente: un VNA portabil de dimensiuni reduse, numit VNA Handheld, un filtru de microunde cu cavități și un sistem de calcul utilizat pentru postprocesarea datelor.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Un VNA include și un convertor analog numeric (CAN) care facilitează prelucrarea ulterioară în format digital a semnalului.



Fig. 4.15 – Stand experimental destinat testării unui filtru pentru microunde.

După integrarea acestor elemente, (potrivit structurii principiale din figura 4.14), se realizează măsurările folosind aplicația dedicată VNA-ului utilizat. De exemplu, în figura 4.16 este prezentat un VNA produs de compania Anritsu. Pentru realizarea măsurărilor, se utilizează aplicația software Anritsu ShockLine dedicată, prin intermediul căreia se pot seta: *domeniul de lucru* (frecvența de start, frecvența de stop, numărul de puncte), *modalitatea de afișare a parametrilor S* (între care: amplitudine, fază, grafic Smith) etc. Autoarea a avut acces la această infrastructură hardware și software pe parcursul unui stagiu de cercetare realizat la compania ANRITSU Solutions România, în perioada 2014 - 2016.

În contextul celor prezentate mai sus, figura 4.17 ilustrează o captură de ecran a aplicației Anritsu ShockLine, captură în care se poate observa că au fost stabilite frecvențele de start și de stop la valorile 2 GHz, respectiv 3 GHz. Aceste valori au fost setate în interfața grafică a aplicației ShockLine și au fost impuse de domeniul de lucru al filtrului, respectiv 2 - 3 GHz. De asemenea, din figura 4.17 reiese că sunt setați doi indicatori (markeri) la valoarea 2.3 GHz și 2.5 GHz pentru a ilustra mai ușor caracteristicile parametrilor *S* în interval respectiv.

Tot în figura 4.17 se poate observa reprezentarea amplitudine - frecvență pentru:

- parametrul *S*<sub>12</sub> în partea stângă sus culoare galbenă ;
- parametrul *S*<sub>21</sub> în partea dreaptă sus culoare verde ;
- parametrul  $S_{11}$  în partea stângă jos- culoare albastru ;
- parametrul  $S_{22}$  în partea dreaptă jos culoare mov.



Fig. 4.16 – Structură stand experimental realizat cu VNA de tip Anritsu MS46522A.



Fig. 4.17 – Captură de ecran cu rezultatele execuției aplicației Anritsu ShockLine utilizate pentru afișarea caracteristicilor unui filtru cu domeniul de lucru 2 – 3 GHz.

Pentru procesarea ulterioară a datelor achiziționate cu VNA-ul, aplicația ShockLine are opțiunea de export a datelor într-un fișier specific măsurărilor realizate cu VNA-uri, având extensia \*.s2p. În acest fel, datele pot fi ulterior prelucrate cu limbaje precum Matlab<sup>®</sup>, C++, C#, etc.

După cum a fost menționat în capitolul 1, în prezent filtrele de microunde sunt acordate manual, prin modificarea indirectă a valorilor componentelor L și C aferente circuitelor oscilante echivalente. Lucrarea [B90] prezintă detaliat procesul de acordare a unui filtru cu cavități, unde este menționat faptul că VNA-urile sunt utilizate pentru proiectarea și testarea filtrelor conform specificațiilor viitorilor utilizatori.

Utilizând afișajul VNA-ului, operatorul implicat în acordare vizualizează simultan caracteristicile *amplitudine – frecvență* asociate celor patru parametri *S*, respectiv:  $S_{11}, S_{21}, S_{12}$  și  $S_{22}$ . Conform aceleiași referințe, procedura de acordare manuală a unui filtru de microunde cu cavități presupune parcurgerea pașilor evidențiați în cele ce urmează.

- 1. Primul pas în procesul de acordare constă în obținerea benzii aproximative de trecere a filtrului, prin reglarea fiecărui rezonator la frecvența centrală a filtrului. Acordarea începe cu primul rezonator (rezonatorul de la intrare), apoi urmează rezonatorul final (rezonatorul de la ieşire) și ulterior sunt acordate rezonatoarele centrale. În timp ce se acordează un rezonator, acordarea rezonatorului anterior este uşor deranjată datorită interacțiunii (cuplării) între ele. Rezonatorul anterior este acordat din nou şi procedura continuă cu acordarea rezonatorilor rămaşi. Procesul de acordare este iterativ şi este continuat până când se obțin cele mai puține pierderi în banda de trecere şi cele mai mari atenuări în afara acesteia.
- Următorul pas în procesul de acordare constă în ajustarea cuplajului dintre rezonatoare pentru a controla lățimea de bandă a filtrului. Procesul de ajustare a cuplajului modifică uşor frecvența de rezonanță a rezonatorilor.
- În ultimul pas, se acordează din nou rezonatorii până la obținerea caracteristicii amplitudine – frecvență în conformitate cu cea de referință.

Parcurgerea repetată a pașilor de mai sus, impune pentru acordarea manuală a unui filtru intervale de timp de ordinul orelor, ceea ce reprezintă un important dezavantaj al acordării manuale.

# 4.2.2. Proiectarea sistemului automat de acordare propus

Sintetic, din analiza procesului de acordare manuală prezentat anterior au rezultat următoarele neajunsuri:

- necesitatea implicării unui operator uman care să intervină asupra fiecărui rezonator pentru a aduce valoarea măsurată a parametrului S asociat unei frecvențe de intrare pentru filtrul acordat la o valoare de referință dată de un etalon pentru aceeaşi frecvență;
- timpul ridicat (de ordinul orelor) necesar acordării, chiar dacă această operație este efectuată de către un operator cu experiență;

• costuri ridicate cu manopera.

Pornind de la aceste neajunsuri, în cadrul cercetărilor efectuate s-a considerat necesară dezvoltarea unui sistem automat de acordare, dezvoltare la baza căreia au stat următoarele cerințe:

- posibilitatea integrării rezultatelor unuia dintre algoritmii prezentați în capitolul 3 al tezei de doctorat pentru domeniul de frecvență al filtrului acordat;

- posibilitatea generării amplitudinii din parametrii *S* rezultați în urma acordării automate;

- integrarea în structura sistemului automat a unui analizor de frecvență în rețea (VNA);

- utilizarea filtrelor de ultra înaltă frecvență cu cavități rezonante.

Ținând cont de cerințele evidențiate mai sus, *Sistemului Automat de Acordare a Filtrelor* (abreviat SAAF) i se impun următoarele sarcini:

- obținerea unei caracteristici amplitudine frecvență pentru filtrul acordat similară caracteristicii amplitudine – frecvență etalon, în limita unei precizii impuse;
- micșorarea intervalului de timp necesar procesului de acordare.

Pentru a răspunde cerințelor și implicit pentru a realiza sarcinile, se propune un SAAF cu acțiune după abatere, având structura ilustrată în figura 4.18.



Fig. 4.18 – Structura sistemului automat de acordare a filtrelor (SAAF) propus:  $f_i$  – frecvența pentru care se realizează acordarea;  $f_e$  – frecvența semnalului de ieșire din VNA;  $P_{SR}$  – parametru S de referință;  $P_{SC}$  – parametru S calculat de către VNA;  $\Delta P_S$  – abatere în parametrii S; n – comanda (număr trenuri de impulsuri);  $\Delta h$  – deplasare tijă (mărime de execuție);  $A_i$  – amplitudinea corespunzătoare  $P_{SC}$ ; MEVPS – modul evaluare parametrii S pentru  $f_i$ ; EC – element de comparație; BC – bloc de comandă (regulator); EE – element de execuție; VNA – analizor vectorial de rețea; MEVA – modul evaluare amplitudine din parametru S.

În continuare vor fi caracterizate din perspectiva proiectării elementele componente ale SAAF propus și implementat.

# 4.2.2.1. Caracterizarea traductorului de intrare

Traductorul de intrare este constituit din modulul software pentru evaluarea parametrilor *S* (MEVPS). Resursa acestui modul este reprezentată de un fișier care conține lista redusă a frecvențelor (corespunzătoare unui anumit algoritm și parametrii *S* aferenți).

Așa cum rezultă și din figura 4.18, în abordarea intrare – ieșire, acestui traductor i se aplică frecvența  $f_i$  pentru care se face acordarea. Ieșirea traductorului este constituită de unul din parametrii *S* (de exemplu S<sub>11</sub>) care reprezintă pentru SAAF referința P<sub>SR</sub>.

# 4.2.2.2. Caracterizarea ansamblului Bloc de comandă (regulator) – Element de execuție

Din structura celor două componente ilustrate în figura 4.19, rezultă că trebuie determinată dependență  $\Delta h = f(\Delta P_S)$  asociată caracteristicii statice a acestui ansamblu.



Fig. 4.19 – Ansamblul bloc de comandă (regulator) – element de execuție.

La nivelul elementului de comparație EC se determină abaterea  $\Delta P_S$  conform relației:

$$\Delta P_S = P_{SR} - P_{SC} \tag{4.16}$$

unde notațiile păstrează semnificațiile din legenda figurii 4.18.

Din modul în care au fost introduși parametrii *S*, rezultă că  $\Delta P_S \in [0, 1]$ .

În ceea ce privește domeniul pentru deplasarea tijei  $\Delta h$ , acesta este impus de caracteristicile rezonatoarelor ca parte a filtrului care se acordează. După cum se va detalia în structura referitoare la testarea sistemului automat (paragraful 4.2.4), deplasarea maximă a tijei este  $|\Delta h_{max}| = 10 \text{ mm}$ .

<u>Observație</u>: S-a considerat modul din  $\Delta$ h, deoarece deplasarea tijei se poate realiza în sus sau în jos.

Pentru ansamblul regulator – element de execuție se impune prin proiectare o caracteristică statică de tip liniar, ilustrată în figura 4.20.



Fig. 4.20 – Caracteristica statică impusă pentru ansamblul BC – EE.

Panta negativă a dreptei din figura 4.20 este justificată de faptul că la creșterea abaterii tijei rezonatorului trebuie să se execute o mișcare descendentă.

Ținând cont de graficul din figura 4.20, rezultă pentru caracteristica statică a ansamblului BC – EE expresia:

$$\Delta h = 10(1 - |\Delta P_S|) \tag{4.17}$$

## 4.2.2.3. Caracterizarea elementului de execuție

Elementul de execuție este reprezentat de motorul pas cu pas<sup>26</sup> 28BYJ-48 prezentat în Anexa 11 cu driver de putere ULN2003 și șurubul care este solidar cu tija din rezonator.

Figurile 4.21 și 4.22 ilustrează două dintre componentele EE și anume: driverul și motorul pas cu pas.



*Fig.* 4.21 – *Driverul de putere ULN2003 și motorul pas cu pas din structura EE [W10].* 

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Motorul pas cu pas este un dispozitiv al cărui obiectiv este conversia impulsurile electrice în mișcări mecanice discrete.



Fig. 4.22 – Structura și înfășurările motorului pas cu pas utilizat în cadrul EE [W11].

Controller-ul NI USB 6008 utilizează porturile de ieșire digitale pentru a comanda motorul pas cu pas. Astfel, controllerul NI este utilizat ca interfață între sistemul de calcul pe care este implementat regulatorul și motorul pas cu pas (parte a elementului de execuție). În aceste condiții, regulatorul primește ca intrare o valoare numerică și generează la ieșire patru semnale digitale.

Conform specificațiilor, motorul pas cu pas realizează 64 de pași<sup>27</sup> într-o rotație completă. Motorul pas cu pas este comandat de către driver prin intermediul impulsurilor. Mișcarea este realizată de rotorul magnetic din interiorul motorului pas cu pas, care necesită 32 de impulsuri pentru un pas, ceea ce înseamnă  $32 \times 64 = 2048$  de impulsuri / rotație completă. Deoarece rezoluția este implementată la sfert de pas, se utilizează 4 impulsuri pentru un tren de impulsuri, de unde rezultă 2048 / 4 = 512 trenuri de impulsuri pentru o rotație completă.

Sintetizând cele prezentate mai sus, rezultă pentru mărimile de intrare și ieșire aferente EE (*n*, respectiv  $\Delta h$ ) domeniile de valori evidențiate în continuare:

$$n_{min} = 0$$
  
 $n_{max} = \frac{10}{0.4} \cdot 512 = 12800$  trenuri de impulsuri

respectiv  $n \in [0, 12800]$  trenuri de impulsuri

și după cum s-a văzut  $|\Delta h| \in [0, 10]$  mm.

În ceea ce privește caracteristica statică a EE, aceasta va fi *aproximată* ca fiind liniară (figura 4.23), eroarea rezultată din aproximare încadrându-se în precizia care se impune procesului de acordare a filtrului.

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Un pas este o rotație unghiulară a axului motorului la aplicarea unui impuls de comandă [B88].



Fig. 4.23 – Caracteristica statică a EE din cadrul SAAF.

Panta negativă a caracteristicii statice a EE este impusă de mișcarea descendentă pe care o execută tija la creșterea numărului de trenuri de impulsuri.

Pornind de la graficul ilustrat în figura 4.23, se obține ecuația caracteristicii statice a EE, respectiv:

$$\Delta h = 10 - \frac{1}{1280} \Delta n \tag{4.18}$$

## 4.2.2.4. Sinteza regulatorului

Regulatorul generează mărimea de comandă sub forma unor trenuri de impulsuri. Pornind de la relațiile (4.17) și (4.18) se obține legea de reglare de forma:

$$\Delta n = 12800 \cdot |\Delta P_S| \tag{4.19}$$

reprezentată grafic în figura 4.24.



Fig. 4.24 – Caracteristica statică rezultată pentru regulatorul din cadrul SAAF.

# 4.2.2.5. Caracterizarea procesului

Procesul este reprezentat de filtrul cu cavități supus acordării. Acesta este abordat împreună cu VNA, potrivit reprezentării din figura 4.25.



Fig. 4.25 – Procesul aferent SAAF reprezentat de ansamblul Filtru – VNA.

Variația frecvenței de rezonanță a filtrului la deplasarea rezonatorului este în concordanță cu relația 4.15. VNA constituie în același timp și traductor de reacție deoarece furnizează elementului de comparație EC parametrul calculat  $P_{SC}$ .

## 4.2.2.6. Traductorul de ieșire

Prezența acestui traductor este justificată de necesitatea determinării, din parametrii *S* calculați ( $P_{SC}$ ), a amplitudinilor semnalelor asociate fiecărei frecvențe  $f_i$  pentru care se execută acordarea. Acest traductor este implementat de modulul software MEVA care preia parametrul  $P_{SC}$  și determină  $A_i$  pe baza relației

$$A_i = \sqrt{Re(S_{11})^2 + Im(S_{11})^2}$$
(4.20)

pentru parametrul S<sub>11</sub>.

### 4.2.3. Implementarea sistemului automat de acordare

### 4.2.3.1. Etapele implementării

Sistemul de reglare automată utilizează două filtre și anume: un filtru etalon și un al doilea filtru care urmează să fie acordat. Datele preluate de la filtrul de referință sunt prezentate în Anexa 13. În aceste condiții, acordarea celui de-al doilea filtru presupune obținerea caracteristicii *amplitudine – frecvență* cât mai apropiată de caracteristica filtrului etalon, în limita unei precizii admise (cuantificate într-o eroare  $\varepsilon$ ). Pe baza schemei sistemului de acordare automată prezentată în figura 4.18 se parcurg pentru implementare etapele evidențiate în continuare:

<u>Etapa 1.</u> Se stabilește lista frecvențelor pe baza unei frecvențe minime, a unei frecvențe maxime și a numărului de puncte utilizate. În cazul filtrului cu cavități prezentat în

Anexa 13, frecvența de start este 14 GHz, frecvența de stop este 15.5 GHz, iar numărul total de puncte este 1001. Din cele 1001 puncte, se va selecta o listă redusă de frecvențe folosind algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte (abreviat ASF\_DMAP) propus în capitolul 3 și care s-a dovedit ca fiind algoritmul cel mai performant.

<u>Etapa 2.</u> Se extrage din Anexa 13 de către MEVPS parametrul  $S_{11}$  corespunzător frecvenței  $f_i$ , rezultând parametrul *S* de referință ( $P_{SR}$ ) care se aplică elementului de comparare EC.

<u>Etapa 3.</u> Utilizând VNA-ul se evaluează parametrul  $S_{11}$  corespunzător frecvenței  $f_i$  pentru filtrul cu cavități, rezultând parametrul *S* calculat,  $P_{SC}$ , care se aplică elementului de comparare EC.

Etapa 4. Se determină de către EC abaterea  $\Delta P_s$  cu relația (4.7).

<u>Etapa 5.</u> Dacă abaterea,  $\Delta P_s$ , este mai mare decât o limită admisă  $\varepsilon$ , atunci regulatorul, implementat software în Matlab<sup>®</sup>, generează pe baza relației (4.19) numărul de trenuri de impulsuri *n* care se aplică elementului de execuție.

<u>Etapa 6</u>. În cadrul acestei etape, corespunzător semnului abaterii  $\Delta P_s$ , tija va fi antrenată să urce sau să coboare cu  $\Delta h$  (corespunzător relației (4.18)), după cum urmează:

- dacă  $\Delta P_S > 0$ : rotația este în sens invers trigonometric (spre dreapta);
- Dacă  $\Delta P_S < 0$ : rotația este în sens direct trigonometric (spre stânga).

<u>Etapa 7</u>. VNA determină  $P_{SC}$  pe baza frecvenței  $f_e$ , obținută de la filtru ca urmare a acordării, iar MEVA calculează amplitudinea.

<u>Observație</u>:  $P_{SC}$  poate să difere de  $P_{SR}$  în limita preciziei cuantificate în eroarea  $\varepsilon$ .

Etapa 8. Procesul este reluat până la epuizarea listei cu frecvențe reduse.

<u>Etapa 9</u>. Se trasează caracteristica *amplitudine – frecvență* și procesul de acordare se încheie.

#### 4.2.3.2. Schema logică de implementare

Pe baza etapelor evidențiate anterior și a caracterizării pentru fiecare componentă SAAF a fost elaborată schema logică de implementare reprezentată în figura 4.26.



Fig. 4.26 – Schema logică pentru implementarea SAAF.

Așa cum rezultă din figura 4.26, algoritmul de reglare este aplicat pentru fiecare frecvență din lista redusă a frecvențelor obținută prin aplicarea algoritmului ASF\_DMAP. Implementarea algoritmului de reglare, care corespunde schemei logice din figura 4.26, se realizează prin parcurgerea următorilor pași:

P1. Se citește numărul N de frecvențe din lista redusă, împreună cu eroarea  $\varepsilon$  asociată preciziei, după care se inițializează variabila contor *i* cu valoarea 1.

P2. Se citește din fișierul etalon frecvența  $f_i$  și parametrul  $S_{11}$  de referință corespunzător (respectiv  $P_{SR_i}$ ).

P3. Pentru aceeași frecvență  $f_i$  se achiziționează parametrul  $S_{11}$  calculat pentru filtrul care se reglează, respectiv  $P_{SC_i}$ .

P4. Se calculează abaterea conform relației (4.16).

P5. Se testează  $| \Delta P_S |$  față de precizia  $\varepsilon$ . Algoritmul testează una dintre următoarele condiții:

- dacă |ΔP<sub>S</sub> | > ε, atunci regulatorul generează mărimea de comandă Δn care se aplică elementului de execuție<sup>28</sup> și continuă cu pasul P3;
- dacă |ΔP<sub>S</sub> / ≤ ε, atunci se testează dacă este îndeplinită condiția de oprire a algoritmului astfel:
  - dacă i < N, atunci algoritmul este reluat din pasul P1 pentru o nouă frecvență  $f_i$ , după ce s-au înscris  $f_i$  și  $P_{SC_i}$  în fișierul de ieșire;
  - > dacă i = N, atunci algoritmul se oprește.

Pentru implementarea SAAF, a fost realizată în mediul Matlab<sup>®</sup> aplicația PROG SAAF al cărui cod sursă se prezintă în Anexa 12.

# 4.2.3.3. Realizarea fizică a sistemului de acordare automată

În figurile 4.27 și 4.28 sunt reprezentate două vederi ale standului experimental realizat pentru implementarea SAAF.



Fig. 4.27 – Implementarea fizică a SAAF – vedere de ansamblu.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Dacă  $|\Delta P_S| > 0$ , se comandă rotirea spre dreapta cu  $\Delta n$  trenuri de impulsuri. Dacă  $|\Delta P_S| < 0$ , se comandă rotirea spre stânga cu  $\Delta n$  trenuri de impulsuri.



Fig. 4.28 - Implementarea fizică a SAAF – vedere laterală.

Algoritmul aferent regulatorului care îndeplinește funcții de elaborare și transmitere către elementul de execuție a comenzii [B98] este implementat software în mediul Matlab<sup>®</sup>.

Comanda este transmisă motorului pas cu pas, care este inclus în elementul de execuție, prin intermediul controllerului NI.

După cum se remarcă din figura 4.28, motorul pas cu pas este conectat printr-un cuplaj la șurubul solidar cu tija unui rezonator aferent filtrului care se acordează.

Tot în aceste figuri se remarcă prezența următoarelor componente:

- filtrul care este supus acordării (în calitate de proces);
- VNA în calitate de traductor amplasat pe calea de reacție (figura 4.18);

- motorul pas cu pas care transmite mişcarea printr-un cuplaj rigid şurubului şi prin această tijă aferentă unei cavități rezonante;
- controllerul NI care permite transmiterea comenzii de la sistemul de calcul (pe care este implementat algoritmul de reglare) la motorul pas cu pas.

# 4.2.4. Testarea sistemului automat de acordare

După integrarea SAAF și verificarea funcționalității acestuia, au fost efectuate mai multe teste care să confirme realizarea sarcinilor impuse.

Testele au presupus execuția aplicației PROG\_SAAF pentru fiecare frecvență preluată din fișierul unde acestea au fost depuse, împreună cu parametrii *S* corespunzători după aplicarea algoritmului ASF\_DMAP.

Testele au fost aplicate unui filtru cu domeniul 14 – 15.5 GHz, compus din 12 cavități a cărui imagine se prezintă în figura 4.29.



Fig. 4.29 – Filtrul cu 12 cavități rezonante utilizat pentru realizarea testelor.

Inițial, acest filtru a fost acordat manual prin procedura convențională, considerând 1001 frecvențe, devenind astfel filtru etalon, pentru care în figura 4.30 se prezintă caracteristica *amplitudine – frecvență*.



Fig. 4.30 – Caracteristica amplitudine  $A_{11}$  (corespunzătoare parametrului  $S_{11}$ ) – frecvență aferentă filtrului etalon.

În continuare se prezintă rezultatele a două teste diferențiate de precizia impusă și de locul de aplicare a comenzii generate de către regulator.

# 4.2.4.1. Rezultatele testului T<sub>1</sub>

În cadrul acestui test, pentru care eroare asociată preciziei impuse a fost  $\varepsilon = 0.03$ , s-a derulat secvența descrisă în pașii de mai jos.

**PT**<sub>1\_1</sub>. Filtrul etalon a fost dezacordat prin intervenția asupra cavității 2, aspect ilustrat în figura 4.31.



Fig. 4.31 – Filtrul parte a procesului cu evidențierea șurubului aferent cavității asupra căruia s-a intervenit în cadrul testului  $T_1$ .

 $PT_{1_2}$ . Pentru celelalte cavități a fost păstrată acordarea inițială.

PT<sub>1\_3</sub>. Filtrul astfel pregătit a fost conectat la SAAF.

**PT**<sub>1\_4</sub>. S-a lansat în execuție aplicația PROG\_SAAF pentru care la inițializare s-au înscris datele  $\varepsilon = 0.03$  și N = 400 frecvențe.

**PT**<sub>1\_5</sub>. După oprirea testului pe condiția de precizie, s-au înscris în fișierul asociat ieșirii valorile parametrilor  $P_{SCi}$ , și împreună cu frecvențele  $f_i$ .

**PT**<sub>1\_6</sub>. S-a generat caracteristica *amplitudine – frecvență* a filtrului acordat, care poate fi considerat filtru etalon.

În figura 4.32 este ilustrată caracteristica *amplitudine – frecvență* a filtrului rezultată prin execuția testului  $T_1$  (culoare albastră) cu a filtrului etalon (culoare roșie). Din această figură rezultă că filtrul a fost acordat în limita preciziei impuse, respectiv SAAF și-a realizat misiunea.



Fig. 4.32 – Caracteristicile amplitudine – frecvență rezultate în cadrul testului T<sub>1</sub> aplicat SAAF: Culoare roșie - caracteristica amplitudine – frecvență a filtrului etalon Culoare albastră - caracteristica amplitudine – frecvență a filtrului acordat în cadrul testului T<sub>1</sub>.

În ceea ce privește durata, acordarea timpului s-a realizat într-un interval de timp de circa 5 minute.

### 4.2.4.2. Rezultatele testului T<sub>2</sub>

În cadrul acestui test, pentru care eroarea impusă aferentă preciziei a fost  $\varepsilon = 0.01$ , s-a derulat o secvență asemănătoare testului T<sub>1</sub> și care conține pașii descriși în continuare.

 $PT_{2_1}$ . Filtrul etalon a fost dezacordat prin intervenția asupra joncțiunii dintre cavitatea 1 și cavitatea 2, aspect ilustrat în figura 4.33.

PT2\_2. Pentru celelalte cavități s-a păstrat acordarea inițială.

 $PT_{2_3}$ . Filtrul astfel pregătit a fost conectat la SAAF.

**PT2\_4.** S-a lansat în execuție aplicația PROG\_SAAF pentru care la inițializare s-au înscris datele  $\varepsilon = 0.01$  și N = 400 frecvențe.

**PT**<sub>2\_5</sub>. După oprirea testului pe condiția de precizie, s-au înscris în fișierul asociat ieșirii valorile parametrilor  $P_{SCi}$ , și împreună cu frecvențele  $f_i$ .

**PT**<sub>2\_6</sub>. S-a generat caracteristica *amplitudine – frecvență* a filtrului acordat care poate fi considerat filtru etalon.



Fig. 4.33 – Filtrul parte a procesului cu evidențierea joncțiunii (șurubului de cuplare) dintre cavitatea 1 și cavitatea 2 pentru care s-a aplicat testul T<sub>2</sub>.

În figura 4.34 este ilustrată caracteristica *amplitudine – frecvență* a filtrului rezultată prin execuția testului T<sub>2</sub> (culoare albastră) cu a filtrului etalon (culoare roșie).



Fig. 4.34 - Caracteristicile amplitudine – frecvență rezultate în cadrul testului T<sub>2</sub> aplicat SAAF: Culoare roșie - caracteristica amplitudine – frecvență a filtrului etalon Culoare albastră - caracteristica amplitudine – frecvență a filtrului acordat în cadrul testului T<sub>2</sub>.

Din figura 4.34 reiese că în limita preciziei stabilite s-a realizat acordarea filtrului întrun interval de timp de circa 6 minute. După cum se observă, creșterea preciziei a ridicat nivelul de acuratețe al acordării, cele două caracteristici fiind aproape identice.

# 4.3. Propunere de adaptare a sistemului de acordare automată dezvoltat pentru filtrele de microunde la filtrele de joasă frecvență

Conform celor prezentate în capitolul 1, filtrele de joasă frecvență încadrează filtre destinate procesării semnalelor cu frecvențe mai mici de 300 kHz.

În funcție de elementele constitutive ale filtrelor, acestea se clasifică în filtre pasive și filtre active, filtrele pasive fiind la rând lor divizate în următoarele categorii:

- filtre trece sus;
- filtre trece jos;
- filtre trece bandă;
- filtre oprește bandă.

La toate aceste filtre acordarea presupune, de regulă, determinarea frecvenței, respectiv a frecvențelor de tăiere.

În continuare se va exemplifica această operație pe un filtru pasiv de tip trece – jos, cu schema electrică prezentată în figura 4.35.



Fig. 4.35 – Schema electrică a filtrului trece – jos RC de ordin I. Ui – amplitudinea semnalului de intrare; Ue – amplitudinea semnalului de ieșire; R – rezistor; C – condensator.

Pentru filtrul trece jos de tip RC, frecvența practică de tăiere corespunde unei atenuări conform relatiei următoare [B99]:

$$ATF = \frac{U_e}{U_i} = 0.707 \tag{4.21}$$

unde:

ATF este atenuarea introdusă de filtru;

Ue – amplitudinea semnalului de ieșire;

Ui – amplitudinea semnalului de intrare.

Ilustrarea atenuării din relația (4.21) este prezentată în figura 4.36, din care se desprinde ideea că la frecvența de tăiere, amplitudinea semnalului de ieșire (U<sub>e</sub>) reprezintă 70.7% din valoarea amplitudinii semnalului de intrare (U<sub>i</sub>).





Pe de altă parte, cunoscând valorile componentelor pasive din structura filtrului, frecvența de tăiere se poate calcula și cu relația:

$$f_T = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4.22}$$

unde:

 $f_T$  este frecvența de tăiere;

R – rezistenţa rezistorului;

C – capacitatea condensatorului.

Figura 4.37 prezintă abordarea filtrului trece jos (FTJ) din perspectiva intrare – ieșire, considerând capacitatea C constantă.



Fig. 4.37 - Abordarea de tip intrare – ieșire a unui filtru de tip trece jos (FTJ).

În reprezentarea din figura 4.37, frecvența de tăiere poate fi determinată intervenind asupra valorii rezistenței R, astfel încât pentru filtrul RC din figura 4.35 este valabilă și schema din figura 4.38 în care rezistența este constituită dintr-un potențiometru.



Fig. 4.38 - Schema electrică a filtrului trece – jos de tip RC cu rezistență variabilă.

Ideea de bază a propunerii de Sistem Automat pentru Acordarea Filtrului Trece Jos (abreviat SAA\_FTJ), cu structura ilustrată în figura 4.39, constă în determinarea frecvenței corespunzătoare atenuării din relația (4.21).



Fig. 4.39 – Structura propusă pentru un sistem de acordare automată (SAAF) a unui filtru trece - jos (FTJ):

 $f_i - frecvenţă intrare în FTJ; f_e - frecvenţă ieşire din FTJ; Ui - tensiunea de intrare în FTJ; Ue - tensiunea de ieşire din FTJ; <math>ATF_R$  - atenuare referinţă (0.707);  $ATF_C$  - atenuare curentă calculată cu relaţia (4.21));  $\Delta ATF$  - abatere a atenuării;  $\Delta n$  - comanda (numărul de trenuri de impulsuri);  $\Delta a$  - unghiul de rotaţie al cursorului potenţiometrului; OSC - oscilator; FTJ - filtru trece jos; BC - bloc comandă (regulator); EE - element de execuţie; EC - element de comparaţie; MCA - modul pentru calculul atenuării.

În continuare se vor face câteva referiri la elementele utilizate în cadrul structurii reprezentate în figura 4.39.

Ca şi în cazul SAAF pentru microunde, se impune pentru ansamblul BC – EE caracteristica statică liniară de forma celei ilustrate în figura 4.20.

- În ceea ce privește EE, acesta este reprezentat de un potențiometru rotativ cu caracteristică liniară.
- Ținând cont de aceste precizări, pentru regulator rezultă o caracteristică liniară de tipul celei prezentate în figura 4.24.

Evident, valorile numerice din caracteristicile statice aferente SAAF pentru microunde, se adaptează în mod corespunzător pentru SAA\_FTJ. Modulul pentru calculul atenuării (MCA) implementează relația (4.21).

Sistemul propus este un sistem cu acțiune după abatere, care funcționează în regim de stabilizare, respectiv referința  $ATF_R$  se menține constantă la valoarea 0.707.

În aceste condiții, frecvența  $f_i$  și tensiunea  $U_i$  pot fi interpretate ca perturbații, conform variantei de schemă a SAA\_FTJ din figura 4.40.



Fig. 4.40 – Schema de reglare cu acțiune după abatere pentru FTJ în care frecvența  $f_i$  și tensiunea  $U_i$ pot fi interpretate ca perturbații.

Reprezentarea din figura 4.40 pune mai bine în evidență rolul acestui modul de traductor amplasat pe calea de reacție.

Implementarea acestei structuri se poate realiza prin adaptarea corespunzătoare a schemei logice din figura 4.26 și a aplicației PROG\_SAAF aferente sistemului automat pentru acordarea filtrului de microunde.

### 4.4. Concluzii ale capitolului 4

În acest capitol au fost prezentate rezultatele experimentale privind analiza comparativă dintre algoritmul clasic de selecție a frecvențelor de la un analizor vectorial de rețea (VNA) și algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte (abreviat

*ASF\_DMAP*). Rezultatele experimentale au arătat îmbunătățiri semnificative, oferite de ASF\_DMAP care privesc reducerea numărului de frecvențe evaluate și implicit a timpului de achiziție.

În cea de-a doua parte a capitolului 4 s-au prezentat contribuțiile privind dezvoltarea unui sistem de acordare automată a filtrelor de înaltă frecvență al cărui obiectiv principal a fost reducerea timpului necesar procesului de acordare. Rezultatele experimentale au demonstrat viabilitatea sistemului automat dezvoltat, concretizată în realizarea sarcinilor impuse.

Pentru demonstrarea viabilității SAAF au fost realizate două teste (pe un filtru cu domeniul 14 - 15.5 GHz) diferențiate de locul de aplicare a mărimii de execuție (rezonator sau cuplaj). Algoritmul de reglare a fost aplicat pentru o listă redusă de frecvențe cu 20% față de lista inițială de frecvențe. Rezultatele obținute au demonstrat că sistemul automat de acordare îndeplinește obiectivul principal de reducere a timpului de achiziție a frecvențelor și de evaluare a parametrilor *S* de la un analizor vectorial de rețea.

Cea de-a treia parte a capitolului 4 conține o propunere de adaptare a sistemului de acordare automată propus pentru un filtru de joasă frecvență.

# Capitolul 5. Concluzii generale, contribuții, diseminarea rezultatelor și direcții viitoare de cercetare

Prima parte a capitolului cinci prezintă o sinteză a concluziilor parțiale evidențiate la sfârșitul fiecărui capitol. Cea de-a doua parte a acestui capitol este dedicată prezentării sistematizate a contribuțiilor din prezenta teză de doctorat. În secțiunea a treia sunt prezentate publicațiile autoarei în care au fost diseminate rezultatele cercetărilor realizate pe parcursul stagiului doctoral. În ultima parte a capitolului cinci sunt evidențiate câteva posibile direcții de continuare a cercetărilor inițiate în prezenta teză de doctorat.

### 5.1. Concluzii generale

Tehnologiile de vârf ale secolului XXI au printre suporturile semnificative, utilizarea semnalelor de ultraînaltă frecvență în realizarea de aplicații specifice domeniilor spațial, militar, civil, etc. Aceste tehnologii au condus la o diversificare pe de-o parte a dispozitivelor cu microunde utilizate pe scară largă, iar pe de altă parte la o extindere a domeniului de lucru al frecvențelor (peste 1 THz).

Având în vedere aceste aspecte, în primul capitol al prezentei teze de doctorat a fost realizată o introducere în domeniul microundelor, unde s-a pus în evidență faptul că semnalele utilizate pentru microunde operează în domeniul frecvențelor 300 MHz – 300 GHz. Din investigațiile realizate, a rezultat faptul că în domeniul microundelor comportamentul dispozitivelor poate fi analizat cu bune rezultate prin intermediul caracteristicilor *parametri S – frecvență*. Operația de evaluare a parametrilor *S* se realizează în cadrul analizoarelor vectoriale de rețea (VNA). Din aceste considerente au fost detaliate aspecte privind parametrii *S* și analizoarele vectoriale de rețea. De asemenea, a fost prezentat procesul de calibrare și măsurare folosind un VNA. În plus, a fost exemplificat acest proces pentru un filtru trece-bandă pe un VNA de tip Vector Star<sup>®</sup> produs de compania Anritsu. A fost detaliată fiecare etapă, începând de la prezentarea kit-ului de calibrare până la obținerea rezultatelor măsurărilor și reprezentarea grafică a acestora.

Cel de-al doilea capitol a fost dedicat, în primul rând, prezentării factorilor care influențează viteaza de măsurare a unui VNA, cei mai importați fiind: *modalitatea de conectare prin porturile USB sau Ethernet, numărul de dispozitive conectate, viteza de transfer a conexiunii utilizate, performanțele sistemului de calcul pe care se realizează* 

procesarea, numărul de baleieri ale domeniilor de frecvențe setate de utilizator și numărul de puncte pentru care se realizează măsurările. În al doilea rând, au fost evidențiate vitezele scăzute și intervalele de timp mari necesare măsurărilor prin implementarea în mediul de programare QT<sup>®</sup> a unei aplicații care comunică cu un dispozitiv VNA. Sistemul de operare folosit a fost Raspbian, iar sistemul de calcul a fost reprezentat de un dispozitiv Raspberry Pi. Rezultatele au scos în evidență intervalul de timp foarte mare necesar unei măsurări de unde a derivat și principalul obiectiv al prezentei teze. În contextul titlului tezei, îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea vizează, cu precădere, reducerea timpului de lucru necesar realizării măsurărilor și implicit de obținere a caracteristicilor *amplitudine – frecvență*.

Pentru reprezentarea datelor achiziționate cu ajutorul VNA-urilor au fost descrise mai multe metode interpolare, între care cea spline cubică. De asemenea, a fost prezentată metoda de aproximarea corespunzătoare minimizării sumei celor mai mici pătrate. Ulterior, s-a realizat un studiu de caz folosind un număr limitat de eșantioane ale unor măsurări pentru 400 de frecvențe realizate asupra unui filtru din domeniul microundelor, cu domeniul de lucru în frecvență 14 – 15.5 GHz. Implementarea s-a făcut în mediul Matlab<sup>®</sup>, iar pe baza rezultatelor obținute s-a realizat un studiu comparativ între aceste metode. Rezultatele studiului au indicat avantajele utilizării interpolării spline cubice în detrimentul aproximării bazate pe metoda celor mai mici pătrate.

Din investigațiile realizate a reieșit că alte abordări privind metodele de interpolare au în vedere găsirea unei distribuții optime a eșantioanelor (frecvențelor) în domeniul de lucru, astfel încât imaginea funcției obținute cu un număr redus de eșantioane să se apropie cât mai mult de imaginea funcției originale. Astfel, au fost prezentate două metode de referință pentru domeniul microundelor, respectiv: metoda *rational – fitting* și metoda *vector – fitting*.

Al treilea capitol al tezei de doctorat s-a concentrat, pe de o parte pe descrierea a cinci algoritmi (propuși sau îmbunătățiți de autoare) al căror obiectiv a fost reprezentat de creșterea vitezei de lucru a VNA-urilor și implicit de scurtare a timpului de procesare, iar pe de altă parte, pe analiza comparativă a performanțelor specifice acestor algoritmi.

Pentru fiecare dintre algoritmi s-au prezentat: *ilustrarea principiului metodei, etapele aplicării și validarea performanțelor prin efectuarea a câte două teste diferite.* 

Cei cinci algoritmi au încadrat:

• algoritmul de selecție a frecvențelor folosind distanța euclidiană (APS\_DE);

- algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe un pas de explorare variabil (APS\_PEV);
- algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe punctele de extrem (APS\_PE);
- algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive (APS\_DMAP);
- algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe interpolarea rațională îmbunătățită (APS\_IRI).

În etapa de validare, performanțele individuale ale algoritmilor au fost analizate folosind următoarele criterii propuse:

- numărul redus de frecvențe rezultat;
- eroarea relativă pe intervale;
- eroarea relativă globală;
- timpul de execuție necesar rulării algoritmului.

Analiza comparativă a celor cinci algoritmi s-a realizat pentru patru dispozitive de test (DUT) pe baza a trei indicatori propuși de către autoare și anume:

- indicatorul procentual de calitate a erorii;
- indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție;
- indicatorul mediu ponderat.

Rezultatele analizei comparative au evidențiat că performanțele *algoritmului de* selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte (ASF\_DMAP) sunt cele mai bune.

Cel de-al patrulea capitol al tezei conține în prima parte rezultatele experimentale comparative între achiziția în timp real a datelor de la un analizor vectorial de rețea prin metoda convențională (clasică) și achiziția în timp real a datelor folosind algoritmul ASF\_DMAP. Pentru analiza comparativă au fost propuși următorii indicatori:

- indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte;
- indicatorul procentual de calitate al timpului de achiziție.

În a doua parte a capitolului 4, a fost propus un sistem de acordare automată a unui filtru cu cavități specific domeniului microundelor (SAAF). Scopul SAAF a fost în primul rând reprezentat de obținerea unei caracteristici amplitudine – frecvență pentru filtrul acordat similară caracteristicii amplitudine – frecvență etalon, în limita unei toleranțe admisibile. În al doilea rând s-a urmărit scăderea timpului necesar procesului de acordare a filtrului.

Performanțele SAAF au fost validate prin două teste aplicate unui filtru domeniul de lucru 14 – 15.5 GHz realizat cu cavități rezonante. Algoritmul de reglare a presupus utilizarea algoritmului ASF\_DMAP pentru realizarea listei reduse de frecvențe. Rezultatele obținute în urma testelor au demonstrat că sistemul automat de acordare realizează obiectivele care au stat la baza proiectării acestuia.

Capitolul 4 se încheie cu o propunere de adaptare a SAAF dezvoltat pentru filtre de înaltă frecvență la acordarea filtrelor de joasă frecvență.

#### 5.2. Contribuții originale ale tezei de doctorat

Teza de doctorat conține un număr important de contribuții ale autoarei referitoare la dezvoltarea de algoritmi destinați achiziției și prelucrării parametrilor *S* cu aplicații în îmbunătățirea Analizoarelor Vectoriale de Rețea (VNA). În cele ce urmează se prezintă sistematizat contribuțiile semnificative referitoare la problematica abordată în teza de doctorat.

1. A fost realizat un studiu sintetic de literatură care a permis autoarei însușirea terminologiei specifice domeniului microundelor și identificarea problemelor generate de viteza scăzută de lucru a VNA-urilor. În acest context a fost identificat stadiul actual al cercetărilor în literatura de specialitate privind posibilitatea îmbunătățirii vitezei de lucru a acestor echipamente.

2. A fost selectat și ulterior utilizat formalismul parametrilor *S* pentru analiza comportamentului în frecvență a dispozitivelor destinate domeniului microundelor prin intermediul caracteristicilor amplitudine – frecvență.

3. A fost prezentat procesul de calibrare și măsurare cu implicarea unui VNA. Au fost realizate pe baza mai multor studii teste de viteză pentru a demonstra necesitatea creșterii vitezei de lucru a acestor dispozitive.

4. S-a propus și s-a implementat înlocuirea sistemului de calcul utilizat pentru postprocesarea datelor achiziționate de la un VNA cu un dispozitiv de tip Raspberry Pi care oferă avantajele costului și dimensiunilor reduse.

5. Pornind de la fundamentele estimării unei funcții pe baza unor eșantioane ale acesteia, s-a stabilit prin intermediul unui studiu de caz oportunitatea utilizării metodei de interpolare *spline cubică* pentru domeniul dispozitivelor aferente microundelor.

6. Au fost identificați în literatura de specialitate algoritmi cum ar fi *Rational fitting* și *Vector fitting* destinați îmbunătățirii vitezei de lucru a VNA-urilor și s-au demonstrat neajunsurile acestora pentru frecvențe specifice domeniului microundelor.

7. Au fost formulate obiectivele asociate îmbunătățirii performanțelor VNA după cum urmează:

- reducerea numărului de frecvențe pentru care se vor realiza măsurări și implicit scurtarea timpului de selecție a frecvențelor pentru numărul redus de frecvențe obținut;
- păstrarea consistenței informaționale prin identificarea tuturor spike-urilor.

8. În vederea atingerii obiectivelor formulate, au fost dezvoltați și testați, în mediul Matlab<sup>®</sup>, patru algoritmi bazați pe diferite metode de alegere a frecvențelor pentru care s-au realizat măsurări.

9. A fost îmbunătățit, implementat și testat algoritmul *Rational fitting* pentru care în etapa de analiză au fost identificate o serie de neajunsuri (limite).

10. Au fost propuși indicatorii:

- indicatorul procentual de calitate a erorii;
- indicatorul procentual de calitate a timpului de execuție;
- indicatorul mediu ponderat al celor doi indicatori,

prin intermediul cărora să poată fi evaluate și comparate performanțele algoritmilor dezvoltați.

11. A fost dezvoltată aplicația MAT\_ASF\_COMPARE în mediul Matlab<sup>®</sup> care a permis o comparație între algoritmul convențional (clasic) care realizează achiziția parametrilor *S* de la un VNA (abreviat ASF\_CLASIC) și un algoritm propus de către autoare identificat ca având cele mai bune performanțe, respectiv: *algoritmul de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între funcții polinomiale și funcții liniare între fiecare două puncte consecutive (abreviat ASF\_DMAP).* 

12. Pentru analiza comparativă a performanțelor ASF\_CLASIC și ASF\_DMAP au fost propuși indicatorii:

- indicatorul procentual de reducere a numărului de puncte;
- indicatorul procentual de calitate al timpului de achiziție.

Rezultatele analizei au demonstrat superioritatea netă a ASF\_DMAP comparativ cu ASF\_CLASIC.

13. A fost proiectat și implementat un sistem automat (SAAF) destinat acordării unui filtru de înaltă frecvență cu cavități. Rezultatele implementării au demonstrat funcționalitatea sistemului și au confirmat performanțele ASF\_DMAP.

14. A fost propusă adaptarea sistemului automat pentru acordarea filtrelor de înaltă frecvență la acordarea filtrelor specifice frecvențelor joase.

# 5.3. Diseminarea rezultatelor cercetării

Rezultatele obținute de autoare în cadrul cercetărilor efectuate pe parcursul studiilor universitare de doctorat au fost diseminate în lucrări științifice publicate sau susținute. Între lucrările științifice publicate, un loc aparte revine celor incluse în volumele indexate Clarivate Analytics - Conference Proceedings Citation Index (fost ISI Proceedings).

În continuare este prezentată lista cu lucrări a cărei tematici este în contextul tezei de doctorat.

# A. Lucrări publicate în volume indexate Clarivate Analytics - Conference Proceedings Citation Index (fost ISI Proceedings)

A.1. Roşca C.M., Paraschiv N., *Frequency Sampling Algorithm Applied in Microwave Measurements*, 21st International Conference on System Theory, Control and Computing, October 19 - 21, 2017, Electronic ISBN: 978-1-5386-3842-2, USB ISBN: 978-1-5386-3841-5, Print on Demand(PoD) ISBN: 978-1-5386-3843-9 Sinaia, Romania, pp. 328-333, DOI: 10.1109/ICSTCC.2017.8107055 https://ieeexplore.ieee.org/document/8107055/

A.2. **Roşca C.M.,** Paraschiv N., *Frequency sampling algorithm applied in microwave measurements based on step – size control method*, ECAI Proceedings, **8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence**, 30 June - 2 July, 2016, Electronic ISBN: 978-1-5090-2047-8, DVD ISBN: 978-1-5090-2044-7, Print on Demand(PoD) ISBN: 978-1-5090-2048-5, Ploiești, Romania, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ECAI.2016.7861104

https://ieeexplore.ieee.org/document/7861104/

A.3. Roşca C.M., Paraschiv N., Increased speed in microwave measurements based on spline interpolation model, 13th International Conference on Development and Application Systems (DAS), 19-21 May 2016, Electronic ISBN: 978-1-5090-1993-9, DVD ISBN: 978-1-5090-1992-2, IEEE, Suceava, Romania, pp.166-172, DOI: 10.1109/DAAS.2016.7492567

https://ieeexplore.ieee.org/document/7492567/

A.4. **Roșca C.M.**, Rădulescu G., *Reduced time microwave filter tuning*, ECAI Proceedings, **7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence**, 25-27 June, 2015, Electronic ISBN: 978-1-4673-6647-2, Print ISBN: 978-1-4673-6646-5, DVD ISBN: 978-1-4673-6645-8, București, Romania, pp. SSS-9-SSS-12, DOI: 10.1109/ECAI.2015.7301197 https://ieeexplore.ieee.org/document/7301197/

# B. Lucrări publicate în reviste indexate în baze de date internaționale

B.1. **Roșca C.,** *Vector Network Analyzer monitoring system using Raspberry PI*, Petroleum-Gas University of Ploiesti Bulletin, Vol. LXX, Technical Series no.1/2018, ISSN 1224-8499, Ploiești, Romania.

B.2. Roșca C., Improved Rational Interpolation Model for Microwave Measurements, Petroleum-Gas University of Ploiesti Bulletin, Vol. LXIX, Technical Series no.4/2017, ISSN 1224-8499, Ploiești, Romania.

### C. Lucrări prezentate la conferințe indexate IEEE

C.1. Roșca C.M., Paraschiv, N., *Frequency sampling algorithm applied in microwave measurements based on extreme points*, 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, 28 - 30 June, 2018, Iași, Romania, în curs de apariție http://ecai.ro/

### D. Lucrări acceptate pentru susținere la conferințe indexate IEEE

D.1. Roșca C.M., Paraschiv N., *Comparative analysis among frequency sampling algorithm applied in microwave measurements*, **22nd International Conference on System Theory, Control and Computing,** October 10 - 12, 2018, Sinaia, România, în curs de apariție http://www.icstcc.ugal.ro/2018/index.php

## 5.4. Direcții posibile de continuare a cercetărilor

Evoluția tehnologică previzibilă din domeniul dispozitivelor pentru microunde va conduce în viitor la un interes tot mai mare privind îmbunătățirea continuă a analizoarelor vectoriale de rețea, precum și la perfecționarea metodelor de achiziție și procesare a parametrilor *S*. De asemenea, se impune necesitatea creșterii gradului de automatizare a procesul de acordare a filtrelor de microunde.

În cele ce urmează vor fi prezentate principalele posibile direcții de continuare a cercetărilor care au făcut obiectul prezentei teze de doctorat

- D1. Extinderea sistemului automat dezvoltat, pe un sistem multiprocesor care să asigure acordarea simultană pe toate cavitățile filtrelor cu cavități rezonatoare.
- D2. Explorarea posibilităților de utilizare a rețelelor neuronale pentru dezvoltarea unui sistem automat de acordare a filtrelor.
- D3. Utilizarea tehnicilor specifice inteligenței artificiale pentru elaborarea unor modele matematice capabile să testeze dispozitive specifice domeniului microundelor prin minimizarea numărului de frecvențe analizate.

D4. Implementarea pe FPGA-ul VNA-ului a *algoritmului de selecție a frecvențelor bazat pe diferențe maxime între aproximări liniare și aproximări polinomiale pentru același număr de puncte* (ASF\_DMAP) pentru utilizarea la nivel industrial.

# **Bibliografie**

- B1. Golio, J., Golio, M., *RF and Microwave Passive and Active Technologies*, CRC Press, 2007.
- B2. Liao, S.Y., *Microwave devices and circuits*, Prentice Hall, 1996.
- B3. Sun, H., Lens Design: A Practical Guide, CRC Press, 2016.
- B4. Golio, M., Golio., J., *RF and Microwave Circuits, Measurements, and Modeling*, CRC Press, 2007.
- B5. Mateescu, A., Neculai, D, *Semnale și circuite de telecomunicații*, Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
- B6. Ferrero, A., Sayed, M., Teppati, V., *Modern RF and Microwave Measurement Techniques*, Cambridge University Press, 2013.
- B7. Rulea, G., Tehnica microundelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- B8. Lojewski, G., *Linii de transmisiuni pentru frecvențe înalte*, Editura Tehnică, București, 1998.
- B9. Pozar, D.M, *Microwave Engineering*, Wiley, 2012.
- B10. Naftaly, M., *Terahertz Metrology*, Artech House, 2015.
- B11. Bianchi, G., Sorrentino, R., Microwave and RF Engineering, Wiley, 2011.
- B12. Lancaster, D., Active filter cookbook, Howard W. Sams & Co., Inc., 1975.
- B13. Ștefănescu, S., Filtre de înaltă frecvență și circuite, Editura Tehnică, București, 1989.
- B14. Misra, D.K., *Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits: Analysis and Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- B15. Lewandowski, A., *Multi-frequency approach to vector network analyzer scattering parameter measurements*, Ph. D. Thesis, Faculty of Electronics and Information Systems, Warsaw University of Technlogy, 2010.
- B16. Dunsmore, J.P., Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques, Wiley, 2012.
- B17. Müller, M., Derickson, D., *Digital Communications Test and Measurement: High-Speed Physical Layer Characterization*, Prentice Hall, 2007.
- B18. Jenkins, C.H.M., *Progress In Astronautics and Aeronautics: Gossamer Spacecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2001.
- B19. Dobrowolski, J.A., *Microwave Network Design using the scattering matrix*, Artech House, 2010.
- B20. Wong, K., *Network Analyzer Calibrations Yesterday, Today and Tomorrow*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2008.
- B21. Laskar, J, Chakraborty, S., Pham, Anh-V, Tantzeris, M.M., Advanced Integrated Communication Microsystems, Wiley-IEEE Press, 2009.

- B22. Grecea, C., *Teoria erorilor de măsurare*, Suport de curs., Facultatea de Construcții, Specializarea Măsurători Terestre și Cadastru.
- B23. Lopez-Benitez, M., Casadevall, F., A Radio Spectrum Measurement Platform for Spectrum Surveying in Cognitive Radio, 7th International ICST Conference, TridentCom 2011, Shanghai, China, April 17-19, 2011, pp.59-74.
- B24. Anritsu, VNA Master MS202xC and MS203xC Product Brochure.
- B25. Mitran, S., Zancu, S., Berbente, C., Metode numerice, Editura Tehnică, 1997.
- B26. Wu K.-L., D. G. Fang D. G Ding K. Y., *A broad-band adaptive frequency-sampling approach for microwave circuit EM simulation exploiting Stoer-Buhrsch algorithm*, in IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, pp. 928-934, 2003.
- B27. Adve, R.S., Sarkar, T.K., Rao. S.M., Miller, E.K., Pflug, D.R., *Application of the Cauchy method for extrapolating/interpolating narrow-band system responses*, in IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 45 pp. 837-845 May 1997..
- B28. Meyer, P., Lehmensiek, R., Creating accurate multivariate rational interpolation models of microwave circuits by using efficient adaptive sampling to minimize the number of computational electromagnetic analyses., IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2001.
- B29. Meyer, P., Lehmensiek, R., An efficient adaptive frequency sampling algorithm for model-based parameter estimation as applied to aggressive space mapping, Microwave and Optical Technology Letters, 1999.
- B30. Meyer, P., Lehmensiek, R., *Creating accurate multivariate rational interpolation of microwave circuits by using efficient adaptive sampling to minimize the number of analyses*, in IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, pp. 1419-1430, 2001.
- B31. Ureel, J., Fache, N., De Zutter, D., Dhaene, T., *Adaptive frequency sampling algorithm for fast and accurate S -parameter modeling of general planar structure*, in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1427-1431, 1995.
- B32. Ingber, M. S., Brebbia, C. A., Using adaptive frequency sampling for more efficient determination of broad band transfer functions, in Boundary Element Technology VII MA Boston:Comput. Mech. Publications pp. 745-756 1992.
- B33. Parker, P. J., Bitmead, R. R., *Adaptive frequency response identification in H*∞, in IEEE Conf. Decis. Contr. pp. 348-353 1987.
- B34. Živanović R., *Rational approximation of frequency responses via singular value decomposition*, in Control and Automation (MED) 2016 24th Mediterranean Conference on, pp. 344-349, 2016.
- B35. Jafari, M., Hosseini, M.M., *An extended rational interpolation method*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2007.
- B36. Gustavsen, B., Semlyen, A., *Rational approximation of frequency domain responses* by vector fitting, Power Delivery, IEEE, 2002.
- B37. Grivet-Talocia, S., Improving the Convergence of Vector Fitting for Equivalent Circuit Extraction From Noisy Frequency Responses, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2006.

- B38. Dhaene, T., Automated Fitting and Rational Modeling Algorithm for EM-Based S-Parameter Data, Springer, 2002.
- B39. Rosca, C.M., Paraschiv, N., *Frequency sampling algorithm applied in microwave measurements*, in 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, 2017.
- B40. Robertson, I.D., Lucyszyn, S., RFIC and MMIC Design and Technology, IET, 2001.
- B41. Maas, S.A., Nonlinear Microwave and RF Circuits, Artech House Publishers, 2003.
- B42. Agilent Technologies, *Exploring the architectures of network analyzers*, Application note AN 1287-2, 2000.
- B43. Leuchtmann, P., Ruefenacht, J., Vahldieck, R., Hoffmann, J., *A stable Bayesian vector network analyzer calibration algorithm*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009.
- B44. Lefteriu, S, *New approaches to modeling multi port scattering parameters*, Rice University, ProQuest, 2009.
- B45. Ralston, A., Rabinowitz, P., *A first course in numerical analysis*, McGraw Hill Book Company, 1978.
- B46. EFY Enterprises Pvt Ltd, *Electronics for You*, April 2015.
- B47. Fleisch, D., Kinnaman, L., A Student's Guide to Waves, Cambridge University Press, 2015
- B48. Rosca, C.M., Radulescu, G., *Reduced time microwave filter tuning*, in 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), București, 2015.
- B49. Rosca, C.M., Paraschiv, N., *Frequency sampling algorithm applied in microwave measurements based on step-size control method*, in 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, 2016.
- B50. Cheng, C., Jiang, Y, Sun Q., *Spatially distributed sampling and reconstruction of high-dimensional signals*, in International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA), 2015.
- B51. Abacherli R., Mattes, M., Suter, E., Mosig, J.R., *Combining the Genetic Algorithm Approach and the Model-Based Parameter Estimation into an Adaptive Frequency Sampling Algorithm*, in Microwave Conference 31 st European, 2001.
- B52. Devabhaktuni, V. K., Zhang, Q.-J., *Neural Network Training-Driven Adaptive Sampling Algorithm for Microwave Modeling*, in Microwave Conference 2000. 30th European, 2000.
- B53. Mishra, R.K., Patnaik, A., *ANN techniques in microwave engineering*, in IEEE Microwave Magazine, 2000.
- B54. Ismail, M. A., Rayas-Sanchez, J. E., Zhang, Q.-J., Bandler, J. W., *Neuromodeling of microwave circuits exploiting space-mapping technology*, in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999.
- B55. Markovic, V.V., Marinkovic, Z.D., ANN for noise estimation of microwave FETs from S-parameters, in 9th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, 2008.

- B56. Michalski, J.J., Kacmajor, T., *Principal component analysis in application for filter tuning algorithm*, in Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Integration Technologies (IMWS), 2011.
- B57. Xiao, S., Wei, Y., Guo, Y., *A novel rational approximation macromodeling algorithm for microwave networks characterized by frequency-sampled data*, in Microwave Conference Proceedings, 2005.
- B58. Karami, H. R., Dehkhoda, P., Paolone, M., Rachidi, F., Sheshyekani, K., *Application of the Matrix Pencil Method to Rational Fitting of Frequency-Domain Responses*, in IEEE Transactions on Power Delivery, 2012.
- B59. Rosca, C.M., Paraschiv, N., *Frequency sampling algorithm applied in microwave measurements based on extreme points*, in 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence.
- B60. Pereda, J. A., Herrera, A., Grande, A., Vegas, A., Gonzalez, O., *Combining the FDTD Method and Rational-Fitting Techniques for Modeling Active Devices Characterized by Measured S-Parameters*, in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007.
- B61. Avolio, G., Schreurs, D., Dhaene, T., Crupi, G., Knockaert, L., Deschrijver, D., *Microwave small-signal modelling of FinFETs using multi-parameter rational fitting method*, in Electronics Letters, 2011.
- B62. Cangellaris, A.C., Woo, A., *Passive Rational Function Fitting of a Driving-Point Impedance from Its Real Part*, in IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects, 2006.
- B63. Dhaene, T., Deschrijver, D., *Rational Fitting of S-Parameter Frequency Samples With Maximum Absolute Error Control*, in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010.
- B64. Cangellaris, A.C., Moon, S.-J., *Rational Function Fitting of Electromagnetic Transfer Functions from Frequency-Domain and Time-Domain Data*, in Microwave Symposium Digest 2006. IEEE MTT-S International, 2006.
- B65. Cangellaris, A.C., Woo, A.Y., *Real-Part Sufficiency and Its Application to the Rational Function Fitting of Passive Electromagnetic Responses*, in Microwave Symposium 2007 IEEE/MTT-S International, 2007.
- B66. Semlyen, A., Gustavsen, B., *Rational approximation of frequency domain responses* by vector fitting, in IEEE Transactions on Power Delivery, 1999.
- B67. Liao, C-K., Chang. C-Y., Lin, J., A Vector-Fitting Formulation for Parameter Extraction of Lossy Microwave Filters, in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007.
- B68. Dhaene, T., Deschrijver, D., *Macromodeling of microwave structures based on noisy frequency-domain data*, in International Conference on Microwaves Radar Wireless Communications 2006, 2006.
- B69. Rosca, C.M., Paraschiv, N., *Increased speed in microwave measurements based on spline interpolation model*, in International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2016.
- B70. Weigel, R., Neumayer, R., *Network-parameter-based modeling in microwave design*, in 15th International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communications, 2004.
- B71. Gheorghe, A.G., Nitescu, M., Florea, A., Llopis, O., Taras, P., Constantinescu, F., *Parameter Identification for Nonlinear Circuit Models of Power BA W Resonator*, in Advances in Electrical and Computer Engineering, 2011.
- B72. Degroot, D.C., Gupta, K.C., Jargon, J.A., *Frequency-Domain Models for Nonlinear Microwave Devices Based on Large-Signal Measurements*, in Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2004.
- B73. Cuilan, M., Aimin, Y., Qiuna, Z., Jingguo, Q., Dongmei, L., *A comparative study of some rational interpolation algorithms and its application*, in International Conference on Test and Measurement, 2009.
- B74. Forgo, A., Stotsky A., *Recursive spline interpolation method for real time engine control applications*, in European Control Conference (ECC), 2003.
- B75. Pickerd, J., Tan, K., *Interpolation procedure for cascading S-parameters to prevent aliasing*, in 11 th International Conference on Electronic Measurement Instruments, 2013.
- B76. Rosca, C.M., Improved Rational Interpolation Model for Microwave Measurements, Petroleum-Gas University of Ploiesti Bulletin, Vol. LXIX, Technical Series no.4/2017, ISSN 1224-8499, Ploiești, Romania.
- B77. Duan, Y., Hesler, J.L., *Modular VNA Extenders for Terahertz Frequencies*, 20th International Symposium on Space Terahertz Technology Charlottesville, 2009.
- B78. Dessouki, A. A. S., Abdallah, R.M., Aly, M. H., *A Simplified Analytical Technique for High Frequency Characterization of Resonant Tunneling Diode*, in Advances in Electrical and Computer Engineering, 2014.
- B79. Pramanick, P., Bhartia, P., *Modern RF and Microwave Filter Design*, Artech House, 2016.
- B80. Natarajan, D., A Practical Design of Lumped, Semi-Lumped and Microwave Cavity Filters, Springer, 2013.
- B81. Giurgiutiu, V., Lyshevski, S.E., *Micromechatronics: Modeling, Analysis, and Design with MATLAB*, Second Edition, CRC Press, 2011.
- B82. Walker, J.L.B., *Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers*, Cambridge University Press, 2012.
- B83. Smith, B., Carpentier, M.H., *The Microwave Engineering Handbook: Microwave systems and applications*, Springer Science & Business Media, 1993.
- B84. Vittoria, C., *Elements of Microwave Networks Basics of Microwave Engineering*, World Scientific, 1998.
- B85. Collin, R.E., *Foundations for Microwave Engineerings*, 2nd Edition.: Wiley India Pvt. Limited, 2007.
- B86. Ed da Silva, High Frequency and Microwave Engineering, Elsevier, 2001.

- B87. Rosca, C.M., Paraschiv, N., *Comparative analysis among frequency sampling algorithm applied in microwave measurements*, International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2018, în curs de publicare
- B88. Busuioc, D., Safavi-Naeini, S., Borji, A., ANN and EM based models for fast and accurate modeling of excitation loops in combline-type filters, 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002.
- B89. Brandt, J., Arndt, F., *MM/FE CAD and optimization of rectangular combline filters*, 32nd European Microwave Conference, 2002.
- B90. Natarajan, D., A Practical Design of Lumped, Semi-Lumped and Microwave Cavity Filters, Springer, 2013.
- B91. Whitaker, J.C., *The Electronics Handbook*, CRC Press, 1996.
- B92. Golio, M., The RF and Microwave Handbook, CRC Press, 2000.
- B93. Jarry, P., Beneat, J., *Design and Realizations of Miniaturized Fractal Microwave and RF Filters*, John Wiley & Sons, 2009.
- B94. Shoaib, N., Vector Network Analyzer (VNA) Measurements and Uncertainty Assessment, Springer, 2017.
- B95. Gonen, T., Electrical Machines with MATLAB®, Second Edition, CRC Press, 2011.
- B96. Calcutt, D., Cowan, F., Parchizadeh, H., 8051 Microcontroller: An Applications Based Introduction, Elsevier, 2003.
- B97. Hughes, J.M., Arduino: A Technical Reference: A Handbook for Technicians, Engineers, and Makers, O'Reilly Media, Inc, 2016.
- B98. Paraschi, N., Introducere în știința sistemelor și a calculatoarelor, Editura Universității Petrol Gaze din Ploiești, 2011.
- B99. Isar, D., Isar, A., Filtre, Editura Politehnica, Timişoara, 2003.

### Webografie

- W1. National Instruments, *Fundamentals of Network Analysis*, 2016 [Online]. <u>http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction to Network Analyzer Measureme</u> <u>nts.pdf</u>
- W2. Rohde Schwarz Technology. Oscilloscope innovation. Measurement confidence. [Online]. <u>http://rohde-schwarz-</u> scopes.com/designcon/VNA%20fundamentals%20primer.pdf
- W3. Agilent Technologies. Agilent. [Online]. <u>http://www.keysight.com/upload/cmc\_upload/All/BTB\_Network\_2005-</u> <u>1.pdf?&cc=RO&lc=eng</u>
- W4. Mathworks. Anritsu Instruments and MATLAB, 2016, [Online]. https://www.mathworks.com/products/instrument/supported/anritsu.html
- W5. Anritsu, High Performance Handheld Vector Network Analyzers, <u>https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/video-gallery/high-performance-vector-network-analyzers</u>
- W6. National Instruments, USB Instrument Control Tutorial, 2018. [Online]. http://www.ni.com/tutorial/4478/en/
- W7. \*\*\*, *The Radioman's Manual of RF Devices: Principles And Practices*, [Online]. https://www.globalspec.com/reference/75258/203279/chapter-8-coaxial-cavity-filters
- W8. Academia forțelor aeriere "Henri Coandă" din Brașov, *Microunde Note de curs*, www.afahc.ro/ro/facultate/cursuri/microunde\_note\_curs.pdf
- W9. Boyer de la Giroday, A., Automatic fine tuning of cavity filters, Master thesis, Department of Computer Science, Linköping University, 2016 [Online]. <u>https://pdfs.semanticscholar.org/ae51/dd4819b2e61e39add22ca017298c9b5c0062.pdf</u>
- W10. MathWorks, Control Stepper Motor using Digital Outputs [Online]. https://www.mathworks.com/help/daq/examples/control-stepper-motor-using-digitaloutputs.html
- W11. Universitatea Transilvania din Brașov, *Capitolul 5: Comanda motoarelor cu microcontrollere* [Online]. <u>http://vega.unitbv.ro/~ogrutan/Microcontrollere2011/5-motoare.pdf</u>
- W12. Luis Llamas, *Motor paso a paso 28BYJ-48 con arduino y driver ULN2003* [Online]. https://www.luisllamas.es/motor-paso-paso-28byj-48-arduino-driver-uln2003/
- W13. Keysight Technologies, *The Evolution of RF/Microwave Network Analyzers*, 2014, [Online]. http://about.keysight.com/en/newsroom/backgrounders/na/
- W14. Anritsu, [Online]. <u>https://www.anritsu.com/en-GB</u>
- W15. Rohde-Schwarz, *Converting the real and imaginary numbers to magnitude in dB and phase in degrees* [Online]. <u>https://www.rohde-schwarz.com/us/faq/converting-the-real-and-imaginary-numbers-to-magnitude-in-db-and-phase-in-degrees.-faq\_78704-30465.html</u>

- W16. Malaysian Ham Radio Operator, *What Is Cavity Filter*, 2011, [Online]. https://9m2pju.blogspot.ro/2011/06/what-is-cavity-filter.html
- W17. Laurean, B, *Motorul pas cu pas. Caracteristici generale*, Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu. [Online]. http://web.ulbsibiu.ro/laurean.bogdan/html/MPP\_Constructie\_Functionare.pdf
- W18. https://eprofu.ro/docs/electronica/analogica/circuite/9filtre-pasive.pdf
- W19. Foaia de catalog a motorului pas cu pas 28BYJ-48 https://nettigo.eu/attachments/479

### Anexe

### Anexa 1. Exemplu de format \*.s2p utilizat pentru stocarea datelor achiziționate de la un analizor vectorial de rețea pentru DUT reprezentat de un cablu coaxial

În această anexă, prima coloană corespunde frecvențelor exprimate în GHz.

Următoarele opt coloane corespund valorilor părții reale, respectiv imaginare pentru fiecare parametru S, respectiv:  $Re(S_{11})$ ,  $Im(S_{11})$ ,  $Re(S_{21})$ ,  $Im(S_{12})$ ,  $Re(S_{12})$ ,  $Im(S_{12})$ ,  $Re(S_{22})$  şi  $Im(S_{22})$ .

! 9/22/2014 1:41:48 AM ! C:\ANRITSUVNA\DATAFILE#1.S2P ! CHANNEL.1 ! TR.MEASUREMENT ! RAW.DATA # GHZ S RI R 50.0

! FREQ.GHZ	S11RE	S11IM	S21RE	S21IM	S12RE	S12IM	S22RE	S22IM
!; PortSelection:	Port_12							
0.000300000	-9.7504330	0.7672891	0.0066455	-0.0191896	0.0048394	-0.0166925	-10.1332500	0.1889554
0.000724985	-9.6092820	1.1145500	0.0016147	-0.0097520	0.0007703	-0.0080489	-10.0363700	0.5681533
0.001149970	-9.5477140	1.3822380	-0.0008785	-0.0065886	-0.0000315	-0.0056487	-10.0134300	0.7856542
0.001574955	-9.4813530	1.6145790	-0.0002009	-0.0046132	0.0001922	-0.0033812	-9.9897210	0.9527552
0.001999940	-9.4093140	1.8118140	-0.0002873	-0.0029612	-0.0004253	-0.0029461	-9.9618310	1.1189050
0.002424925	-9.3515200	2.0032480	0.0003171	-0.0030134	-0.0004138	-0.0021774	-9.9370950	1.2492870
0.002849910	-9.2827050	2.1731890	0.0005648	-0.0019153	-0.0002596	-0.0022025	-9.9072000	1.3759800
0.003274895	-9.2277320	2.3390000	-0.0002661	-0.0019875	-0.0000768	-0.0014054	-9.8829070	1.4921470
0.003699880	-9.1345640	2.4121200	-0.0004417	-0.0016736	0.0000187	-0.0016021	-9.8137980	1.4800520
0.004124865	-9.0770340	2.5690050	0.0000244	-0.0016802	0.0000588	-0.0013952	-9.7876760	1.5918370
0.004549850	-9.0564980	2.8083150	-0.0003258	-0.0016602	-0.0000666	-0.0009042	-9.8187220	1.8082840
0.004974835	-8.9655380	2.8735640	-0.0000241	-0.0010320	0.0001343	-0.0005743	-9.7507510	1.7894250
0.005399820	-8.9535980	3.0946140	-0.0003733	-0.0011583	0.0000685	-0.0011515	-9.7750000	1.9885140
0.005824805	-8.9036960	3.2358240	0.0000351	-0.0010811	0.0001928	-0.0005798	-9.7587000	2.0765790
0.006249790	-8.8052470	3.3097300	0.0000630	-0.0009444	-0.0001587	-0.0006755	-9.6964860	2.0673080
0.006674775	-8.7582790	3.4472060	0.0000123	-0.0002876	-0.0004057	-0.0004361	-9.6764360	2.1591370
0.007099760	-8.7469390	3.6414550	-0.0002237	-0.0003736	-0.0000364	-0.0005595	-9.7013070	2.3330920

#### Anexa 2. Caracteristicile filtrului trece bandă de tip ZFBP-2400+ utilizat în capitolul 2,

#### pentru un exemplu de test

#### Bandpass Filter ZFBP-2400+ 50Ω2300 to 2500 MHz CASE STYLE: HIS Model ZFBP-SMA-F 2400-8 \$40.05 High rejection, 50 dB typical Flat group delay over passband, 0.3 ns typical Good VSWR, 1.3:1 typical in passband (1-9) (1-9) RACKET (OPTION \$5.00 78 Electrical Specifications at 25°C PA. Freq ency (MHz) м Тур Max Unit ŧq. 2400 MHC. 3.5 Pass Band tion Loss P1-F2 2000 - 2500 \_ 2.2 4 **Ins** SMP 2300 - 2500 1.65 1.2 DO-F3 DC - 1808 20 30 đ n Lo Stop Band, Loy **ISAR** 180 F4F5 2000 - 0000 20 28 đ op Band, Upp

Maximum	Ratinos
Operating Temperature	-65°C to 100°C
Storage Temperature	-65°C to 100°C
RF Power Input*	8.5W max, at 25°C
Paralle Result in All of SIGMA and	inst.

nt damage may occur if any of these limits are a

	Typical Perfo	rmance Data a	t 25°C	
(MHz)	(dB)	(:1)	(MHz)	(naec)
0.5	95.43	1737.10	2300.0	2.48
500.0	55.00	144.77	2210.0	3.44
1100.0	40.14	115.01	2220.0	3.40
1800.0	30.22	50.04	2220.0	3.36
2070.0	18.34	18.70	2340.0	3.30
2150.0	0.09	7.94	2350.0	3.35
2200.0	4.52	3.42	2000.0	2.34
2270.0	1.00	1.19	2370.0	3.34
2300.0	1.72	1.07	2360.0	3.35
2400.0	1.92	1.27	2000.0	3.35
2500.0	2.19	1,20	2400.0	3.37
2900.0	2.40	1.14	2410.0	3.36
2020.0	6.00	1.50	2420.0	3.39
2000.0	14.54	4.39	2400.0	3.41
2800.0	20.20	15.01	2440.0	3.43
2050.0	47.48	99.70	2450.0	3.45
2000.0	49.50	44 55	2400.0	3.40
4000.0	34.34	40.96	2470.0	3.50
5000.0	30.22	36.20	2400.0	3.54
0000.0	98.99	24.02	2500.0	3.64





Man Provide ACTUAL Dea Instanty of manicip P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4601 The Deat

2.27



Functional Schematic

Coaxial

Features

Rugged shielded case

Applications

Lab use

Harmonic rejection

Transmitters / receivers

#### Typical Frequency Response



+ RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC) -Suffix has been added in order to blentfy RoHS plance. See our web ate for RoHS Complence odologies and qualifications.

#### Coaxial

## Bandpass Filter 50Ω2300 to 2500 MHz

#### Features

- High rejection, 50 dB typical sband, 0.3 ns typical
- Flat group delay over pessbend, 0.3 ns typ
   Good VSWR, 1.3:1 typical in passband
   Rugged shielded case

Functional Schematic

Typical Frequency Response

+ RoHS compliant in accordance

with EU Directive (2002/95/EC) -Suffic has been added it order to identify RoHS plance. See our web alle for RoHS Compliance odologies and qualifications.

1000

#### Applications

- Transmitters / receivers
- Lab use

Maximum	Ratinos
Operating Temperature	-65°C to 180°C
Stonege Temperature	-65°C to 180°C
RF Power Input*	8.5W max. at 25°C
A Description of the second second second second	

Dende lineerty to 4W at 100°C ambient.
 Permanent damage may occur if any of the

#### Typical Performance Data at 25°C (naec) MH H (MHz) (dB) (:1) 95.43 55.03 45.14 1727.18 144.77 115.81 0.5 500.0 1100.0 2300.0 2310.0 2320.0 2.48 2.44 2.40 1800.0 2070.0 2150.0 2200.0 2270.0 2330.0 2340.0 2350.0 2350.0 2350.0 2370.0 30.22 16.34 8.89 4.52 1.80 1.72 1.92 2.19 2.40 50.04 10.70 7.94 1.07 1.27 1.25 1.14 1.52 4.39 15.51 22.79 44.55 2.38 2.36 2.34 2.35 2.37 2.36 2.37 2.39 2.41 2.42 2.45 2.46 2300.0 2380.0 2400.0 2390.0 2420.0 2430.0 2440.0 5.02 14.54 32.28 2820.0 2800.0 3050 0 3300 0 47.40 2450.0 36.24 32.22 29.22 45.96 26.20 24.63 2470.0 2480.0 2500.0 2.50 2.54 2.54 4800.0

Electrical Specifications at 25°C

ency (MHz)

2000 - 2500

2000 - 2500

DC-1800

2000 - 5000

2000 - 0000

DC 1800

Free

-

PH-F2

DO-F3

00-51

F4F5

CALCS.

Frequ

on Los

tion Lo

Insertion Loss

SWR

**VSWR** 

UPDAR!







- Harmonic rejection



Pass Band

Stop Band, Los

Rop Band, Upper

## ZFBP-2400+

CASE STYLE: H16 Model ZFBP-\$49.95 • (1-9) (1-9) BRACKET (OPTION "B") \$5.00 es.

Тур

2400

22

30

28

Max

3.6

1.65

Unit

MHC

1

đ

đ

Ma

\_

20

20

### **Bandpass Filter**

### ZFBP-2400+

## Coaxial Connections

INPUT 1 (SMA female) OUTPUT 2 (SMA female)

#### Outline Drawing



Outline Dimensions ( inch<sub>mm</sub> )

**Mini-Circuits** 

Labophy with several at

Per dested parters
Into seen allo seen allo 14661 AS 5166 CERTIPED
O Des 100146, Revealed, New York 11255-0003 (THE State Street The Dested Excited States Revealed Active Active

Mate 1. Performance and quality stillates and conditions on expensive stated in this spectration of earlier to interchanting of the spectration of the spectra of the spect

Page 3 of 3

# Anexa 3. Exemplu de calcul pentru funcțiile spline cubice în cadrul capitolului 2, paragraful 2.3.1

Considerând eșantioane A(2, 1), B(3,5) și C(4, 3), se vor calcula funcțiile spine  $p_{3,1}$  și  $p_{3,2}$ :

$$p_{3,1}(x) = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1$$
$$p_{3,2}(x) = a_2 x^3 + b_2 x^2 + c_2 x + d_2$$

Pentru a determina coeficienții  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  și  $d_2$ , se folosesc cele patru condiții prezentate anterior.

Din condiția C<sub>1</sub>, rezultă:

$$p_{3,1}(2) = 1 \Rightarrow$$

$$2^{3}a_{1} + 2^{2}b_{1} + 2c_{1} + d_{1} = 1 \Rightarrow$$

$$8a_{1} + 4b_{1} + 2c_{1} + d_{1} = 1$$

$$p_{3,1}(3) = 5 \Rightarrow$$

$$27a_{1} + 9b_{1} + 3c_{1} + d_{1} = 5$$

$$p_{3,2}(3) = 5 \Rightarrow$$

$$27a_{2} + 9b_{2} + 3c_{2} + d_{2} = 5$$

$$p_{3,2}(4) = 3 \Rightarrow$$

$$64a_{2} + 16b_{2} + 4c_{2} + d_{2} = 3$$

Din condiția C2, rezultă:

$$p_{3,i}'(x_{i+1}) = p_{3,i+1}'(x_{i+1}) \Leftrightarrow$$

$$3x^{2}a_{1} + 2xb_{1} + c_{1} = 3x^{2}a_{2} + 2xb_{2} + c_{2} \Leftrightarrow$$

$$3x^{2}a_{1} + 2xb_{1} + c_{1} - 3x^{2}a_{2} - 2xb_{2} - c_{2} = 0 \xrightarrow{B(3,5)}$$

$$3 \cdot 3^{2}a_{1} + 2 \cdot 3 \cdot b_{1} + c_{1} - 3 \cdot 3^{2}a_{2} - 2 \cdot 3 \cdot b_{2} - c_{2} = 0 \Leftrightarrow$$

 $27a_1 + 6b_1 + c_1 - 27a_2 - 6 \cdot b_2 - c_2 = 0$ 

Din condiția C3, rezultă:

$$p_{3,i}''(x_{i+1}) = p_{3,i+1}''(x_{i+1}) \Leftrightarrow$$

$$6xa_1 + 2b_1 = 6xa_2 + 2b_2 \Leftrightarrow$$

$$6xa_1 + 2b_1 - 6xa_2 - 2b_2 = 0 \xrightarrow{B(3,5)}$$

$$\mathbf{18a_1} + \mathbf{2b_1} - \mathbf{18a_2} - \mathbf{2b_2} = \mathbf{0}$$

Din condiția C<sub>4</sub>, rezultă:

$$p_{3,i}''(x_{i+1}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$6xa_1 + 2b_1 = 0 \xrightarrow{A(2,1)}$$

$$12a_1 + 2b_1 = 0$$

$$p_{3,i+1}''(x_{i+1}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$6xa_2 + 2b_2 = 0 \xrightarrow{C(4,3)}$$

$$24a_2 + 2b_2 = 0$$

Folosind cele patru condiții, s-au obținut 8 ecuații cu 8 necunoscute, ceea ce permite determinarea coeficienților  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  și  $d_2$ . Folosind ultimele două ecuații se obține:

$$12a_1 + 2b_1 = 0 \Rightarrow \boldsymbol{b_1} = -\boldsymbol{6}\boldsymbol{a_1}$$
$$24a_2 + 2b_2 = 0 \Rightarrow b_2 = -12a_2$$

Coeficienții  $b_1$  și  $b_2$  se înlocuiesc în relația de mai jos, după ce aceasta a fost simplificată cu valoarea 2:

$$18a_{1} + 2b_{1} - 18a_{2} - 2b_{2} = 0 \Rightarrow$$
$$9a_{1} + b_{1} - 9a_{2} - b_{2} = 0 \Rightarrow$$
$$9a_{1} - 6a_{1} - 9a_{2} + 12a_{2} = 0 \Rightarrow$$
$$3a_{1} + 3a_{2} = 0 \Rightarrow$$
$$a_{2} = -a_{1}$$

Coeficientul  $b_2$  se poate rescrie astfel:

$$b_2 = -12a_2 \Rightarrow$$
$$b_2 = 12a_1$$

Prin înlocuirea celor trei coeficienți, respectiv  $a_2$ ,  $b_1$  și  $b_2$ , în relația de mai jos, se va determina coeficientul  $c_2$  după cum urmează:

$$27a_1 + 6b_1 + c_1 - 27a_2 - 6 \cdot b_2 - c_2 = 0 \Rightarrow$$
  
$$27a_1 - 36a_1 + c_1 + 27a_1 - 72a_1 - c_2 = 0 \Rightarrow$$
  
$$-54a_1 + c_1 - c_2 = 0 \Rightarrow$$

### $c_2 = c_1 - 54a_1$

În ultima etapă, se realizează înlocuirile în condițiile C<sub>1</sub>:

 $64a_{2} + 16b_{2} + 4c_{2} + d_{2} = 3 \Rightarrow$   $-64a_{1} + 192a_{1} + 4c_{1} - 216a_{1} + d_{2} = 3 \Rightarrow$   $d_{2} = 3 + 88a_{1} - 4c_{1}$   $27a_{2} + 9b_{2} + 3c_{2} + d_{2} = 5 \Rightarrow$   $-27a_{1} + 108a_{1} + 3c_{1} - 162a_{1} + 3 + 88a_{1} - 4c_{1} = 5 \Rightarrow$   $c_{1} = 7a_{1} - 2$   $27a_{1} + 9b_{1} + 3c_{1} + d_{1} = 5 \Rightarrow$   $27a_{1} - 54a_{1} + 21a_{1} - 6 + d_{1} = 5 \Rightarrow$   $d_{1} = 11 + 6a_{1}$ 

$$8a_{1} + 4b_{1} + 2c_{1} + d_{1} = 1 \Rightarrow$$

$$8a_{1} - 24a_{1} + 14a_{1} - 4 + 11 + 6a_{1} = 1 \Rightarrow$$

$$4a_{1} = -6 \Rightarrow$$

$$a_{1} = -1.5$$

$$b_{1} = -6a_{1} = 9$$

$$c_{1} = 7a_{1} - 2 = -12.5$$

$$d_{1} = 11 + 6a_{1} = 2$$

$$a_2 = -a_1 = 1.5$$
  
 $b_2 = 12a_1 = -18$   
 $c_2 = c_1 - 54a_1 = 68.5$   
 $d_2 = 3 + 88a_1 - 4c_1 = -79$ 

Prin înlocuirea coeficienților  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1$  și  $d_2$ , rezultă:

$$p_{3,1}(x) = -1.5x^3 + 9x^2 - 12.5x + 2$$
  
$$p_{3,2}(x) = 1.5x^3 - 18x^2 + 68.5x - 79$$

### Anexa 4. Tabel cu rezultatele măsurărilor pentru 321 de frecvențe în domeniul 4.7 – 5.5

Nr.	GHZ	S11RE	S11IM	S21RE	S21IM	S12RE	S12IM	S22RE	S22IM
1.	4.700000	0.461122	0.856565	0.032244	-0.020440	0.032244	-0.020440	0.461122	0.856565
2.	4.702500	0.466663	0.853191	0.032827	-0.021150	0.032827	-0.021150	0.466663	0.853191
3.	4.705000	0.472277	0.849715	0.033424	-0.021890	0.033424	-0.021890	0.472277	0.849715
4.	4.707500	0.477937	0.846150	0.034033	-0.022660	0.034033	-0.022660	0.477938	0.846150
5.	4.710000	0.483644	0.842494	0.034655	-0.023460	0.034655	-0.023460	0.483644	0.842494
6.	4.712500	0.489397	0.838745	0.035289	-0.024290	0.035289	-0.024290	0.489398	0.838745
7.	4.715000	0.495198	0.834899	0.035935	-0.025160	0.035935	-0.025160	0.495198	0.834899
8.	4.717500	0.501045	0.830953	0.036595	-0.026060	0.036595	-0.026060	0.501046	0.830953
9.	4.720000	0.506940	0.826905	0.037268	-0.027000	0.037268	-0.027000	0.506941	0.826904
10.	4.722500	0.512883	0.822750	0.037953	-0.027980	0.037953	-0.027980	0.512884	0.822749
11.	4.725000	0.518874	0.818486	0.038652	-0.028990	0.038652	-0.028990	0.518875	0.818485
12.	4.727500	0.524913	0.814108	0.039364	-0.030050	0.039364	-0.030050	0.524913	0.814107
13.	4.730000	0.530999	0.809614	0.040090	-0.031160	0.040090	-0.031160	0.531000	0.809613
14.	4.732500	0.537134	0.804999	0.040828	-0.032310	0.040828	-0.032310	0.537135	0.804998
15.	4.735000	0.543317	0.800260	0.041580	-0.033510	0.041580	-0.033510	0.543318	0.800258
16.	4.737500	0.549548	0.795391	0.042345	-0.034770	0.042345	-0.034770	0.549549	0.795390
17.	4.740000	0.555827	0.790389	0.043123	-0.036070	0.043123	-0.036070	0.555828	0.790387
18.	4.742500	0.562153	0.785249	0.043913	-0.037440	0.043913	-0.037440	0.562154	0.785247
19.	4.745000	0.568527	0.779966	0.044716	-0.038860	0.044716	-0.038860	0.568528	0.779964
20.	4.747500	0.574948	0.774535	0.045532	-0.040350	0.045532	-0.040350	0.574949	0.774534
21.	4.750000	0.581415	0.768952	0.046359	-0.041900	0.046359	-0.041900	0.581416	0.768950
22.	4.752500	0.587928	0.763209	0.047198	-0.043520	0.047198	-0.043520	0.587929	0.763207
23.	4.755000	0.594486	0.757303	0.048048	-0.045220	0.048048	-0.045220	0.594487	0.757301
24.	4.757500	0.601088	0.751225	0.048908	-0.046990	0.048908	-0.046990	0.601089	0.751224
25.	4.760000	0.607733	0.744972	0.049777	-0.048840	0.049777	-0.048840	0.607735	0.744970
26.	4.762500	0.614421	0.738535	0.050655	-0.050780	0.050655	-0.050780	0.614422	0.738533
27.	4.765000	0.621149	0.731908	0.051541	-0.052810	0.051541	-0.052810	0.621150	0.731906
28.	4.767500	0.627916	0.725083	0.052432	-0.054930	0.052432	-0.054930	0.627917	0.725081
29.	4.770000	0.634721	0.718053	0.053329	-0.057150	0.053329	-0.057150	0.634722	0.718051
30.	4.772500	0.641561	0.710811	0.054228	-0.059480	0.054228	-0.059480	0.641562	0.710808
31.	4.775000	0.648433	0.703346	0.055129	-0.061920	0.055129	-0.061920	0.648434	0.703344
32.	4.777500	0.655336	0.695652	0.056030	-0.064470	0.056030	-0.064470	0.655337	0.695650
33.	4.780000	0.662266	0.687718	0.056927	-0.067150	0.056927	-0.067150	0.662267	0.687716
34.	4.782500	0.669220	0.679535	0.057818	-0.069960	0.057818	-0.069960	0.669221	0.679533
35.	4.785000	0.676193	0.671093	0.058700	-0.072910	0.058700	-0.072910	0.676194	0.671091
36.	4.787500	0.683183	0.662381	0.059569	-0.076000	0.059569	-0.076000	0.683184	0.662378
37.	4.790000	0.690183	0.653388	0.060422	-0.079240	0.060422	-0.079240	0.690183	0.653385
38.	4.792500	0.697188	0.644101	0.061253	-0.082640	0.061253	-0.082640	0.697189	0.644099
39.	4.795000	0.704192	0.634510	0.062059	-0.086220	0.062059	-0.086220	0.704193	0.634508
40.	4.797500	0.711189	0.624601	0.062832	-0.089980	0.062832	-0.089980	0.711190	0.624598

### GHz aferent unui filtru de microunde

41.	4.800000	0.718171	0.614359	0.063567	-0.093920	0.063567	-0.093920	0.718172	0.614357
42.	4.802500	0.725129	0.603772	0.064256	-0.098070	0.064256	-0.098070	0.725129	0.603769
43.	4.805000	0.732053	0.592824	0.064891	-0.102430	0.064891	-0.102430	0.732053	0.592821
44.	4.807500	0.738933	0.581500	0.065462	-0.107010	0.065462	-0.107010	0.738933	0.581497
45.	4.810000	0.745756	0.569782	0.065960	-0.111830	0.065960	-0.111830	0.745757	0.569780
46.	4.812500	0.752510	0.557655	0.066372	-0.116890	0.066372	-0.116890	0.752511	0.557653
47.	4.815000	0.759179	0.545101	0.066685	-0.122220	0.066685	-0.122220	0.759180	0.545098
48.	4.817500	0.765747	0.532100	0.066885	-0.127830	0.066885	-0.127830	0.765747	0.532098
49.	4.820000	0.772194	0.518635	0.066954	-0.133730	0.066954	-0.133730	0.772194	0.518632
50.	4.822500	0.778500	0.504684	0.066874	-0.139940	0.066874	-0.139940	0.778500	0.504682
51.	4.825000	0.784641	0.490229	0.066624	-0.146470	0.066624	-0.146470	0.784641	0.490226
52.	4.827500	0.790591	0.475247	0.066180	-0.153340	0.066180	-0.153340	0.790591	0.475244
53.	4.830000	0.796320	0.459717	0.065516	-0.160570	0.065516	-0.160570	0.796321	0.459715
54.	4.832500	0.801797	0.443619	0.064602	-0.168170	0.064602	-0.168170	0.801798	0.443616
55.	4.835000	0.806985	0.426929	0.063405	-0.176160	0.063405	-0.176160	0.806985	0.426927
56.	4.837500	0.811843	0.409627	0.061887	-0.184560	0.061887	-0.184560	0.811843	0.409624
57.	4.840000	0.816326	0.391691	0.060006	-0.193380	0.060006	-0.193380	0.816326	0.391689
58.	4.842500	0.820383	0.373101	0.057716	-0.202640	0.057716	-0.202640	0.820383	0.373099
59.	4.845000	0.823958	0.353838	0.054966	-0.212350	0.054966	-0.212350	0.823958	0.353836
60.	4.847500	0.826990	0.333885	0.051697	-0.222520	0.051697	-0.222520	0.826990	0.333883
61.	4.850000	0.829410	0.313227	0.047844	-0.233170	0.047844	-0.233170	0.829410	0.313225
62.	4.852500	0.831141	0.291854	0.043337	-0.244290	0.043337	-0.244290	0.831141	0.291852
63.	4.855000	0.832099	0.269760	0.038097	-0.255890	0.038097	-0.255890	0.832099	0.269758
64.	4.857500	0.832192	0.246943	0.032036	-0.267960	0.032036	-0.267960	0.832192	0.246942
65.	4.860000	0.831320	0.223412	0.025060	-0.280480	0.025060	-0.280480	0.831320	0.223411
66.	4.862500	0.829372	0.199184	0.017066	-0.293450	0.017066	-0.293450	0.829372	0.199182
67.	4.865000	0.826229	0.174285	0.007940	-0.306810	0.007940	-0.306810	0.826229	0.174284
68.	4.867500	0.821765	0.148759	-0.002440	-0.320530	-0.002440	-0.320530	0.821765	0.148757
69.	4.870000	0.815843	0.122663	-0.014200	-0.334540	-0.014200	-0.334540	0.815842	0.122662
70.	4.872500	0.808320	0.096078	-0.027470	-0.348750	-0.027470	-0.348750	0.808320	0.096077
71.	4.875000	0.799050	0.069104	-0.042400	-0.363050	-0.042400	-0.363050	0.799050	0.069103
72.	4.877500	0.787882	0.041871	-0.059120	-0.377310	-0.059120	-0.377310	0.787882	0.041870
73.	4.880000	0.774668	0.014538	-0.077780	-0.391370	-0.077780	-0.391370	0.774668	0.014537
74.	4.882500	0.759267	-0.012700	-0.098500	-0.405010	-0.098500	-0.405010	0.759267	-0.012700
75.	4.885000	0.741548	-0.039620	-0.121410	-0.418020	-0.121410	-0.418020	0.741548	-0.039620
76.	4.887500	0.721403	-0.065950	-0.146600	-0.430110	-0.146600	-0.430110	0.721403	-0.065950
77.	4.890000	0.698754	-0.091380	-0.174140	-0.440960	-0.174140	-0.440960	0.698755	-0.091380
78.	4.892500	0.673563	-0.115560	-0.204060	-0.450240	-0.204060	-0.450240	0.673564	-0.115560
79.	4.895000	0.645844	-0.138120	-0.236320	-0.457540	-0.236320	-0.457540	0.645845	-0.138120
80.	4.897500	0.615676	-0.158660	-0.270840	-0.462470	-0.270840	-0.462470	0.615677	-0.158660
81.	4.900000	0.583211	-0.176750	-0.307450	-0.464590	-0.307450	-0.464590	0.583212	-0.176750
82.	4.902500	0.548686	-0.191970	-0.345900	-0.463480	-0.345900	-0.463480	0.548688	-0.191970
83.	4.905000	0.512431	-0.203940	-0.385840	-0.458740	-0.385840	-0.458740	0.512433	-0.203940
84.	4.907500	0.474863	-0.212280	-0.426830	-0.450010	-0.426830	-0.450010	0.474865	-0.212280

85.	4.910000	0.436487	-0.216720	-0.468360	-0.437000	-0.468360	-0.437000	0.436490	-0.216720
86.	4.912500	0.397880	-0.217060	-0.509830	-0.419500	-0.509830	-0.419500	0.397882	-0.217060
87.	4.915000	0.359671	-0.213200	-0.550580	-0.397410	-0.550580	-0.397410	0.359674	-0.213200
88.	4.917500	0.322517	-0.205190	-0.589950	-0.370780	-0.589950	-0.370780	0.322520	-0.205190
89.	4.920000	0.287067	-0.193190	-0.627260	-0.339760	-0.627260	-0.339760	0.287070	-0.193190
90.	4.922500	0.253935	-0.177510	-0.661870	-0.304660	-0.661870	-0.304660	0.253939	-0.177510
91.	4.925000	0.223664	-0.158550	-0.693220	-0.265900	-0.693220	-0.265900	0.223667	-0.158550
92.	4.927500	0.196698	-0.136850	-0.720830	-0.223990	-0.720830	-0.223990	0.196702	-0.136850
93.	4.930000	0.173369	-0.112980	-0.744360	-0.179500	-0.744360	-0.179500	0.173373	-0.112980
94.	4.932500	0.153881	-0.087570	-0.763570	-0.133080	-0.763570	-0.133080	0.153885	-0.087570
95.	4.935000	0.138311	-0.061250	-0.778340	-0.085360	-0.778340	-0.085360	0.138315	-0.061250
96.	4.937500	0.126617	-0.034630	-0.788710	-0.036940	-0.788710	-0.036940	0.126620	-0.034630
97.	4.940000	0.118650	-0.008270	-0.794770	0.011605	-0.794770	0.011605	0.118654	-0.008270
98.	4.942500	0.114179	0.017324	-0.796740	0.059765	-0.796740	0.059765	0.114183	0.017322
99.	4.945000	0.112905	0.041729	-0.794880	0.107108	-0.794880	0.107108	0.112909	0.041726
100.	4.947500	0.114487	0.064600	-0.789490	0.153280	-0.789490	0.153280	0.114491	0.064597
101.	4.950000	0.118559	0.085672	-0.780900	0.198002	-0.780900	0.198002	0.118562	0.085669
102.	4.952500	0.124747	0.104753	-0.769460	0.241070	-0.769460	0.241070	0.124750	0.104750
103.	4.955000	0.132684	0.121721	-0.755490	0.282342	-0.755490	0.282342	0.132687	0.121718
104.	4.957500	0.142017	0.136511	-0.739310	0.321737	-0.739310	0.321737	0.142019	0.136507
105.	4.960000	0.152416	0.149108	-0.721210	0.359215	-0.721210	0.359215	0.152419	0.149105
106.	4.962500	0.163581	0.159538	-0.701440	0.394778	-0.701440	0.394778	0.163584	0.159535
107.	4.965000	0.175238	0.167858	-0.680250	0.428455	-0.680250	0.428455	0.175240	0.167854
108.	4.967500	0.187144	0.174148	-0.657830	0.460294	-0.657830	0.460294	0.187146	0.174144
109.	4.970000	0.199085	0.178508	-0.634360	0.490358	-0.634360	0.490358	0.199087	0.178504
110.	4.972500	0.210874	0.181047	-0.609980	0.518720	-0.609980	0.518720	0.210876	0.181044
111.	4.975000	0.222350	0.181886	-0.584820	0.545455	-0.584820	0.545455	0.222351	0.181882
112.	4.977500	0.233373	0.181146	-0.558980	0.570639	-0.558980	0.570639	0.233374	0.181143
113.	4.980000	0.243825	0.178954	-0.532530	0.594345	-0.532530	0.594345	0.243826	0.178950
114.	4.982500	0.253608	0.175433	-0.505540	0.616642	-0.505540	0.616642	0.253608	0.175430
115.	4.985000	0.262636	0.170709	-0.478060	0.637592	-0.478060	0.637592	0.262637	0.170706
116.	4.987500	0.270841	0.164902	-0.450130	0.657253	-0.450130	0.657253	0.270842	0.164899
117.	4.990000	0.278166	0.158131	-0.421760	0.675671	-0.421760	0.675671	0.278166	0.158128
118.	4.992500	0.284565	0.150512	-0.392990	0.692888	-0.392990	0.692888	0.284565	0.150509
119.	4.995000	0.290001	0.142156	-0.363820	0.708936	-0.363820	0.708936	0.290001	0.142153
120.	4.997500	0.294447	0.133174	-0.334270	0.723838	-0.334270	0.723838	0.294447	0.133172
121.	5.000000	0.297884	0.123672	-0.304340	0.737612	-0.304340	0.737612	0.297884	0.123669
122.	5.002500	0.300300	0.113751	-0.274030	0.750268	-0.274030	0.750268	0.300300	0.113748
123.	5.005000	0.301688	0.103513	-0.243360	0.761806	-0.243360	0.761806	0.301688	0.103510
124.	5.007500	0.302050	0.093054	-0.212320	0.772223	-0.212320	0.772223	0.302050	0.093051
125.	5.010000	0.301392	0.082469	-0.180920	0.781510	-0.180920	0.781510	0.301392	0.082466
126.	5.012500	0.299727	0.071849	-0.149180	0.789650	-0.149180	0.789650	0.299727	0.071847
127.	5.015000	0.297074	0.061285	-0.117100	0.796623	-0.117100	0.796623	0.297073	0.061283
128.	5.017500	0.293455	0.050861	-0.084710	0.802405	-0.084710	0.802405	0.293455	0.050859

129.	5.020000	0.288902	0.040662	-0.052010	0.806969	-0.052010	0.806969	0.288901	0.040660
130.	5.022500	0.283448	0.030767	-0.019040	0.810284	-0.019040	0.810284	0.283447	0.030766
131.	5.025000	0.277134	0.021254	0.014170	0.812320	0.014170	0.812320	0.277133	0.021252
132.	5.027500	0.270006	0.012195	0.047589	0.813042	0.047589	0.813042	0.270005	0.012193
133.	5.030000	0.262115	0.003659	0.081174	0.812417	0.081174	0.812417	0.262114	0.003658
134.	5.032500	0.253517	-0.004290	0.114878	0.810414	0.114878	0.810414	0.253516	-0.004290
135.	5.035000	0.244274	-0.011590	0.148650	0.807000	0.148650	0.807000	0.244273	-0.011590
136.	5.037500	0.234451	-0.018190	0.182432	0.802148	0.182432	0.802148	0.234450	-0.018190
137.	5.040000	0.224118	-0.024040	0.216160	0.795830	0.216160	0.795830	0.224117	-0.024040
138.	5.042500	0.213349	-0.029100	0.249768	0.788025	0.249768	0.788025	0.213348	-0.029100
139.	5.045000	0.202221	-0.033330	0.283182	0.778714	0.283182	0.778714	0.202221	-0.033330
140.	5.047500	0.190815	-0.036710	0.316327	0.767885	0.316327	0.767885	0.190815	-0.036710
141.	5.050000	0.179213	-0.039210	0.349124	0.755530	0.349124	0.755530	0.179212	-0.039210
142.	5.052500	0.167497	-0.040820	0.381489	0.741648	0.381489	0.741648	0.167497	-0.040820
143.	5.055000	0.155754	-0.041540	0.413339	0.726243	0.413339	0.726243	0.155753	-0.041540
144.	5.057500	0.144066	-0.041370	0.444588	0.709328	0.444588	0.709328	0.144066	-0.041370
145.	5.060000	0.132518	-0.040320	0.475150	0.690920	0.475150	0.690920	0.132518	-0.040320
146.	5.062500	0.121191	-0.038400	0.504938	0.671047	0.504938	0.671047	0.121191	-0.038400
147.	5.065000	0.110165	-0.035650	0.533869	0.649739	0.533869	0.649739	0.110165	-0.035650
148.	5.067500	0.099515	-0.032100	0.561859	0.627037	0.561859	0.627037	0.099515	-0.032100
149.	5.070000	0.089314	-0.027790	0.588828	0.602986	0.588828	0.602986	0.089314	-0.027790
150.	5.072500	0.079629	-0.022760	0.614698	0.577639	0.614698	0.577639	0.079629	-0.022760
151.	5.075000	0.070522	-0.017070	0.639398	0.551053	0.639398	0.551053	0.070522	-0.017070
152.	5.077500	0.062049	-0.010780	0.662857	0.523291	0.662857	0.523291	0.062049	-0.010780
153.	5.080000	0.054259	-0.003950	0.685014	0.494421	0.685014	0.494421	0.054259	-0.003950
154.	5.082500	0.047195	0.003353	0.705808	0.464514	0.705808	0.464514	0.047195	0.003353
155.	5.085000	0.040893	0.011059	0.725188	0.433646	0.725188	0.433646	0.040893	0.011059
156.	5.087500	0.035381	0.019096	0.743107	0.401895	0.743107	0.401895	0.035381	0.019096
157.	5.090000	0.030681	0.027391	0.759523	0.369340	0.759523	0.369340	0.030681	0.027391
158.	5.092500	0.026808	0.035869	0.774403	0.336063	0.774403	0.336063	0.026808	0.035869
159.	5.095000	0.023767	0.044456	0.787715	0.302147	0.787715	0.302147	0.023767	0.044456
160.	5.097500	0.021559	0.053080	0.799438	0.267673	0.799438	0.267673	0.021559	0.053080
161.	5.100000	0.020177	0.061667	0.809552	0.232724	0.809552	0.232724	0.020177	0.061667
162.	5.102500	0.019608	0.070149	0.818045	0.197382	0.818045	0.197382	0.019608	0.070149
163.	5.105000	0.019834	0.078458	0.824908	0.161727	0.824908	0.161727	0.019834	0.078458
164.	5.107500	0.020829	0.086530	0.830138	0.125837	0.830138	0.125837	0.020829	0.086530
165.	5.110000	0.022564	0.094305	0.833736	0.089790	0.833736	0.089790	0.022564	0.094305
166.	5.112500	0.025006	0.101726	0.835704	0.053662	0.835704	0.053662	0.025006	0.101726
167.	5.115000	0.028115	0.108740	0.836051	0.017524	0.836051	0.017524	0.028115	0.108740
168.	5.117500	0.031850	0.115300	0.834786	-0.018550	0.834786	-0.018550	0.031850	0.115300
169.	5.120000	0.036167	0.121361	0.831922	-0.054500	0.831922	-0.054500	0.036167	0.121361
170.	5.122500	0.041018	0.126886	0.827474	-0.090250	0.827474	-0.090250	0.041018	0.126886
171.	5.125000	0.046354	0.131839	0.821459	-0.125730	0.821459	-0.125730	0.046353	0.131839
172.	5.127500	0.052123	0.136191	0.813895	-0.160900	0.813895	-0.160900	0.052123	0.136192

173.	5.130000	0.058273	0.139918	0.804801	-0.195680	0.804801	-0.195680	0.058273	0.139919
174.	5.132500	0.064752	0.143000	0.794197	-0.230020	0.794197	-0.230020	0.064752	0.143000
175.	5.135000	0.071506	0.145420	0.782105	-0.263860	0.782105	-0.263860	0.071505	0.145420
176.	5.137500	0.078480	0.147168	0.768547	-0.297140	0.768547	-0.297140	0.078480	0.147168
177.	5.140000	0.085623	0.148236	0.753545	-0.329820	0.753545	-0.329820	0.085623	0.148237
178.	5.142500	0.092882	0.148622	0.737123	-0.361820	0.737123	-0.361820	0.092882	0.148623
179.	5.145000	0.100205	0.148328	0.719305	-0.393110	0.719305	-0.393110	0.100204	0.148328
180.	5.147500	0.107540	0.147357	0.700115	-0.423630	0.700115	-0.423630	0.107540	0.147358
181.	5.150000	0.114840	0.145718	0.679578	-0.453330	0.679578	-0.453330	0.114839	0.145719
182.	5.152500	0.122055	0.143424	0.657719	-0.482150	0.657719	-0.482150	0.122055	0.143425
183.	5.155000	0.129141	0.140489	0.634567	-0.510030	0.634567	-0.510030	0.129141	0.140490
184.	5.157500	0.136053	0.136930	0.610147	-0.536930	0.610147	-0.536930	0.136052	0.136932
185.	5.160000	0.142748	0.132770	0.584490	-0.562800	0.584490	-0.562800	0.142747	0.132772
186.	5.162500	0.149186	0.128031	0.557625	-0.587570	0.557625	-0.587570	0.149186	0.128033
187.	5.165000	0.155330	0.122739	0.529585	-0.611190	0.529585	-0.611190	0.155330	0.122741
188.	5.167500	0.161144	0.116922	0.500403	-0.633610	0.500403	-0.633610	0.161143	0.116924
189.	5.170000	0.166594	0.110610	0.470115	-0.654770	0.470115	-0.654770	0.166593	0.110611
190.	5.172500	0.171649	0.103834	0.438759	-0.674600	0.438759	-0.674600	0.171648	0.103836
191.	5.175000	0.176280	0.096628	0.406376	-0.693060	0.406376	-0.693060	0.176280	0.096630
192.	5.177500	0.180462	0.089028	0.373011	-0.710090	0.373011	-0.710090	0.180461	0.089029
193.	5.180000	0.184170	0.081068	0.338708	-0.725620	0.338708	-0.725620	0.184169	0.081070
194.	5.182500	0.187382	0.072788	0.303520	-0.739590	0.303520	-0.739590	0.187382	0.072790
195.	5.185000	0.190080	0.064226	0.267500	-0.751940	0.267500	-0.751940	0.190080	0.064228
196.	5.187500	0.192247	0.055422	0.230705	-0.762620	0.230705	-0.762620	0.192247	0.055424
197.	5.190000	0.193868	0.046417	0.193197	-0.771560	0.193197	-0.771560	0.193868	0.046420
198.	5.192500	0.194930	0.037254	0.155043	-0.778700	0.155043	-0.778700	0.194930	0.037256
199.	5.195000	0.195424	0.027975	0.116314	-0.783980	0.116314	-0.783980	0.195424	0.027977
200.	5.197500	0.195341	0.018625	0.077085	-0.787350	0.077085	-0.787350	0.195342	0.018627
201.	5.200000	0.194677	0.009249	0.037437	-0.788740	0.037437	-0.788740	0.194677	0.009251
202.	5.202500	0.193428	-0.000106	-0.002540	-0.788100	-0.002540	-0.788100	0.193428	-0.000103
203.	5.205000	0.191593	-0.009390	-0.042770	-0.785370	-0.042770	-0.785370	0.191593	-0.009390
204.	5.207500	0.189173	-0.018560	-0.083130	-0.780500	-0.083130	-0.780500	0.189174	-0.018550
205.	5.210000	0.186174	-0.027550	-0.123540	-0.773430	-0.123540	-0.773430	0.186175	-0.027550
206.	5.212500	0.182603	-0.036320	-0.163880	-0.764120	-0.163880	-0.764120	0.182604	-0.036320
207.	5.215000	0.178470	-0.044810	-0.204030	-0.752530	-0.204030	-0.752530	0.178471	-0.044810
208.	5.217500	0.173791	-0.052960	-0.243880	-0.738600	-0.243880	-0.738600	0.173793	-0.052960
209.	5.220000	0.168586	-0.060710	-0.283290	-0.722290	-0.283290	-0.722290	0.168587	-0.060700
210.	5.222500	0.162878	-0.067990	-0.322120	-0.703580	-0.322120	-0.703580	0.162879	-0.067980
211.	5.225000	0.156699	-0.074730	-0.360240	-0.682420	-0.360240	-0.682420	0.156700	-0.074730
212.	5.227500	0.150087	-0.080870	-0.397480	-0.658790	-0.397480	-0.658790	0.150088	-0.080870
213.	5.230000	0.143090	-0.086330	-0.433680	-0.632670	-0.433680	-0.632670	0.143092	-0.086330
214.	5.232500	0.135767	-0.091040	-0.468670	-0.604040	-0.468670	-0.604040	0.135768	-0.091030
215.	5.235000	0.128186	-0.094900	-0.502260	-0.572880	-0.502260	-0.572880	0.128188	-0.094900
216.	5.237500	0.120435	-0.097840	-0.534250	-0.539200	-0.534250	-0.539200	0.120436	-0.097840

217.	5.240000	0.112615	-0.099780	-0.564430	-0.503000	-0.564430	-0.503000	0.112616	-0.099780
218.	5.242500	0.104848	-0.100630	-0.592570	-0.464300	-0.592570	-0.464300	0.104850	-0.100630
219.	5.245000	0.097281	-0.100320	-0.618420	-0.423140	-0.618420	-0.423140	0.097282	-0.100320
220.	5.247500	0.090083	-0.098780	-0.641720	-0.379560	-0.641720	-0.379560	0.090085	-0.098780
221.	5.250000	0.083458	-0.095960	-0.662170	-0.333640	-0.662170	-0.333640	0.083459	-0.095950
222.	5.252500	0.077636	-0.091800	-0.679460	-0.285470	-0.679460	-0.285470	0.077638	-0.091800
223.	5.255000	0.072887	-0.086320	-0.693270	-0.235200	-0.693270	-0.235200	0.072888	-0.086310
224.	5.257500	0.069511	-0.079520	-0.703210	-0.183010	-0.703210	-0.183010	0.069512	-0.079520
225.	5.260000	0.067848	-0.071500	-0.708910	-0.129140	-0.708910	-0.129140	0.067849	-0.071500
226.	5.262500	0.068265	-0.062390	-0.709970	-0.073890	-0.709970	-0.073890	0.068265	-0.062390
227.	5.265000	0.071152	-0.052430	-0.705970	-0.017670	-0.705970	-0.017670	0.071153	-0.052430
228.	5.267500	0.076910	-0.041930	-0.696520	0.039035	-0.696520	0.039035	0.076911	-0.041930
229.	5.270000	0.085926	-0.031340	-0.681220	0.095594	-0.681220	0.095594	0.085927	-0.031340
230.	5.272500	0.098544	-0.021240	-0.659760	0.151260	-0.659760	0.151260	0.098544	-0.021240
231.	5.275000	0.115023	-0.012350	-0.631910	0.205140	-0.631910	0.205140	0.115024	-0.012350
232.	5.277500	0.135491	-0.005520	-0.597610	0.256208	-0.597610	0.256208	0.135492	-0.005520
233.	5.280000	0.159884	-0.001730	-0.556980	0.303324	-0.556980	0.303324	0.159884	-0.001730
234.	5.282500	0.187889	-0.002030	-0.510410	0.345279	-0.510410	0.345279	0.187890	-0.002030
235.	5.285000	0.218898	-0.007490	-0.458620	0.380868	-0.458620	0.380868	0.218899	-0.007480
236.	5.287500	0.251980	-0.019050	-0.402630	0.408985	-0.402630	0.408985	0.251980	-0.019050
237.	5.290000	0.285890	-0.037490	-0.343810	0.428741	-0.343810	0.428741	0.285891	-0.037490
238.	5.292500	0.319129	-0.063250	-0.283780	0.439575	-0.283780	0.439575	0.319129	-0.063250
239.	5.295000	0.350043	-0.096360	-0.224330	0.441355	-0.224330	0.441355	0.350044	-0.096350
240.	5.297500	0.376974	-0.136370	-0.167270	0.434426	-0.167270	0.434426	0.376975	-0.136370
241.	5.300000	0.398413	-0.182400	-0.114240	0.419600	-0.114240	0.419600	0.398414	-0.182400
242.	5.302500	0.413146	-0.233180	-0.066620	0.398089	-0.066620	0.398089	0.413148	-0.233180
243.	5.305000	0.420367	-0.287180	-0.025350	0.371375	-0.025350	0.371375	0.420368	-0.287180
244.	5.307500	0.419716	-0.342740	0.009046	0.341059	0.009046	0.341059	0.419717	-0.342740
245.	5.310000	0.411269	-0.398290	0.036496	0.308716	0.036496	0.308716	0.411271	-0.398290
246.	5.312500	0.395473	-0.452380	0.057297	0.275770	0.057297	0.275770	0.395475	-0.452380
247.	5.315000	0.373051	-0.503830	0.072025	0.243410	0.072025	0.243410	0.373052	-0.503830
248.	5.317500	0.344898	-0.551730	0.081435	0.212556	0.081435	0.212556	0.344899	-0.551730
249.	5.320000	0.311986	-0.595460	0.086364	0.183855	0.086364	0.183855	0.311988	-0.595460
250.	5.322500	0.275288	-0.634660	0.087653	0.157709	0.087653	0.157709	0.275290	-0.634660
251.	5.325000	0.235720	-0.669160	0.086096	0.134312	0.086096	0.134312	0.235722	-0.669160
252.	5.327500	0.194109	-0.698990	0.082405	0.113701	0.082405	0.113701	0.194111	-0.698990
253.	5.330000	0.151175	-0.724290	0.077193	0.095793	0.077193	0.095793	0.151176	-0.724290
254.	5.332500	0.107526	-0.745280	0.070969	0.080428	0.070969	0.080428	0.107528	-0.745280
255.	5.335000	0.063668	-0.762230	0.064147	0.067398	0.064147	0.067398	0.063669	-0.762230
256.	5.337500	0.020007	-0.775450	0.057051	0.056473	0.057051	0.056473	0.020008	-0.775450
257.	5.340000	-0.023130	-0.785250	0.049930	0.047414	0.049930	0.047414	-0.023130	-0.785250
258.	5.342500	-0.065500	-0.791940	0.042967	0.039989	0.042967	0.039989	-0.065500	-0.791940
259.	5.345000	-0.106910	-0.795820	0.036295	0.033980	0.036295	0.033980	-0.106910	-0.795820
260.	5.347500	-0.147220	-0.797160	0.030002	0.029183	0.030002	0.029183	-0.147220	-0.797160

261.	5.350000	-0.186330	-0.796240	0.024147	0.025416	0.024147	0.025416	-0.186330	-0.796240
262.	5.352500	-0.224160	-0.793280	0.018758	0.022517	0.018758	0.022517	-0.224160	-0.793280
263.	5.355000	-0.260690	-0.788510	0.013850	0.020343	0.013850	0.020343	-0.260690	-0.788510
264.	5.357500	-0.295870	-0.782130	0.009418	0.018768	0.009418	0.018768	-0.295870	-0.782130
265.	5.360000	-0.329720	-0.774330	0.005450	0.017685	0.005450	0.017685	-0.329720	-0.774330
266.	5.362500	-0.362230	-0.765260	0.001927	0.017002	0.001927	0.017002	-0.362230	-0.765260
267.	5.365000	-0.393420	-0.755070	-0.001180	0.016639	-0.001180	0.016639	-0.393420	-0.755070
268.	5.367500	-0.423310	-0.743900	-0.003890	0.016530	-0.003890	0.016530	-0.423310	-0.743900
269.	5.370000	-0.451940	-0.731860	-0.006230	0.016618	-0.006230	0.016618	-0.451940	-0.731860
270.	5.372500	-0.479320	-0.719070	-0.008250	0.016856	-0.008250	0.016856	-0.479320	-0.719070
271.	5.375000	-0.505500	-0.705630	-0.009950	0.017206	-0.009950	0.017206	-0.505500	-0.705630
272.	5.377500	-0.530520	-0.691610	-0.011380	0.017633	-0.011380	0.017633	-0.530520	-0.691610
273.	5.380000	-0.554400	-0.677100	-0.012560	0.018113	-0.012560	0.018113	-0.554400	-0.677100
274.	5.382500	-0.577190	-0.662170	-0.013520	0.018622	-0.013520	0.018622	-0.577190	-0.662170
275.	5.385000	-0.598930	-0.646890	-0.014270	0.019143	-0.014270	0.019143	-0.598930	-0.646890
276.	5.387500	-0.619650	-0.631310	-0.014850	0.019662	-0.014850	0.019662	-0.619650	-0.631310
277.	5.390000	-0.639400	-0.615480	-0.015260	0.020169	-0.015260	0.020169	-0.639400	-0.615480
278.	5.392500	-0.658200	-0.599460	-0.015540	0.020654	-0.015540	0.020654	-0.658200	-0.599460
279.	5.395000	-0.676100	-0.583280	-0.015690	0.021111	-0.015690	0.021111	-0.676100	-0.583280
280.	5.397500	-0.693130	-0.566980	-0.015730	0.021534	-0.015730	0.021534	-0.693130	-0.566970
281.	5.400000	-0.709320	-0.550590	-0.015680	0.021922	-0.015680	0.021922	-0.709320	-0.550590
282.	5.402500	-0.724710	-0.534150	-0.015550	0.022271	-0.015550	0.022271	-0.724710	-0.534150
283.	5.405000	-0.739340	-0.517690	-0.015350	0.022581	-0.015350	0.022581	-0.739340	-0.517690
284.	5.407500	-0.753220	-0.501220	-0.015090	0.022850	-0.015090	0.022850	-0.753230	-0.501220
285.	5.410000	-0.766410	-0.484780	-0.014780	0.023079	-0.014780	0.023079	-0.766410	-0.484780
286.	5.412500	-0.778910	-0.468380	-0.014430	0.023269	-0.014430	0.023269	-0.778910	-0.468380
287.	5.415000	-0.790760	-0.452040	-0.014050	0.023421	-0.014050	0.023421	-0.790760	-0.452030
288.	5.417500	-0.801990	-0.435770	-0.013630	0.023536	-0.013630	0.023536	-0.801990	-0.435770
289.	5.420000	-0.812630	-0.419590	-0.013200	0.023615	-0.013200	0.023615	-0.812630	-0.419590
290.	5.422500	-0.822690	-0.403520	-0.012750	0.023660	-0.012750	0.023660	-0.822690	-0.403520
291.	5.425000	-0.832210	-0.387560	-0.012280	0.023673	-0.012280	0.023673	-0.832210	-0.387560
292.	5.427500	-0.841200	-0.371730	-0.011810	0.023656	-0.011810	0.023656	-0.841210	-0.371730
293.	5.430000	-0.849700	-0.356020	-0.011330	0.023611	-0.011330	0.023611	-0.849700	-0.356020
294.	5.432500	-0.857710	-0.340460	-0.010840	0.023540	-0.010840	0.023540	-0.857710	-0.340460
295.	5.435000	-0.865270	-0.325050	-0.010360	0.023444	-0.010360	0.023444	-0.865270	-0.325050
296.	5.437500	-0.872380	-0.309790	-0.009880	0.023326	-0.009880	0.023326	-0.872380	-0.309790
297.	5.440000	-0.879070	-0.294690	-0.009410	0.023187	-0.009410	0.023187	-0.879070	-0.294690
298.	5.442500	-0.885360	-0.279750	-0.008940	0.023028	-0.008940	0.023028	-0.885370	-0.279750
299.	5.445000	-0.891270	-0.264980	-0.008480	0.022853	-0.008480	0.022853	-0.891270	-0.264970
300.	5.447500	-0.896810	-0.250370	-0.008020	0.022661	-0.008020	0.022661	-0.896810	-0.250370
301.	5.450000	-0.901990	-0.235940	-0.007580	0.022456	-0.007580	0.022456	-0.901990	-0.235940
302.	5.452500	-0.906830	-0.221680	-0.007140	0.022237	-0.007140	0.022237	-0.906840	-0.221680
303.	5.455000	-0.911360	-0.207600	-0.006720	0.022007	-0.006720	0.022007	-0.911360	-0.207600
304.	5.457500	-0.915570	-0.193700	-0.006310	0.021766	-0.006310	0.021766	-0.915570	-0.193700

305.	5.460000	-0.919490	-0.179970	-0.005910	0.021517	-0.005910	0.021517	-0.919490	-0.179970
306.	5.462500	-0.923120	-0.166420	-0.005520	0.021259	-0.005520	0.021259	-0.923120	-0.166420
307.	5.465000	-0.926480	-0.153050	-0.005140	0.020995	-0.005140	0.020995	-0.926480	-0.153050
308.	5.467500	-0.929580	-0.139850	-0.004780	0.020725	-0.004780	0.020725	-0.929580	-0.139850
309.	5.470000	-0.932440	-0.126840	-0.004430	0.020450	-0.004430	0.020450	-0.932440	-0.126830
310.	5.472500	-0.935050	-0.113990	-0.004090	0.020171	-0.004090	0.020171	-0.935050	-0.113990
311.	5.475000	-0.937440	-0.101330	-0.003760	0.019888	-0.003760	0.019888	-0.937440	-0.101330
312.	5.477500	-0.939610	-0.088840	-0.003440	0.019603	-0.003440	0.019603	-0.939610	-0.088840
313.	5.480000	-0.941580	-0.076520	-0.003140	0.019316	-0.003140	0.019316	-0.941580	-0.076520
314.	5.482500	-0.943340	-0.064380	-0.002850	0.019028	-0.002850	0.019028	-0.943340	-0.064380
315.	5.485000	-0.944920	-0.052400	-0.002560	0.018739	-0.002560	0.018739	-0.944920	-0.052400
316.	5.487500	-0.946310	-0.040600	-0.002290	0.018449	-0.002290	0.018449	-0.946310	-0.040600
317.	5.490000	-0.947520	-0.028960	-0.002040	0.018160	-0.002040	0.018160	-0.947520	-0.028960
318.	5.492500	-0.948570	-0.017480	-0.001790	0.017872	-0.001790	0.017872	-0.948570	-0.017480
319.	5.495000	-0.949460	-0.006180	-0.001550	0.017584	-0.001550	0.017584	-0.949460	-0.006180
320.	5.497500	-0.950200	0.004970	-0.001320	0.017298	-0.001320	0.017298	-0.950200	0.004971
321.	5.500000	-0.950790	0.015957	-0.001100	0.017014	-0.001100	0.017014	-0.950790	0.015957

### Anexa 4 Bis. Tabel restrâns cu rezultatele măsurărilor pentru 321 de frecvențe în domeniul 4.7 – 5.5 GHz aferent unui filtru de microunde (extras din Anexa 4)

-					
Nr.	f [GHz]	S11RE	S11IM	f_normat	A11
322.	4.700000	0.461122	0.856565	0.587500	0.972799
323.	4.702500	0.466663	0.853191	0.587813	0.972476
324.	4.705000	0.472277	0.849715	0.588125	0.972143
325.	4.707500	0.477937	0.846150	0.588438	0.971799
326.	4.710000	0.483644	0.842494	0.588750	0.971446
327.	4.712500	0.489397	0.838745	0.589063	0.971083
328.	4.715000	0.495198	0.834899	0.589375	0.970710
329.	4.717500	0.501045	0.830953	0.589688	0.970324
330.	4.720000	0.506940	0.826905	0.590000	0.969928
331.	4.722500	0.512883	0.822750	0.590313	0.969519
332.	4.725000	0.518874	0.818486	0.590625	0.969097
333.	4.727500	0.524913	0.814108	0.590938	0.968662
334.	4.730000	0.530999	0.809614	0.591250	0.968212
335.	4.732500	0.537134	0.804999	0.591563	0.967748
336.	4.735000	0.543317	0.800260	0.591875	0.967269
337.	4.737500	0.549548	0.795391	0.592188	0.966773
338.	4.740000	0.555827	0.790389	0.592500	0.966260
339.	4.742500	0.562153	0.785249	0.592813	0.965729
340.	4.745000	0.568527	0.779966	0.593125	0.965179
341.	4.747500	0.574948	0.774535	0.593438	0.964609
342.	4.750000	0.581415	0.768952	0.593750	0.964018
343.	4.752500	0.587928	0.763209	0.594063	0.963404
344.	4.755000	0.594486	0.757303	0.594375	0.962768
345.	4.757500	0.601088	0.751225	0.594688	0.962105
346.	4.760000	0.607733	0.744972	0.595000	0.961417
347.	4.762500	0.614421	0.738535	0.595313	0.960701
348.	4.765000	0.621149	0.731908	0.595625	0.959956
349.	4.767500	0.627916	0.725083	0.595938	0.959179
350.	4.770000	0.634721	0.718053	0.596250	0.958369
351.	4.772500	0.641561	0.710811	0.596563	0.957524
352.	4.775000	0.648433	0.703346	0.596875	0.956640
353.	4.777500	0.655336	0.695652	0.597188	0.955718
354.	4.780000	0.662266	0.687718	0.597500	0.954752
355.	4.782500	0.669220	0.679535	0.597813	0.953742
356.	4.785000	0.676193	0.671093	0.598125	0.952682
357.	4.787500	0.683183	0.662381	0.598438	0.951571
358.	4.790000	0.690183	0.653388	0.598750	0.950404
359.	4.792500	0.697188	0.644101	0.599063	0.949177
360.	4.795000	0.704192	0.634510	0.599375	0.947887

361.	4.797500	0.711189	0.624601	0.599688	0.946529
362.	4.800000	0.718171	0.614359	0.600000	0.945096
363.	4.802500	0.725129	0.603772	0.600313	0.943585
364.	4.805000	0.732053	0.592824	0.600625	0.941988
365.	4.807500	0.738933	0.581500	0.600938	0.940300
366.	4.810000	0.745756	0.569782	0.601250	0.938511
367.	4.812500	0.752510	0.557655	0.601563	0.936616
368.	4.815000	0.759179	0.545101	0.601875	0.934606
369.	4.817500	0.765747	0.532100	0.602188	0.932469
370.	4.820000	0.772194	0.518635	0.602500	0.930197
371.	4.822500	0.778500	0.504684	0.602813	0.927776
372.	4.825000	0.784641	0.490229	0.603125	0.925195
373.	4.827500	0.790591	0.475247	0.603438	0.922439
374.	4.830000	0.796320	0.459717	0.603750	0.919492
375.	4.832500	0.801797	0.443619	0.604063	0.916338
376.	4.835000	0.806985	0.426929	0.604375	0.912958
377.	4.837500	0.811843	0.409627	0.604688	0.909331
378.	4.840000	0.816326	0.391691	0.605000	0.905434
379.	4.842500	0.820383	0.373101	0.605313	0.901239
380.	4.845000	0.823958	0.353838	0.605625	0.896721
381.	4.847500	0.826990	0.333885	0.605938	0.891847
382.	4.850000	0.829410	0.313227	0.606250	0.886585
383.	4.852500	0.831141	0.291854	0.606563	0.880894
384.	4.855000	0.832099	0.269760	0.606875	0.874734
385.	4.857500	0.832192	0.246943	0.607188	0.868058
386.	4.860000	0.831320	0.223412	0.607500	0.860817
387.	4.862500	0.829372	0.199184	0.607813	0.852955
388.	4.865000	0.826229	0.174285	0.608125	0.844411
389.	4.867500	0.821765	0.148759	0.608438	0.835121
390.	4.870000	0.815843	0.122663	0.608750	0.825013
391.	4.872500	0.808320	0.096078	0.609063	0.814010
392.	4.875000	0.799050	0.069104	0.609375	0.802033
393.	4.877500	0.787882	0.041871	0.609688	0.788994
394.	4.880000	0.774668	0.014538	0.610000	0.774804
395.	4.882500	0.759267	-0.012700	0.610313	0.759373
396.	4.885000	0.741548	-0.039620	0.610625	0.742606
397.	4.887500	0.721403	-0.065950	0.610938	0.724411
398.	4.890000	0.698754	-0.091380	0.611250	0.704704
399.	4.892500	0.673563	-0.115560	0.611563	0.683404
400.	4.895000	0.645844	-0.138120	0.611875	0.660448
401.	4.897500	0.615676	-0.158660	0.612188	0.635791
402.	4.900000	0.583211	-0.176750	0.612500	0.609406
403.	4.902500	0.548686	-0.191970	0.612813	0.581299
404.	4.905000	0.512431	-0.203940	0.613125	0.551522

405.	4.907500	0.474863	-0.212280	0.613438	0.520152
406.	4.910000	0.436487	-0.216720	0.613750	0.487328
407.	4.912500	0.397880	-0.217060	0.614063	0.453237
408.	4.915000	0.359671	-0.213200	0.614375	0.418112
409.	4.917500	0.322517	-0.205190	0.614688	0.382257
410.	4.920000	0.287067	-0.193190	0.615000	0.346020
411.	4.922500	0.253935	-0.177510	0.615313	0.309827
412.	4.925000	0.223664	-0.158550	0.615625	0.274160
413.	4.927500	0.196698	-0.136850	0.615938	0.239621
414.	4.930000	0.173369	-0.112980	0.616250	0.206933
415.	4.932500	0.153881	-0.087570	0.616563	0.177053
416.	4.935000	0.138311	-0.061250	0.616875	0.151266
417.	4.937500	0.126617	-0.034630	0.617188	0.131267
418.	4.940000	0.118650	-0.008270	0.617500	0.118938
419.	4.942500	0.114179	0.017324	0.617813	0.115486
420.	4.945000	0.112905	0.041729	0.618125	0.120370
421.	4.947500	0.114487	0.064600	0.618438	0.131455
422.	4.950000	0.118559	0.085672	0.618750	0.146273
423.	4.952500	0.124747	0.104753	0.619063	0.162896
424.	4.955000	0.132684	0.121721	0.619375	0.180058
425.	4.957500	0.142017	0.136511	0.619688	0.196988
426.	4.960000	0.152416	0.149108	0.620000	0.213222
427.	4.962500	0.163581	0.159538	0.620313	0.228498
428.	4.965000	0.175238	0.167858	0.620625	0.242662
429.	4.967500	0.187144	0.174148	0.620938	0.255637
430.	4.970000	0.199085	0.178508	0.621250	0.267395
431.	4.972500	0.210874	0.181047	0.621563	0.277931
432.	4.975000	0.222350	0.181886	0.621875	0.287266
433.	4.977500	0.233373	0.181146	0.622188	0.295427
434.	4.980000	0.243825	0.178954	0.622500	0.302449
435.	4.982500	0.253608	0.175433	0.622813	0.308373
436.	4.985000	0.262636	0.170709	0.623125	0.313240
437.	4.987500	0.270841	0.164902	0.623438	0.317092
438.	4.990000	0.278166	0.158131	0.623750	0.319971
439.	4.992500	0.284565	0.150512	0.624063	0.321918
440.	4.995000	0.290001	0.142156	0.624375	0.322969
441.	4.997500	0.294447	0.133174	0.624688	0.323163
442.	5.000000	0.297884	0.123672	0.625000	0.322536
443.	5.002500	0.300300	0.113751	0.625313	0.321122
444.	5.005000	0.301688	0.103513	0.625625	0.318952
445.	5.007500	0.302050	0.093054	0.625938	0.316059
446.	5.010000	0.301392	0.082469	0.626250	0.312471
447.	5.012500	0.299727	0.071849	0.626563	0.308218
448.	5.015000	0.297074	0.061285	0.626875	0.303330

449.	5.017500	0.293455	0.050861	0.627188	0.297830
450.	5.020000	0.288902	0.040662	0.627500	0.291749
451.	5.022500	0.283448	0.030767	0.627813	0.285113
452.	5.025000	0.277134	0.021254	0.628125	0.277948
453.	5.027500	0.270006	0.012195	0.628438	0.270281
454.	5.030000	0.262115	0.003659	0.628750	0.262141
455.	5.032500	0.253517	-0.004290	0.629063	0.253553
456.	5.035000	0.244274	-0.011590	0.629375	0.244549
457.	5.037500	0.234451	-0.018190	0.629688	0.235156
458.	5.040000	0.224118	-0.024040	0.630000	0.225404
459.	5.042500	0.213349	-0.029100	0.630313	0.215324
460.	5.045000	0.202221	-0.033330	0.630625	0.204949
461.	5.047500	0.190815	-0.036710	0.630938	0.194314
462.	5.050000	0.179213	-0.039210	0.631250	0.183452
463.	5.052500	0.167497	-0.040820	0.631563	0.172399
464.	5.055000	0.155754	-0.041540	0.631875	0.161198
465.	5.057500	0.144066	-0.041370	0.632188	0.149888
466.	5.060000	0.132518	-0.040320	0.632500	0.138516
467.	5.062500	0.121191	-0.038400	0.632813	0.127129
468.	5.065000	0.110165	-0.035650	0.633125	0.115790
469.	5.067500	0.099515	-0.032100	0.633438	0.104564
470.	5.070000	0.089314	-0.027790	0.633750	0.093538
471.	5.072500	0.079629	-0.022760	0.634063	0.082818
472.	5.075000	0.070522	-0.017070	0.634375	0.072559
473.	5.077500	0.062049	-0.010780	0.634688	0.062978
474.	5.080000	0.054259	-0.003950	0.635000	0.054403
475.	5.082500	0.047195	0.003353	0.635313	0.047314
476.	5.085000	0.040893	0.011059	0.635625	0.042362
477.	5.087500	0.035381	0.019096	0.635938	0.040205
478.	5.090000	0.030681	0.027391	0.636250	0.041129
479.	5.092500	0.026808	0.035869	0.636563	0.044780
480.	5.095000	0.023767	0.044456	0.636875	0.050410
481.	5.097500	0.021559	0.053080	0.637188	0.057291
482.	5.100000	0.020177	0.061667	0.637500	0.064884
483.	5.102500	0.019608	0.070149	0.637813	0.072838
484.	5.105000	0.019834	0.078458	0.638125	0.080926
485.	5.107500	0.020829	0.086530	0.638438	0.089002
486.	5.110000	0.022564	0.094305	0.638750	0.096967
487.	5.112500	0.025006	0.101726	0.639063	0.104754
488.	5.115000	0.028115	0.108740	0.639375	0.112316
489.	5.117500	0.031850	0.115300	0.639688	0.119618
490.	5.120000	0.036167	0.121361	0.640000	0.126635
491.	5.122500	0.041018	0.126886	0.640313	0.133351
492.	5.125000	0.046354	0.131839	0.640625	0.139751

493.	5.127500	0.052123	0.136191	0.640938	0.145825
494.	5.130000	0.058273	0.139918	0.641250	0.151568
495.	5.132500	0.064752	0.143000	0.641563	0.156977
496.	5.135000	0.071506	0.145420	0.641875	0.162050
497.	5.137500	0.078480	0.147168	0.642188	0.166786
498.	5.140000	0.085623	0.148236	0.642500	0.171188
499.	5.142500	0.092882	0.148622	0.642813	0.175259
500.	5.145000	0.100205	0.148328	0.643125	0.179003
501.	5.147500	0.107540	0.147357	0.643438	0.182425
502.	5.150000	0.114840	0.145718	0.643750	0.185532
503.	5.152500	0.122055	0.143424	0.644063	0.188329
504.	5.155000	0.129141	0.140489	0.644375	0.190826
505.	5.157500	0.136053	0.136930	0.644688	0.193029
506.	5.160000	0.142748	0.132770	0.645000	0.194948
507.	5.162500	0.149186	0.128031	0.645313	0.196592
508.	5.165000	0.155330	0.122739	0.645625	0.197970
509.	5.167500	0.161144	0.116922	0.645938	0.199093
510.	5.170000	0.166594	0.110610	0.646250	0.199970
511.	5.172500	0.171649	0.103834	0.646563	0.200611
512.	5.175000	0.176280	0.096628	0.646875	0.201026
513.	5.177500	0.180462	0.089028	0.647188	0.201228
514.	5.180000	0.184170	0.081068	0.647500	0.201223
515.	5.182500	0.187382	0.072788	0.647813	0.201023
516.	5.185000	0.190080	0.064226	0.648125	0.200637
517.	5.187500	0.192247	0.055422	0.648438	0.200076
518.	5.190000	0.193868	0.046417	0.648750	0.199347
519.	5.192500	0.194930	0.037254	0.649063	0.198458
520.	5.195000	0.195424	0.027975	0.649375	0.197416
521.	5.197500	0.195341	0.018625	0.649688	0.196227
522.	5.200000	0.194677	0.009249	0.650000	0.194897
523.	5.202500	0.193428	-0.000106	0.650313	0.193428
524.	5.205000	0.191593	-0.009390	0.650625	0.191823
525.	5.207500	0.189173	-0.018560	0.650938	0.190081
526.	5.210000	0.186174	-0.027550	0.651250	0.188201
527.	5.212500	0.182603	-0.036320	0.651563	0.186180
528.	5.215000	0.178470	-0.044810	0.651875	0.184009
529.	5.217500	0.173791	-0.052960	0.652188	0.181681
530.	5.220000	0.168586	-0.060710	0.652500	0.179184
531.	5.222500	0.162878	-0.067990	0.652813	0.176499
532.	5.225000	0.156699	-0.074730	0.653125	0.173606
533.	5.227500	0.150087	-0.080870	0.653438	0.170488
534.	5.230000	0.143090	-0.086330	0.653750	0.167116
535.	5.232500	0.135767	-0.091040	0.654063	0.163465
536.	5.235000	0.128186	-0.094900	0.654375	0.159492

537.	5.237500	0.120435	-0.097840	0.654688	0.155168
538.	5.240000	0.112615	-0.099780	0.655000	0.150460
539.	5.242500	0.104848	-0.100630	0.655313	0.145325
540.	5.245000	0.097281	-0.100320	0.655625	0.139742
541.	5.247500	0.090083	-0.098780	0.655938	0.133688
542.	5.250000	0.083458	-0.095960	0.656250	0.127175
543.	5.252500	0.077636	-0.091800	0.656563	0.120227
544.	5.255000	0.072887	-0.086320	0.656875	0.112976
545.	5.257500	0.069511	-0.079520	0.657188	0.105618
546.	5.260000	0.067848	-0.071500	0.657500	0.098568
547.	5.262500	0.068265	-0.062390	0.657813	0.092480
548.	5.265000	0.071152	-0.052430	0.658125	0.088383
549.	5.267500	0.076910	-0.041930	0.658438	0.087597
550.	5.270000	0.085926	-0.031340	0.658750	0.091463
551.	5.272500	0.098544	-0.021240	0.659063	0.100807
552.	5.275000	0.115023	-0.012350	0.659375	0.115684
553.	5.277500	0.135491	-0.005520	0.659688	0.135603
554.	5.280000	0.159884	-0.001730	0.660000	0.159893
555.	5.282500	0.187889	-0.002030	0.660313	0.187900
556.	5.285000	0.218898	-0.007490	0.660625	0.219026
557.	5.287500	0.251980	-0.019050	0.660938	0.252699
558.	5.290000	0.285890	-0.037490	0.661250	0.288338
559.	5.292500	0.319129	-0.063250	0.661563	0.325337
560.	5.295000	0.350043	-0.096360	0.661875	0.363064
561.	5.297500	0.376974	-0.136370	0.662188	0.400882
562.	5.300000	0.398413	-0.182400	0.662500	0.438181
563.	5.302500	0.413146	-0.233180	0.662813	0.474408
564.	5.305000	0.420367	-0.287180	0.663125	0.509098
565.	5.307500	0.419716	-0.342740	0.663438	0.541878
566.	5.310000	0.411269	-0.398290	0.663750	0.572518
567.	5.312500	0.395473	-0.452380	0.664063	0.600871
568.	5.315000	0.373051	-0.503830	0.664375	0.626906
569.	5.317500	0.344898	-0.551730	0.664688	0.650662
570.	5.320000	0.311986	-0.595460	0.665000	0.672241
571.	5.322500	0.275288	-0.634660	0.665313	0.691792
572.	5.325000	0.235720	-0.669160	0.665625	0.709464
573.	5.327500	0.194109	-0.698990	0.665938	0.725441
574.	5.330000	0.151175	-0.724290	0.666250	0.739899
575.	5.332500	0.107526	-0.745280	0.666563	0.752997
576.	5.335000	0.063668	-0.762230	0.666875	0.764884
577.	5.337500	0.020007	-0.775450	0.667188	0.775708
578.	5.340000	-0.023130	-0.785250	0.667500	0.785591
579.	5.342500	-0.065500	-0.791940	0.667813	0.794644
580.	5.345000	-0.106910	-0.795820	0.668125	0.802969

581.	5.347500	-0.147220	-0.797160	0.668438	0.810640
582.	5.350000	-0.186330	-0.796240	0.668750	0.817751
583.	5.352500	-0.224160	-0.793280	0.669063	0.824343
584.	5.355000	-0.260690	-0.788510	0.669375	0.830486
585.	5.357500	-0.295870	-0.782130	0.669688	0.836221
586.	5.360000	-0.329720	-0.774330	0.670000	0.841607
587.	5.362500	-0.362230	-0.765260	0.670313	0.846660
588.	5.365000	-0.393420	-0.755070	0.670625	0.851416
589.	5.367500	-0.423310	-0.743900	0.670938	0.855908
590.	5.370000	-0.451940	-0.731860	0.671250	0.860156
591.	5.372500	-0.479320	-0.719070	0.671563	0.864181
592.	5.375000	-0.505500	-0.705630	0.671875	0.868011
593.	5.377500	-0.530520	-0.691610	0.672188	0.871651
594.	5.380000	-0.554400	-0.677100	0.672500	0.875114
595.	5.382500	-0.577190	-0.662170	0.672813	0.878418
596.	5.385000	-0.598930	-0.646890	0.673125	0.881580
597.	5.387500	-0.619650	-0.631310	0.673438	0.884601
598.	5.390000	-0.639400	-0.615480	0.673750	0.887495
599.	5.392500	-0.658200	-0.599460	0.674063	0.890269
600.	5.395000	-0.676100	-0.583280	0.674375	0.892932
601.	5.397500	-0.693130	-0.566980	0.674688	0.895486
602.	5.400000	-0.709320	-0.550590	0.675000	0.897933
603.	5.402500	-0.724710	-0.534150	0.675313	0.900289
604.	5.405000	-0.739340	-0.517690	0.675625	0.902567
605.	5.407500	-0.753220	-0.501220	0.675938	0.904744
606.	5.410000	-0.766410	-0.484780	0.676250	0.906860
607.	5.412500	-0.778910	-0.468380	0.676563	0.908890
608.	5.415000	-0.790760	-0.452040	0.676875	0.910847
609.	5.417500	-0.801990	-0.435770	0.677188	0.912734
610.	5.420000	-0.812630	-0.419590	0.677500	0.914562
611.	5.422500	-0.822690	-0.403520	0.677813	0.916323
612.	5.425000	-0.832210	-0.387560	0.678125	0.918028
613.	5.427500	-0.841200	-0.371730	0.678438	0.919674
614.	5.430000	-0.849700	-0.356020	0.678750	0.921271
615.	5.432500	-0.857710	-0.340460	0.679063	0.922811
616.	5.435000	-0.865270	-0.325050	0.679375	0.924310
617.	5.437500	-0.872380	-0.309790	0.679688	0.925752
618.	5.440000	-0.879070	-0.294690	0.680000	0.927150
619.	5.442500	-0.885360	-0.279750	0.680313	0.928505
620.	5.445000	-0.891270	-0.264980	0.680625	0.929826
621.	5.447500	-0.896810	-0.250370	0.680938	0.931103
622.	5.450000	-0.901990	-0.235940	0.681250	0.932338
623.	5.452500	-0.906830	-0.221680	0.681563	0.933532
624.	5.455000	-0.911360	-0.207600	0.681875	0.934706

625.	5.457500	-0.915570	-0.193700	0.682188	0.935836
626.	5.460000	-0.919490	-0.179970	0.682500	0.936937
627.	5.462500	-0.923120	-0.166420	0.682813	0.938001
628.	5.465000	-0.926480	-0.153050	0.683125	0.939036
629.	5.467500	-0.929580	-0.139850	0.683438	0.940041
630.	5.470000	-0.932440	-0.126840	0.683750	0.941027
631.	5.472500	-0.935050	-0.113990	0.684063	0.941973
632.	5.475000	-0.937440	-0.101330	0.684375	0.942901
633.	5.477500	-0.939610	-0.088840	0.684688	0.943801
634.	5.480000	-0.941580	-0.076520	0.685000	0.944684
635.	5.482500	-0.943340	-0.064380	0.685313	0.945534
636.	5.485000	-0.944920	-0.052400	0.685625	0.946372
637.	5.487500	-0.946310	-0.040600	0.685938	0.947181
638.	5.490000	-0.947520	-0.028960	0.686250	0.947962
639.	5.492500	-0.948570	-0.017480	0.686563	0.948731
640.	5.495000	-0.949460	-0.006180	0.686875	0.949480
641.	5.497500	-0.950200	0.004970	0.687188	0.950213
642.	5.500000	-0.950790	0.015957	0.687500	0.950924

# Anexa 5. Codul *MAT\_ASF\_DE* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF\_DE conform schemei logice prezentate în figura 3.5 din capitolul 3

- <u>Etapa 1</u>. Se citesc următoarele valori ale variabilelor de intrare:
  - o *nmax* numărul maxim de puncte pe care algoritmul ASF\_DE le poate utiliza;
  - o eps precizia setată de către utilizator;
  - *GLOBAL\_freq\_list* lista frecvențelor inițiale;
  - GLOBAL\_meas\_list parametrii S.

Pentru citirea datelor din fișier, s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> sparameters prin intermediul căreia a fost creat un obiect care înglobează totalitatea datelor incluse în fișier. Sintaxa acestei funcții este Sparam = sparameters(filename), unde Sparam reprezintă obiectul creat, iar filename reprezintă numele fișierului. Pentru extragerea frecvențelor și a parametrilor  $S_{11}$  se utilizează următoarea secvență de cod:

```
GLOBAL_freq_list = Sparam.Frequencies;
GLOBAL_meas_list = Sparam.Parameters(1,1,:);
```

• <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare *fact*, iar întregul vector de frecvențe inițiale *GLOBAL\_freq\_list* este normat cu valoarea variabilei *fact*, folosind următoarea secvență de cod:

fact = ((GLOBAL freq list(end) - GLOBAL freq list(1)) \* 10);

• <u>Etapa 3</u>: Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în frecvențe normate și a parametrilor  $S_{11}$  în amplitudinile  $A_{11}$  corespunzătoare:

GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list / fact; GLOBAL\_meas\_list = (sqrt(real(GLOBAL\_meas\_list).^2 + imag(GLOBAL\_meas\_list).^2)); • <u>Etapa 4</u>: Se aleg trei puncte corespunzătoare frecvenței minime, maxime și celei identificate la jumătatea intervalului dintre frecvența minimă si maximă. Pentru implementare, autoarea prezentei teze de doctorat a elaborat o funcție al cărei prototip este:

```
current freq list tmp = linearly spaced point(ninit);
```

Funcția *linearly\_spaced\_point* returnează o listă de *ninit* valori uniform distribuite în intervalul determinat de valoarea minimă, respectiv maximă a vectorului *GLOBAL\_freq\_list*. Inițial, *ninit* are valoarea 3. Implementarea propriu – zisă a funcției este:

```
function current_freq_list_tmp = linearly_spaced_point(ninit)
    global GLOBAL_N;
    global GLOBAL_freq_list;
    delta = floor(ninit) - 1;
    current_freq_list_tmp = GLOBAL_freq_list(1) + (0 : delta) .* (GLOBAL_freq_list(GLOBAL_N) -
    GLOBAL_freq_list(1)) / delta;
    current_freq_list_tmp(1) = GLOBAL_freq_list(1);
    current_freq_list_tmp(end) = GLOBAL_freq_list(GLOBAL_N);
end
```

Deoarece vectorul *current\_freq\_list\_tmp* poate conține valori care nu există în vectorul *GLOBAL\_freq\_list*, autoarea a dezvoltat o funcție cu următorul prototip:

```
GLOBAL_current_freq_list = set_known_frequencies(current_freq_list_tmp);
```

Funcția *set\_known\_frequencies* parcurge vectorul *current\_freq\_list\_temp* element cu element. Pentru elementul curent se identifică poziția în lista frecvențelor *GLOBAL\_freq\_list* a valorii imediat superioare în raport cu valoarea elementului curent, iar în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list* este adăugat elementul din *GLOBAL\_freq\_list* aflat pe poziția identificată.

```
function [current_freq_list] = set_known_frequencies(current_freq_list_tmp)
    global GLOBAL_N;
    global GLOBAL freq list;
```

```
pos = 1;
current_freq_list = [];
for i = 1 : length(current_freq_list_tmp)
      pos = find_freq_position(GLOBAL_freq_list, current_freq_list_tmp(i), pos);
      current_freq_list(i) = GLOBAL_freq_list(pos);
    end
end
```

Ulterior, se caută în vectorul *GLOBAL\_meas\_list* valorile corespunzătoare frecvențelor. În acest sens, a fost implementată funcția *get\_measurement* care primește ca parametru de intrare *GLOBAL\_current\_freq\_list* și returnează *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

*GLOBAL\_current\_freq\_list* este o variabilă globală în care sunt adăugate toate frecvențele evaluate de către algoritm (numărul redus de frecvențe). *GLOBAL\_current\_meas\_list* este o variabilă globală în care sunt adăugate amplitudinile corespunzătoare frecvențelor din vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*.

```
GLOBAL_current_meas_list = get_measurement(GLOBAL_current_freq_list);
```

• <u>Etapa 5.</u> Se inițializează variabila *progress* cu valoarea *true*. Cât timp variabila *progress* va avea valoarea *true*, se vor parcurge următoarele secvențe implementate în cadrul funcției *euclidian\_distance* definite de către autoare:

- <u>Etapa 6 + 7:</u>
  - P1. se parcurge *GLOBAL\_current\_freq\_list* de la primul până la penultimul element și pentru fiecare două puncte calculează distanța euclidiană.
  - P2. fiecare valoare obținută se salvează în vectorul *dist\_max*.

```
dist_max = [];
for i = 1 : (length(GLOBAL_current_freq_list) - 1)
        dist_max(i) = sqrt((GLOBAL_current_freq_list(i + 1) - GLOBAL_current_freq_list(i)).^2 +
        (GLOBAL_current_meas_list(i + 1) - GLOBAL_current_meas_list(i)).^2);
```

pos point(i) = i;

end

• P3. se sortează descrescător distanțele maxime, păstrând însă și un index al lor prin intermediul vectorului pos\_point.

```
SORT_DIST(:, 1) = dist_max;
SORT_DIST(:, 2) = pos_point;
SORT_DIST = sortrows(SORT_DIST, 1);
dist_max = flipud(SORT_DIST(:, 1));
pos_point = flipud(SORT_DIST(:, 2));
```

- P4. în următorul pas se calculează noua frecvență situată la jumătatea intervalului de frecvențe normate, med\_freq.
- P5. se caută cea mai apropiată valoare a variabilei *med\_freq* în *GLOBAL\_freq\_list*:
  - dacă aceasta există deja în GLOBAL\_current\_freq\_list, atunci valoarea variabilei evaluate va fi setată cu valoarea 1:
    - ♦ se trece la următoarea distanță maximă din vectorul *dist\_max*
    - ✤ se identifică o frecvență nouă și algoritmul se reia din pasul P5.
  - dacă însă noua valoare a variabilei med\_freq <u>nu</u> există în vectorul GLOBAL\_current\_freq\_list, atunci valoarea variabilei evaluate va fi setată cu valoarea 0, iar funcția returnează noua valoare a frecvenței, împreuna cu distanța maximă calculată.

```
new_value = new_value + 1;
end
evaluate = any(GLOBAL_freq_list(new_value) == GLOBAL_current_freq_list);
k = k + 1;
end
```

• <u>Etapa 8</u>: se caută valoarea amplitudinii  $A_{11}$  în vectorul *GLOBAL\_meas\_list* corespunzătoare noii frecvențe *new\_freq\_list* și se atribuie valoarea variabilei *new\_meas\_list*. Folosind funcția *merge\_freq\_meas\_list* implementată de către autoare, se adaugă *new\_freq\_list* în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, iar valoarea *new\_meas\_list* corespunzătoare frecvenței în *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

```
new_meas_list = get_measurement(new_freq_list);
merge_freq_meas_lists (new_freq_list, new_meas_list);
```

- <u>Etapa 9</u>: se verifică dacă este îndeplinită una din condițiile de ieșire din algoritm:
  - numărul maxim de puncte impuse de utilizator a fost atins (funcția întoarce codul 1 pentru a informa cu privire la îndeplinirea condiției de maxim);
  - distanța maximă este mai mică decât valoarea impusă de către utilizator (funcția întoarce 2 pentru a informa cu privire la îndeplinirea condiție de precizie).

Dacă niciuna dintre condițiile de oprire nu este îndeplinită, atunci valoarea lui *n* este incrementată cu o unitate, iar algoritmul este reluat din etapa 5.

```
if (n >= nmax)
    progress = false;
    return_case = 1;
end
```

```
if (dist_max < epsilon)
    progress = false;
    return_case = 2;
end</pre>
```

• <u>Etapa 10</u>: În caz contrar, se realizează trecerea inversă din frecvențe normate în frecvențele inițiale prin multiplicarea cu valoarea variabilei *fact*. Operația de multiplicare se aplică atât pentru lista frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list*, cât și pentru lista redusă de frecvențe *GLOBAL\_current\_freq\_list*:

```
GLOBAL_current_freq_list = GLOBAL_current_freq_list * fact;
GLOBAL freq list = GLOBAL freq list * fact;
```

Folosind lista redusă de frecvențe *GLOBAL\_current\_freq\_list*, lista redusă a amplitudinilor *GLOBAL\_current\_meas\_list*, precum și lista frecvențelor inițiale *GLOBAL\_freq\_list* se aplică funcția Matlab<sup>®</sup> *interp1* pentru aproximarea unei funcții *f* care trece prin punctele determinate de (*GLOBAL\_current\_freq\_list*, *GLOBAL\_current\_meas\_list*). Funcția *interp1* are următoarea sintaxă:

```
interp_amplitude = interp1(GLOBAL_current_freq_list, GLOBAL_current_meas_list, GLOBAL_freq_list,
'spline');
```

GLOBAL\_freq\_list reprezintă în cadrul funcției interp1 vectorul punctelor în care se dorește aproximarea funcției f.

current\_interp\_meas\_list este vectorul obținut prin aproximarea funcției f în punctele GLOBAL\_freq\_list prin metoda de interpolare

spline.

Folosind valorile interpolate se trasează graficul frecvență – amplitudine, folosind funcția Matlab<sup>®</sup> plot:

```
plot(GLOBAL_freq_list, interp_amplitude, 'red');
hold on;
xlabel('Frecventa [Hz]');
ylabel('A11 [dB]');
hold off;
```

# Anexa 6. Codul *MAT\_ASF\_PEV* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF\_PEV conform schemei logice prezentate în figura 3.16 din capitolul 3

• <u>Etapa 1</u>. Se citesc următoarele valori ale variabilelor de intrare:

*initial\_step* – pasul de explorare inițial;

- *GLOBAL\_freq\_list* lista frecvențelor inițiale;
- GLOBAL\_meas\_list parametrii S.

Pentru citirea datelor din fișier, s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> sparameters prin intermediul căreia a fost creat un obiect care înglobează totalitatea datelor incluse în fișier. Sintaxa acestei funcții este Sparam = sparameters(filename), unde Sparam reprezintă obiectul creat, iar filename reprezintă numele fișierului. Pentru extragerea frecvențelor și a parametrilor  $S_{11}$  se utilizează următoarea secvență de cod:

```
GLOBAL_freq_list = Sparam.Frequencies;
GLOBAL meas list = Sparam.Parameters(1,1,:);
```

• <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare *fact*, iar întregul vector de frecvențe inițiale *GLOBAL\_freq\_list* este normat cu valoarea variabilei *fact*, folosind următoarea secvență de cod:

fact = ((GLOBAL\_freq\_list(end) - GLOBAL\_freq\_list(1)) \* 10);

• <u>Etapa 3</u>: Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în frecvențe normate;

GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list / fact;

<u>Etapa 4</u>: Se realizează conversia tuturor parametrilor  $S_{11}$  în amplitudinile  $A_{11}$  corespunzătoare: GLOBAL\_meas\_list = (sqrt(real(GLOBAL\_meas\_list).^2 + imag(GLOBAL\_meas\_list).^2));

• <u>Etapa 5.</u> Se inițializează variabila *progress* cu valoarea *true*. Cât timp variabila *progress* va avea valoarea *true*, se vor parcurge următoarele secvențe implementate în cadrul funcției *variable\_step* definite de către autoare:

• <u>Etapa 6:</u>

• P1. Se calculează unghiul α:

```
y = [GLOBAL_current_meas_list(k - 1) GLOBAL_current_meas_list(k)];
x = [GLOBAL_current_freq_list(k - 1) (GLOBAL_current_freq_list(k))]*10;
α = abs(atand(abs(y(2) - y(1)) / abs(x(2) - x(1))));
```

P2. Se testează dacă valoarea unghiului α este mai mică decât valoarea unghiului θ impus de către utilizator. La condiție îndeplinită, pasul de explorare este dublat. La neîndeplinirea condiției referitoare la unghiul α, pasul de explorare se stabileşte la o pătrime din valoarea anterioară.

```
if (a < 0)
    new_step = current_step * 2;
else
    new_step = current_step / 4;
end</pre>
```

- P3. în următorul pas se calculează noua frecvență folosind noul pas de explorare.
- P4. se caută frecvența corespunzătoare acestei valori în vectorul GLOBAL\_freq\_list;
- P5. noua valoare este adăugată în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, precum și valoarea calculată a amplitudinii A<sub>11</sub> corespunzătoare în *GLOBAL\_current\_meas\_list*;

```
GLOBAL_current_freq_list(k) = current_freq_list;
GLOBAL_current_meas_list(k) = new_meas_list;
```

P6. algoritmul își reia execuția ciclică până când noua frecvență depășește frecvența maximă din lista frecvențelor GLOBAL\_

freq\_list.

```
if ((GLOBAL_current_freq_list(k) + step) > GLOBAL_freq_list(end))
```

progress = false;

end

În momentul în care valoarea variabilei *progress* devine *false*, valorile vectorului *GLOBAL\_current\_freq\_list* sunt multiplicate cu valoarea variabilei *fact* pentru a reveni la frecvențele inițiale. Ulterior se parcurg pașii asociați etapei 10 descriși în Anexa 5.
# Anexa 7. Codul *MAT\_ASF\_PE* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF\_PE conform schemei logice prezentate în figura 3.23 din capitolul 3

- <u>Etapa 1</u>. Se citesc următoarele valori ale variabilelor de intrare:
  - o eps precizia setată de către utilizator;
  - *GLOBAL\_freq\_list* lista frecvențelor inițiale;
  - *GLOBAL\_meas\_list* parametrii *S*.

Pentru citirea datelor din fișier, s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> sparameters prin intermediul căreia a fost creat un obiect care înglobează totalitatea datelor incluse în fișier. Sintaxa acestei funcții este Sparam = sparameters(filename), unde Sparam reprezintă obiectul creat, iar filename reprezintă numele fișierului. Pentru extragerea frecvențelor și a parametrilor  $S_{11}$  se utilizează următoarea secvență de cod:

```
GLOBAL_freq_list = Sparam.Frequencies;
GLOBAL meas list = Sparam.Parameters(1,1,:);
```

• <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare *fact*, iar întregul vector de frecvențe inițiale *GLOBAL\_freq\_list* este normat cu valoarea variabilei *fact*, folosind următoarea secvență de cod:

fact = ((GLOBAL\_freq\_list(end) - GLOBAL\_freq\_list(1)) \* 10);

• <u>Etapa 3</u>: Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale în frecvențe normate și a parametrilor  $S_{11}$  în amplitudinile  $A_{11}$  corespunzătoare:

GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list / fact; GLOBAL\_meas\_list = (sqrt(real(GLOBAL\_meas\_list).^2 + imag(GLOBAL\_meas\_list).^2));

• <u>Etapa 4</u>: Se aleg 5% din totalul frecvențelor din lista inițială de frecvențe GLOBAL\_freq\_list, uniform distribuite în domeniul frecvențelor normate.

current\_freq\_list\_tmp = linearly\_spaced\_point(5/100\*length(GLOBAL\_freq\_list));

Se apelează funcțiile *linearly\_spaced\_point* și set\_known\_frequencies descrise anterior pentru lista frecvențelor *current\_freq\_list\_tmp* obținute în pasul precedent.

Ulterior, se caută în vectorul *GLOBAL\_meas\_list* valorile corespunzătoare frecvențelor. În acest sens, a fost implementată funcția *get\_measurement* care primește ca parametru de intrare *GLOBAL\_current\_freq\_list* și returnează *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

*GLOBAL\_current\_freq\_list* este o variabilă globală în care sunt adăugate toate frecvențele evaluate de către algoritm (numărul redus de frecvențe). *GLOBAL\_current\_meas\_list* este o variabilă globală în care sunt adăugate amplitudinile corespunzătoare frecvențelor din vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*.

```
GLOBAL_current_meas_list = get_measurement(GLOBAL_current_freq_list);
```

• <u>Etapa 5.</u> Se calculează coeficienții funcției polinomiale f de grad N - 1 determinată de cele N puncte (respectiv 5%). Pentru calculul acestora se utilizează funcția *interp1* descrisă în Anexa 5:

```
interp_measurements = interp1(GLOBAL_current_freq_list, GLOBAL_current_meas_list,
GLOBAL_freq_list, 'spline');
```

• Etapa 6: În lista valorilor aproximate pentru amplitudini se identifică valorile extreme ce respectă una dintre condițiile:

a)  $valoare\_aproximat\breve{a}_{k-1} < valoare\_aproximat\breve{a}_k > valoare\_aproximat\breve{a}_{k+1}$ , unde  $valoare\_aproximat\breve{a}_k$  reprezintă punct de maxim; b)  $valoare\_aproximat\breve{a}_{k-1} > valoare\_aproximat\breve{a}_k < valoare\_aproximat\breve{a}_{k+1}$ , unde  $valoare\_aproximat\breve{a}_k$  reprezintă punct de minim; De asemenea, se verifică dacă  $valoare\_aproximat\breve{a}_k$  există deja în lista frecvențelor evaluate anterior, respectiv  $GLOBAL\_current\_freq\_list$ .

```
new_freq_list(k) = GLOBAL_freq_list(i);
    k = k + 1;
end
elseif ((interp_measurements(i - 1) < interp_measurements(i)) &&
(interp_measurements(i) > interp_measurements(i + 1)))
    % Maximum extreme points
    if (in_array(GLOBAL_current_freq_list, GLOBAL_freq_list(i)) == false)
        new_freq_list(k) = GLOBAL_freq_list(i);
        k = k + 1;
end
```

end

end

- <u>Etapa 8</u>: Pentru valorile extreme calculate se identifică frecvențele normate corespunzătoare, folosind funcția *get\_measurement(new\_freq\_list)* descrisă în Anexa 5.
- <u>Etapa 9</u>: Pentru fiecare frecvență din Anexa 4 se calculează (utilizând relația (3.30)) diferența dintre valoarea aproximată a amplitudinii și valoarea măsurată a acesteia. Dacă diferența este mai mare decât valoarea impusă pentru *eps*, atunci algoritmul se reia de la etapa 5, adăugând de fiecare dată noile frecvențe normate corespunzătoare punctelor de maxim și minim în lista frecvențelor normate evaluate de către ASF\_PE. Algoritmul își încheie execuția atunci când nicio diferență dinte valorile aproximate și cele măsurate nu depășește valoarea stabilită pentru *eps*.

```
if (abs(interp_measurements(position_interp) - new_meas_list(i)) >= eps)
        progress = true;
end
```

În ultima etapă se realizează trecerea inversă din frecvențe normate în frecvențele inițiale prin multiplicarea cu valoarea variabilei *fact* și se parcurg pașii descriși în etapa 10 din Anexa 5.

# Anexa 8. Codul *MAT\_ASF\_DMAP* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF\_DMAP conform schemei logice prezentate în figura 3.32 din capitolul 3

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fişierul specific unui set de măsurări clasice şi se citesc valorile corespunzătoare tuturor frecvențelor şi parametrilor S<sub>11</sub> corespunzători:
  - *GLOBAL\_freq\_list* lista frecvențelor inițiale;
  - GLOBAL\_meas\_list parametrii S.

Pentru citirea datelor din fișier, s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> sparameters prin intermediul căreia a fost creat un obiect care înglobează totalitatea datelor incluse în fișier. Sintaxa acestei funcții este Sparam = sparameters(filename), unde Sparam reprezintă obiectul creat, iar filename reprezintă numele fișierului. Pentru extragerea frecvențelor și a parametrilor  $S_{11}$  se utilizează următoarea secvență de cod:

```
GLOBAL_freq_list = Sparam.Frequencies;
GLOBAL meas list = Sparam.Parameters(1,1,:);
```

• <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale:

fact = ((GLOBAL\_freq\_list(end) - GLOBAL\_freq\_list(1)) \* 10);

• <u>Etapa 3</u>: Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale dimensionale în frecvențe normate adimensionale și se determină amplitudinile  $A_{11}$  pe baza parametrilor  $S_{11}$  (pentru fiecare frecvență).:

GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list / fact; GLOBAL\_meas\_list = (sqrt(real(GLOBAL\_meas\_list).^2 + imag(GLOBAL\_meas\_list).^2));

• <u>Etapa 4</u>: Se aleg 5% din frecvențele inițiale, respectiv *GLOBAL\_freq\_list*, folosind funcția *linearly\_spaced\_point(5/100\*length(GLOBAL\_freq\_list))* descrisă în Anexa 5. Cele 5% frecvențe sunt selectate astfel încât să fie

uniform distribuite în domeniul frecvențelor normate, folosind funcția *set\_known\_frequencies(current\_freq\_list\_tmp)*, descrisă de asemenea anterior. Ulterior, se calculează amplitudinile corespunzătoare acestora, prin intermediul funcției *get\_measurement(GLOBAL\_current\_freq\_list)*. Punctele rezultate în planul xOy (x corespunde frecvențelor normate și y – amplitudinilor) reprezintă puncte inițiale pentru algoritm.

```
current_freq_list_tmp = linearly_spaced_point(ninit);
GLOBAL_current_freq_list = set_known_frequencies(current_freq_list_tmp);
GLOBAL_current_meas_list = get_measurement(GLOBAL_current_freq_list);
```

• <u>Etapa 5.</u> Se determină funcția polinomială f(x) de grad N - 1 al cărei grafic să treacă prin cele N puncte selectate, respectiv (5% în etapa inițială), folosind funcția predefinită *interp1*.

```
current_interp_meas_list = interp1(GLOBAL_current_freq_list, GLOBAL_current_meas_list,
GLOBAL freq list, 'spline');
```

• Etapa 6: Se determină funcțiile liniare  $g_k(x)$  ale căror grafic trece prin două puncte consecutive din planul xOy:

interp\_linear = interp1(GLOBAL\_current\_freq\_list, GLOBAL\_current\_meas\_list, GLOBAL\_freq\_list,
'linear')

• <u>Etapa 7</u>: Se evaluează, în vectorul diferență, diferența maximă |f - g| pe fiecare interval corespunzător fiecăror două puncte consecutive. Vectorul diferență este format din diferența dintre funcțiile f și g. Pentru implementare, autoarea a dezvoltat o funcție *approximate\_points(eps)*. Punctele consecutive sunt identificate prin valorile zero în vectorul diferență. În pasul următor se parcurg intervalele delimitate de fiecare două zerouri în vectorul diferență și se calculează valoare maximă pe interval, prin intermediul variabilei *dmax*. Concomitent cu identificarea valorii maxime, se păstrează și poziția în vectorul *dS* a acesteia, folosind variabila *dpos*. Ulterior, se verifică dacă frecvența corespunzătoare poziției *dpos* a fost evaluată anterior. În caz contrar, noua frecvență este adăugată în vectorul *new\_freq\_list* pentru evaluare.

dS = abs(interp\_measurements - interp\_linear);

```
zeros = find(dS == 0);
zeros(length(zeros) + 1) = length(GLOBAL freq list);
new freq list = [];
k = 1;
for i = 1 : (length(zeros) - 1)
     dmax = 0;
     dpos = 0;
     for j = zeros(i) : zeros(i + 1)
          if (dmax < dS(j) \& (dS(j) > epsilon))
               dmax = dS(j);
               dpos = j;
          end
     end
     if dpos > 0
          if (in array(GLOBAL current freq list, GLOBAL freq list(dpos)) == false)
               new freq list(k) = GLOBAL freq list(dpos);
               k = k + 1;
          end
     end
end
```

• Etapa 8: Algoritmul îsi încheie executia dacă este îndeplinită una din următoarele condiții:

a) toate diferențele maxime au o valoarea mai mică decât o valoare (*dmax*) impusă de către utilizator;

b) numărul total de puncte este mai mare decât o valoare (*nmax*) prestabilită tot de către utilizator.

În cazul în care este îndeplinită condiția de oprire, se realizează trecerea inversă din frecvențe normate în frecvențele inițiale prin multiplicarea cu valoarea variabilei *fact*. În ultima etapă se parcurg pașii prezentați în Anexa 5.

# Anexa 9. Codul *MAT\_ASF\_IRI* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului ASF\_IRI conform schemei logice prezentate în figura 3.44 din capitolul 3

- <u>Etapa 1</u>. Se deschide fişierul specific unui set de măsurări clasice şi se citesc valorile corespunzătoare tuturor frecvențelor şi parametrilor S<sub>11</sub> corespunzători:
  - *GLOBAL\_freq\_list* lista frecvențelor inițiale;
  - *GLOBAL\_meas\_list* parametrii *S*.

Pentru citirea datelor din fișier, s-a utilizat funcția Matlab<sup>®</sup> sparameters prin intermediul căreia a fost creat un obiect care înglobează totalitatea datelor incluse în fișier. Sintaxa acestei funcții este Sparam = sparameters(filename), unde Sparam reprezintă obiectul creat, iar filename reprezintă numele fișierului. Pentru extragerea frecvențelor și a parametrilor  $S_{11}$  se utilizează următoarea secvență de cod:

```
GLOBAL_freq_list = Sparam.Frequencies;
GLOBAL meas list = Sparam.Parameters(1,1,:);
```

• <u>Etapa 2</u>. Se calculează factorul de normare care să permită conversia frecvențelor inițiale, exprimate în GHz, în frecvențe normate adimensionale:

fact = ((GLOBAL freq list(end) - GLOBAL freq list(1)) \* 10);

<u>Etapa 3</u>: Se realizează conversia tuturor frecvențelor inițiale dimensionale în frecvențe normate adimensionale și se determină amplitudinile A<sub>11</sub> pe baza parametrilor S<sub>11</sub> (pentru fiecare frecvență).:

GLOBAL\_freq\_list = GLOBAL\_freq\_list / fact; GLOBAL\_meas\_list = (sqrt(real(GLOBAL\_meas\_list).^2 + imag(GLOBAL\_meas\_list).^2));

 <u>Etapa 4</u>: Se aleg trei puncte corespunzătoare frecvenței minime, maxime și celei identificate la jumătatea intervalului dintre frecvența minimă și maximă.

```
current freq list tmp = linearly spaced point(ninit);
GLOBAL current freq list = set known frequencies (current freq list tmp);
GLOBAL current meas list = get measurement(GLOBAL current freq list);
  • <u>Etapa 5.</u> Se calculează funcțiile raționale R_1(f), R_2(f) și R_3(f).
k = 1;
dNumer(k, i) = GLOBAL meas list (k);
dDenom(k, i) = 1;
dR(k, i) = dNumer(k, i) . / dDenom(k, i);
k = 2;
dS(k) = GLOBAL meas list(length(GLOBAL meas list));
dPhi k(k) = (dFreq(k) - dFreq(k - 1)) ./ (GLOBAL meas list(k) - dS(k - 1));
for i = 1 : length(GLOBAL freq list);
    dNumer(k, i) = dPhi k(2) .* dNumer(k - 1, i) + (GLOBAL freq list(i) - GLOBAL freq list(1));
    dDenom(k, i) = (dFreg(k) - dFreg(k - 1)) ./ (dS(k) - dS(k - 1));
    dR(k, i) = dNumer(k, i) . / dDenom(k, i);
end
k = 3;
dFreq(k) = GLOBAL freq list(round(length(GLOBAL freq list)/2));
iFreqIndex(k) = round(length(GLOBAL freq list)/2);
dS(k) = GLOBAL meas list(iFreqIndex(k));
for k = 3 : iN;
  i = k;
  dPhik = Phi k(i, k, dFreq, dS, dPhi k);
  dPhi k(k) = dPhik;
  for i = 1 : length(GLOBAL freq list);
    dNumer(k, i) = dPhi k(k) .* dNumer(k - 1, i) + (GLOBAL freq list(i)-dFreq(k - 1)) .*
dNumer(k - 2, i);
```

```
dDenom(k, i) = dPhi_k(k) .* dDenom(k - 1, i) + (GLOBAL_freq_list(i)-dFreq(k - 1)) .*
dDenom(k - 2, i);
dR(k, i) = dNumer(k, i) ./ dDenom(k, i);
end
.....
end
• <u>Etapa 6:</u> Se calculează diferența maximă pentru diferențele dintre |R<sub>2</sub>(f) - R<sub>3</sub>(f), iar rezultatul este depus în variabila dResError.
for i = 1 : length(GLOBAL_freq_list);
if i == iFreqIndex(k);
dResError(i) = 0;
else
dResError(i) = abs(dR(k, i) - dR(k - 1, i));
end
```

```
end
```

• <u>Etapa 7</u>: Se identifică frecvența normată corespunzătoare valorii diferenței maxime, identificate pe poziția *iResMaxErrorIndex* în vectorul *GLOBAL\_freq\_list*.

```
dFreq(k + 1) = GLOBAL freq list(iResMaxErrorIndex);
```

• <u>Etapa 8</u>: Se identifică valoarea amplitudinii  $A_{11}$  corespunzătoare frecvenței de la etapa 7 și se depune în variabila dS.

dS(k + 1) = GLOBAL meas list(iResMaxErrorIndex);

• Etapa 9: Se testează îndeplinirea uneia dintre condițiile de oprire:

a) dacă k < nmax;

```
b) dacă |R_k(f) - R_{k-1}(f)| < dmax;
```

unde:

*nmax* este un număr maxim de frecvențe setat de utilizator;

 $R_k(f)$  și  $R_{k-1}(f)$  – funcțiile raționale corespunzătoare pasului curent, respectiv pasului anterior;

dmax – valoarea maximă admisibilă pentru diferența  $|R_k(f) - R_{k-1}(f)|$ .

• <u>Etapa 10</u>: Algoritmul se oprește dacă este îndeplinită una dintre condițiile de oprire normală *a*) sau oprire forțată *b*). În caz contrar, algoritmul se reia cu etapa 5.

În cazul în care este îndeplinită condiția de oprire, se realizează trecerea inversă din frecvențe normate în frecvențele inițiale prin multiplicarea cu valoarea variabilei *fact*. În ultima etapă se parcurg pașii prezentați în Anexa 5.

# Anexa 10. Codul *MAT\_ASF\_COMPARE* dezvoltat în mediul Matlab<sup>®</sup> pentru implementarea algoritmului *ASF\_COMPARE* conform schemei logice prezentate în figura 4.2 din capitolul 4

- <u>Etapa 1</u>. Se citește frecvența minimă (*start<sub>freq</sub>*) și frecvența maximă (*stop<sub>freq</sub>*) care formează domeniul de lucru al dispozitivului testat (DUT).
- <u>Etapa 2</u>. Se citește numărul maxim de frecvențe *nmax* impus de utilizator și precizia măsurărilor, *dmax*, impusă de asemenea de către utilizator.
- <u>Etapa 3</u>: Se calculează pasul de explorare *span*:

```
span = (stop_freq - start_freq) / n;
```

- <u>Etapa 4</u>: Se determină lista inițială de frecvențe.
- Etapa 5. Se aleg *ninit=5%* frecvențe uniform distribuite din frecvențele aferente listei
- <u>Etapa 6:</u> Se realizează măsurări fizice cu ajutorul VNA-ului pentru cele *ninit* = 5% frecvențe folosind funcția dezvoltată de către autoare, *acquire\_data*. Frecvențele pentru care se realizează măsurări sunt depuse în vectorul *GLOBAL\_current\_freq\_list*, iar valorile măsurate sunt adăugate în vectorul *GLOBAL\_current\_meas\_list*.

Funcția *acquire\_data* realizează conexiunea dintre sistemul de calcul și dispozitivul extern, reprezentat de analizorul vectorial de rețea (VNA). Ulterior, se setează timpul în care VNA – ul poate trimite răspunsul unei interogări din partea sistemului de calcul. Se deschide conxiunea și se trimite comanda de citire a parametrului S11. În acest fel, variabila *GLOBAL\_current\_freq\_list* va conține frecvența, iar variabila *GLOBAL\_current\_meas\_list* va avea asociată valoarea citită de la VNA. În ultima etapă se închide conexiunea cu VNA-ul.

```
device_connection = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0B5B::0xFFF9::1046904_768_51::0', 'Tag', '');
```

```
if isempty(device_connection)
```

```
device connection = visa('NI', 'USB0::0x0B5B::0xFFF9::1046904 768 51::INSTR');
else
    fclose(device connection);
    device connection = device connection(1)
end
device connection.TimeOut = 120;
fopen(device connection);
freq arr = [];
s11 arr = [];
[GLOBAL current freq list, GLOBAL current meas list] = get current point(device connection,
startFreq - span, startFreq + span);
freq arr = [freq arr GLOBAL current freq list];
s11 arr = [s11 arr GLOBAL current meas list];
cstart = startFreq - span;
cstop = cstart + span;
while (cstart < stopFreq - span)</pre>
    [GLOBAL current freq list, GLOBAL current meas list] = get current point(device connection,
cstart, cstop);
    freq arr = [freq arr GLOBAL current freq list];
    s11 arr = [s11 arr GLOBAL current meas list];
    cstart = cstart + span;
    cstop = cstart + span;
    pause(3);
end
```

```
[GLOBAL_current_freq_list, GLOBAL_current_meas_list] = get_current_point(device_connection,
stopFreq - span, stopFreq + span);
freq_arr = [freq_arr GLOBAL_current_freq_list];
sl1_arr = [sl1_arr GLOBAL_current_meas_list];
```

```
fclose(device_connection);
delete(device_connection);
clear device connection;
```

• <u>Etapa 7:</u> Se aplică algoritmul ASF\_DMAP prezentat în Anexa 8 pentru a stabili lista redusă de frecvențe. Ulterior se evaluază funcția *acquire\_data* pentru lista redusă de frecvențe.

• <u>Etapa 8</u>: Achiziționează parametrii *S* folosind algoritmul clasic, în timp ce în etapa 7 se achiziționează parametrii *S* folosind lista redusă de frecvențe. În acest fel, se poate realiza analiza comparativă între cei doi algoritmi.

### Anexa 11. Foaia de catalog a motorului pas cu pas 28BYJ-48 – 5V utilizat la implementarea SAAF prezentat în capitolul 4 conform referinței [W19]

#### **Stepper Motor**

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.





Rated voltage : Number of Phase Speed Variation Ratio Stride Angle Frequency DC resistance Idle In-traction Frequency Idle Out-traction Frequency In-traction Torque Self-positioning Torque Friction torque Pull in torque Insulated resistance Insulated electricity power Insulation grade Rise in Temperature Noise Model

5VDC 4 1/64 5.625° /64 100Hz > 600Hz > 1000Hz >34.3mN.m(120Hz) >34.3mN.m 600-1200 gf.cm 300 gf.cm >10MΩ(500V) 600VAC/1mA/1s А <40K(120Hz) <35dB(120Hz,No load,10cm) 28BYJ-48 – 5V



Roșca Cosmina – Mihaela: *Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi destinați achiziției și prelucrării parametrilor S cu aplicații în îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea din domeniul microundelor* – Teză de doctorat



.O. Box 8231 Cherrywood Tauranga New Zealand Phone: ++64 7 578 7739 Fax: ++64 7 578 7749E-mail: enquiry@kiatronics.com

Website: www.kiatronics.com Copyright Welten Holdings Ltd - Specifications subject to change without further notice.

#### Anexa 12. Codul dezvoltat în mediul Matlab® PROG\_SAAF pentru implementarea SAAF prezentat în capitolul 4

În cele ce urmează se prezintă codul care implementează schema de automatizare a sistemului automat de acordare a unui filtru (abreviat SAAF).

```
for i = 1 : length(new Sparam)
  ok = 0;
 while (ok == 0)
     res = device connector('192.168.0.100', 5001, 0);
     new Sparam = sparameters(filename);
     etalon Sparam = handles.dS11 lin;
     current Sparam = abs(squeeze(new Sparam.Parameters(1,1,:)));
     figure(1);plot(handles.freq, current Sparam);hold on;
     xlabel('f [Hz]') % x-axis label
     ylabel('A') % y-axis label
     hold off;
     figure(2);plot(handles.freq, handles.dS11 lin, 'r', handles.freq, current Sparam, 'b');
     plot(handles.axes1, handles.freq, handles.dS11 lin, 'r', handles.freq, current Sparam, 'b');
     di = current Sparam(k) - etalon Sparam(k);
     if ((di) > handles.eps)
          n = round(1280*abs(di));
          if (di > 0)
               start stepper(n, right);
          else
               start stepper(n, stanga);
          end
     else
          ok = 1;
     end
     pause(1);
  end
end
```

Nr.	GHZ	S11RE	S11IM	S21RE	S21IM	S12RE	S12IM	S22RE	S22IM
1.	14.0000000	-0.6133627	0.7570080	-0.0000486	0.0000498	0.0001672	-0.0001837	0.5652439	0.6880414
2.	14.0015000	-0.6064216	0.7637061	-0.0000133	0.0000271	0.0002191	-0.0002193	0.5831317	0.6702539
3.	14.0030000	-0.5995595	0.7703739	-0.0000366	-0.0000127	0.0002114	-0.0002007	0.6005620	0.6523106
4.	14.0045000	-0.5925629	0.7771587	-0.0000835	0.0001744	0.0001783	-0.0002110	0.6175824	0.6335064
5.	14.0060000	-0.5856047	0.7839580	-0.0000386	0.0001878	0.0001750	-0.0002062	0.6339988	0.6141480
6.	14.0075000	-0.5785782	0.7906696	0.0000209	0.0003010	0.0001859	-0.0001977	0.6496662	0.5942125
7.	14.0090000	-0.5712553	0.7971590	-0.0000102	0.0003846	0.0001913	-0.0001790	0.6647978	0.5736538
8.	14.0105000	-0.5639367	0.8037411	0.0000604	0.0005926	0.0001856	-0.0001937	0.6794442	0.5523463
9.	14.0120000	-0.5563595	0.8101374	-0.0001027	0.0006894	0.0002361	-0.0001638	0.6932225	0.5308694
10.	14.0135000	-0.5490518	0.8164008	-0.0001184	0.0008844	0.0001627	-0.0001580	0.7063394	0.5085824
11.	14.0150000	-0.5413727	0.8227735	-0.0002112	0.0010265	0.0000827	-0.0001116	0.7189526	0.4860005
12.	14.0165000	-0.5337721	0.8290256	-0.0001599	0.0009595	-0.0000361	-0.0001111	0.7307251	0.4628227
13.	14.0180000	-0.5260730	0.8352584	0.0000431	0.0008885	-0.0001100	-0.0000965	0.7416966	0.4392197
14.	14.0195000	-0.5182418	0.8412003	0.0002596	0.0005532	-0.0000810	-0.0000631	0.7518967	0.4149971
15.	14.0210000	-0.5102463	0.8470626	0.0003357	0.0004482	-0.0000217	-0.0000553	0.7614405	0.3905943
16.	14.0225000	-0.5023915	0.8530176	0.0002787	0.0003993	0.0000393	-0.0000664	0.7701004	0.3657403
17.	14.0240000	-0.4943218	0.8589116	0.0001078	0.0005689	0.0000642	-0.0001030	0.7780596	0.3404803
18.	14.0255000	-0.4861902	0.8647411	0.0002415	0.0006766	0.0000445	-0.0000774	0.7850930	0.3148198
19.	14.0270000	-0.4780579	0.8704067	0.0000928	0.0006408	0.0000330	-0.0000811	0.7912827	0.2889296
20.	14.0285000	-0.4696417	0.8760561	0.0003812	0.0008746	0.0000385	-0.0000925	0.7967294	0.2626191
21.	14.0300000	-0.4613030	0.8814709	0.0001900	0.0010006	0.0000354	-0.0000625	0.8011540	0.2361221
22.	14.0315000	-0.4526226	0.8870227	0.0002028	0.0010085	-0.0000251	-0.0000079	0.8046439	0.2091753
23.	14.0330000	-0.4440862	0.8924450	0.0002160	0.0011056	-0.0000631	0.0000456	0.8073291	0.1821328
24.	14.0345000	-0.4354736	0.8975294	0.0003110	0.0011274	-0.0001338	0.0000871	0.8089378	0.1549969
25.	14.0360000	-0.4267097	0.9029678	0.0003771	0.0008550	-0.0002017	0.0001386	0.8096871	0.1276610
26.	14.0375000	-0.4178047	0.9079912	0.0003807	0.0006544	-0.0001950	0.0001969	0.8093762	0.1002038
27.	14.0390000	-0.4088094	0.9128063	0.0004644	0.0005252	-0.0001726	0.0002046	0.8081718	0.0725983
28.	14.0405000	-0.3998573	0.9181163	0.0006226	0.0002379	-0.0001223	0.0002034	0.8057858	0.0447860
29.	14.0420000	-0.3907974	0.9227721	0.0005276	0.0001210	-0.0000470	0.0001639	0.8026666	0.0171383
30.	14.0435000	-0.3815511	0.9274621	0.0004806	0.0000685	-0.0000197	0.0001410	0.7981893	-0.0105410
31.	14.0450000	-0.3723904	0.9322239	0.0004735	0.0000951	-0.0000104	0.0001111	0.7929267	-0.0382405
32.	14.0465000	-0.3630279	0.9367693	0.0004258	0.0000707	-0.0000037	0.0001285	0.7865575	-0.0657767
33.	14.0480000	-0.3536366	0.9414084	0.0004498	0.0001856	-0.0000361	0.0001232	0.7791432	-0.0932165
34.	14.0495000	-0.3440503	0.9456286	0.0002950	0.0001884	-0.0000229	0.0001236	0.7707521	-0.1205078
35.	14.0510000	-0.3345435	0.9499090	0.0003474	0.0002694	-0.0000286	0.0001299	0.7614613	-0.1474629
36.	14.0525000	-0.3248164	0.9539021	0.0004552	0.0003102	-0.0000339	0.0001231	0.7509958	-0.1742598
37.	14.0540000	-0.3152308	0.9583129	0.0006864	0.0002222	-0.0000100	0.0001128	0.7394379	-0.2008170
38.	14.0555000	-0.3052756	0.9622087	0.0003685	0.0004199	-0.0000373	0.0001251	0.7267528	-0.2269290
39.	14.0570000	-0.2953781	0.9659046	0.0005719	0.0004069	0.0000103	0.0001501	0.7131320	-0.2526881

### Anexa 13. Tabel cu rezultatele măsurărilor pentru 1001 frecvențe în domeniul 14 – 15.5 GHz ale filtrului etalon

40.	14.0585000	-0.2854879	0.9697874	0.0005847	0.0003617	0.0000102	0.0001650	0.6986516	-0.2780157
41.	14.0600000	-0.2753650	0.9733511	0.0005465	0.0004698	-0.0000085	0.0002124	0.6827824	-0.3029633
42.	14.0615000	-0.2653298	0.9768221	0.0006078	0.0003870	0.0000084	0.0002352	0.6661206	-0.3274307
43.	14.0630000	-0.2551241	0.9804893	0.0008389	0.0002586	-0.0000150	0.0002948	0.6485549	-0.3510224
44.	14.0645000	-0.2448787	0.9837160	0.0006179	0.0002424	0.0000147	0.0003263	0.6298748	-0.3743567
45.	14.0660000	-0.2345168	0.9867278	0.0005529	0.0001953	0.0000471	0.0003752	0.6103535	-0.3969089
46.	14.0675000	-0.2240279	0.9898620	0.0005571	-0.0000684	0.0000514	0.0004087	0.5897549	-0.4188626
47.	14.0690000	-0.2135460	0.9928347	0.0007440	-0.0002825	0.0000449	0.0004116	0.5682980	-0.4401349
48.	14.0705000	-0.2029833	0.9956308	0.0006965	-0.0004929	0.0001138	0.0003797	0.5460052	-0.4606881
49.	14.0720000	-0.1923005	0.9983345	0.0004679	-0.0005269	0.0001132	0.0003370	0.5227428	-0.4802116
50.	14.0735000	-0.1816850	1.0009580	0.0004171	-0.0004985	0.0001053	0.0003491	0.4988426	-0.4988812
51.	14.0750000	-0.1708353	1.0033220	0.0003288	-0.0005668	0.0001042	0.0003600	0.4738665	-0.5168515
52.	14.0765000	-0.1601041	1.0057270	0.0002569	-0.0006258	0.0000827	0.0003585	0.4481597	-0.5338008
53.	14.0780000	-0.1490745	1.0077070	0.0001335	-0.0008279	0.0000859	0.0003275	0.4217564	-0.5497687
54.	14.0795000	-0.1381637	1.0099130	0.0001115	-0.0009835	0.0000798	0.0003299	0.3947326	-0.5646636
55.	14.0810000	-0.1272448	1.0117880	-0.0000389	-0.0012024	0.0000927	0.0003269	0.3668662	-0.5788276
56.	14.0825000	-0.1161333	1.0136380	-0.0001665	-0.0011098	0.0000783	0.0002760	0.3385168	-0.5917026
57.	14.0840000	-0.1050664	1.0153220	-0.0001658	-0.0011019	0.0001037	0.0002392	0.3094275	-0.6033965
58.	14.0855000	-0.0938116	1.0167720	-0.0004130	-0.0011657	0.0000885	0.0002120	0.2797762	-0.6140212
59.	14.0870000	-0.0826331	1.0181370	-0.0004127	-0.0010661	0.0000705	0.0002414	0.2497097	-0.6234790
60.	14.0885000	-0.0714160	1.0191390	-0.0004067	-0.0010157	0.0000490	0.0002649	0.2192002	-0.6317137
61.	14.0900000	-0.0601642	1.0205050	-0.0005271	-0.0012173	0.0000716	0.0002436	0.1881517	-0.6388367
62.	14.0915000	-0.0488389	1.0214240	-0.0005454	-0.0013247	0.0000688	0.0002636	0.1566087	-0.6445367
63.	14.0930000	-0.0373372	1.0223730	-0.0006648	-0.0014613	0.0000741	0.0002278	0.1249278	-0.6490611
64.	14.0945000	-0.0259110	1.0230420	-0.0007979	-0.0015020	0.0000437	0.0002582	0.0930991	-0.6523367
65.	14.0960000	-0.0143430	1.0235290	-0.0008753	-0.0016346	0.0000145	0.0002007	0.0608669	-0.6540588
66.	14.0975000	-0.0027380	1.0238420	-0.0011652	-0.0016544	0.0000033	0.0002101	0.0287193	-0.6546507
67.	14.0990000	0.0089481	1.0241160	-0.0010789	-0.0015531	-0.0000612	0.0001514	-0.0035899	-0.6538922
68.	14.1005000	0.0209447	1.0237990	-0.0011135	-0.0014240	-0.0000533	0.0001515	-0.0360208	-0.6513332
69.	14.1020000	0.0325690	1.0238640	-0.0010509	-0.0013632	-0.0000805	0.0001347	-0.0682015	-0.6477260
70.	14.1035000	0.0443441	1.0236500	-0.0010101	-0.0013723	-0.0001069	0.0001772	-0.1001759	-0.6429314
71.	14.1050000	0.0562280	1.0231970	-0.0009444	-0.0013395	-0.0000900	0.0002064	-0.1321206	-0.6367881
72.	14.1065000	0.0681004	1.0224200	-0.0009742	-0.0013769	-0.0001038	0.0001897	-0.1638152	-0.6291860
73.	14.1080000	0.0799934	1.0217760	-0.0009830	-0.0013576	-0.0000685	0.0001996	-0.1950222	-0.6203356
74.	14.1095000	0.0919648	1.0209160	-0.0009213	-0.0012080	-0.0000988	0.0002264	-0.2260077	-0.6100472
75.	14.1110000	0.1040858	1.0197810	-0.0010909	-0.0012077	-0.0001022	0.0002845	-0.2566063	-0.5986705
76.	14.1125000	0.1161312	1.0187000	-0.0011392	-0.0012596	-0.0000776	0.0003170	-0.2865584	-0.5858747
77.	14.1140000	0.1283554	1.0170980	-0.0012333	-0.0015785	-0.0000889	0.0003352	-0.3160685	-0.5717295
78.	14.1155000	0.1404429	1.0156820	-0.0013140	-0.0015990	-0.0001347	0.0003267	-0.3449948	-0.5564660
79.	14.1170000	0.1526171	1.0138340	-0.0014117	-0.0015862	-0.0001631	0.0003407	-0.3733849	-0.5399079
80.	14.1185000	0.1646424	1.0119620	-0.0013976	-0.0015034	-0.0001660	0.0003428	-0.4007697	-0.5223570
81.	14.1200000	0.1767827	1.0098970	-0.0015389	-0.0014463	-0.0001805	0.0003986	-0.4276944	-0.5034088
82.	14.1215000	0.1890380	1.0076230	-0.0015968	-0.0015414	-0.0001167	0.0004094	-0.4535773	-0.4835141
83.	14.1230000	0.2011813	1.0052220	-0.0015866	-0.0014567	-0.0001165	0.0004464	-0.4784277	-0.4625460

84.	14.1245000	0.2135065	1.0026190	-0.0014069	-0.0013064	-0.0001575	0.0004781	-0.5025653	-0.4406294
85.	14.1260000	0.2258290	0.9997160	-0.0013396	-0.0011317	-0.0001776	0.0004932	-0.5256041	-0.4176416
86.	14.1275000	0.2380482	0.9967355	-0.0011887	-0.0008082	-0.0001923	0.0005514	-0.5476086	-0.3937559
87.	14.1290000	0.2503632	0.9933449	-0.0009868	-0.0005602	-0.0002093	0.0006048	-0.5685624	-0.3691910
88.	14.1305000	0.2626006	0.9901696	-0.0008041	-0.0005625	-0.0001365	0.0006430	-0.5885562	-0.3435890
89.	14.1320000	0.2748799	0.9864239	-0.0007444	-0.0006458	-0.0000356	0.0006646	-0.6074706	-0.3171960
90.	14.1335000	0.2873045	0.9826173	-0.0006187	-0.0006745	-0.0000221	0.0006360	-0.6252454	-0.2902749
91.	14.1350000	0.2997029	0.9787249	-0.0005761	-0.0006569	0.0000376	0.0006737	-0.6417730	-0.2625047
92.	14.1365000	0.3119303	0.9745795	-0.0005087	-0.0005356	0.0000679	0.0006696	-0.6569970	-0.2341931
93.	14.1380000	0.3242996	0.9702018	-0.0003398	-0.0006177	0.0000982	0.0006698	-0.6712415	-0.2052272
94.	14.1395000	0.3366779	0.9656020	-0.0002859	-0.0006606	0.0001916	0.0006829	-0.6840799	-0.1757468
95.	14.1410000	0.3491069	0.9607117	-0.0002316	-0.0006259	0.0002379	0.0006800	-0.6958405	-0.1457219
96.	14.1425000	0.3614044	0.9557896	-0.0002539	-0.0004802	0.0002414	0.0006795	-0.7062762	-0.1154795
97.	14.1440000	0.3737571	0.9504557	-0.0002334	-0.0004480	0.0003476	0.0006717	-0.7154375	-0.0849412
98.	14.1455000	0.3859881	0.9452150	-0.0002773	-0.0004853	0.0004261	0.0006531	-0.7232307	-0.0538912
99.	14.1470000	0.3983318	0.9395751	-0.0004286	-0.0006831	0.0004799	0.0006188	-0.7298941	-0.0228207
100.	14.1485000	0.4106280	0.9336833	-0.0006031	-0.0008969	0.0005786	0.0006000	-0.7352930	0.0085560
101.	14.1500000	0.4227960	0.9276055	-0.0008380	-0.0011096	0.0006358	0.0005501	-0.7392761	0.0398521
102.	14.1515000	0.4350819	0.9210803	-0.0010261	-0.0014148	0.0006665	0.0005232	-0.7420949	0.0712088
103.	14.1530000	0.4473390	0.9145527	-0.0012019	-0.0015158	0.0006674	0.0005793	-0.7435684	0.1026864
104.	14.1545000	0.4595234	0.9076424	-0.0013499	-0.0014705	0.0006685	0.0005851	-0.7436261	0.1341254
105.	14.1560000	0.4716715	0.9004392	-0.0013570	-0.0013489	0.0007275	0.0006436	-0.7424985	0.1654101
106.	14.1575000	0.4836130	0.8934255	-0.0013356	-0.0010392	0.0007546	0.0006196	-0.7401171	0.1963803
107.	14.1590000	0.4957402	0.8857140	-0.0011843	-0.0007924	0.0008323	0.0006475	-0.7367553	0.2272974
108.	14.1605000	0.5079541	0.8779116	-0.0010816	-0.0009748	0.0009361	0.0006067	-0.7317351	0.2579091
109.	14.1620000	0.5198386	0.8699396	-0.0012858	-0.0011370	0.0010105	0.0005131	-0.7257050	0.2882341
110.	14.1635000	0.5317519	0.8616650	-0.0014693	-0.0013270	0.0010550	0.0004275	-0.7184873	0.3181077
111.	14.1650000	0.5435345	0.8531278	-0.0016798	-0.0013834	0.0011182	0.0004211	-0.7101737	0.3476388
112.	14.1665000	0.5551938	0.8443789	-0.0018468	-0.0013470	0.0011432	0.0003929	-0.7008054	0.3767473
113.	14.1680000	0.5668951	0.8354192	-0.0020828	-0.0014084	0.0012156	0.0003533	-0.6901734	0.4053159
114.	14.1695000	0.5784795	0.8261586	-0.0023203	-0.0014017	0.0012828	0.0003076	-0.6785151	0.4337265
115.	14.1710000	0.5900897	0.8165295	-0.0026276	-0.0015491	0.0013182	0.0002232	-0.6657565	0.4613338
116.	14.1725000	0.6015914	0.8068007	-0.0030174	-0.0016643	0.0013483	0.0001941	-0.6520376	0.4884169
117.	14.1740000	0.6129726	0.7966857	-0.0035521	-0.0018091	0.0014291	0.0001703	-0.6373209	0.5150160
118.	14.1755000	0.6242931	0.7864569	-0.0041597	-0.0019155	0.0014630	0.0001430	-0.6215399	0.5407586
119.	14.1770000	0.6355217	0.7756974	-0.0044133	-0.0019979	0.0015031	0.0001718	-0.6048801	0.5656512
120.	14.1785000	0.6466176	0.7648482	-0.0046418	-0.0019930	0.0016178	0.0001979	-0.5873275	0.5900735
121.	14.1800000	0.6575509	0.7536566	-0.0047861	-0.0016402	0.0016782	0.0002421	-0.5688757	0.6135851
122.	14.1815000	0.6683658	0.7422101	-0.0047572	-0.0011797	0.0018596	0.0002292	-0.5495256	0.6364084
123.	14.1830000	0.6790616	0.7303818	-0.0046891	-0.0008454	0.0019833	0.0001778	-0.5294368	0.6582169
124.	14.1845000	0.6895782	0.7183833	-0.0047998	-0.0007777	0.0020470	0.0000711	-0.5085367	0.6795294
125.	14.1860000	0.6999428	0.7062036	-0.0049531	-0.0007779	0.0021877	-0.0000038	-0.4870201	0.6995687
126.	14.1875000	0.7102920	0.6937104	-0.0051232	-0.0006591	0.0022783	-0.0000908	-0.4645827	0.7192013
127.	14.1890000	0.7203477	0.6808135	-0.0055082	-0.0006865	0.0023526	-0.0001638	-0.4415598	0.7376930

128.	14.1905000	0.7303129	0.6675882	-0.0058952	-0.0006669	0.0024574	-0.0002188	-0.4178086	0.7549458
129.	14.1920000	0.7401459	0.6541961	-0.0063237	-0.0007752	0.0025856	-0.0002777	-0.3935286	0.7718105
130.	14.1935000	0.7498513	0.6404710	-0.0067167	-0.0007330	0.0026962	-0.0003468	-0.3687173	0.7873836
131.	14.1950000	0.7592078	0.6263050	-0.0072138	-0.0003671	0.0028311	-0.0004425	-0.3431883	0.8019252
132.	14.1965000	0.7076775	0.6852565	-0.0044200	0.0080513	0.0026753	0.0014511	-0.4366592	0.7624623
133.	14.1980000	0.7774479	0.5972912	-0.0079357	0.0003216	0.0030379	-0.0007593	-0.2910368	0.8283781
134.	14.1995000	0.7863300	0.5823169	-0.0083911	0.0005511	0.0031315	-0.0008811	-0.2643705	0.8398637
135.	14.2010000	0.7947084	0.5671428	-0.0090754	0.0007609	0.0032120	-0.0010179	-0.2370293	0.8501962
136.	14.2025000	0.8030407	0.5514608	-0.0097050	0.0011419	0.0033376	-0.0011310	-0.2094095	0.8597198
137.	14.2040000	0.8112038	0.5355670	-0.0102414	0.0014060	0.0034712	-0.0012312	-0.1817276	0.8682536
138.	14.2055000	0.8190458	0.5194033	-0.0109804	0.0020395	0.0036085	-0.0014096	-0.1534838	0.8757297
139.	14.2070000	0.8267130	0.5027179	-0.0116695	0.0025546	0.0037494	-0.0015767	-0.1251588	0.8822071
140.	14.2085000	0.8341348	0.4858979	-0.0123556	0.0031516	0.0038673	-0.0017435	-0.0964947	0.8873790
141.	14.2100000	0.8411662	0.4687101	-0.0129796	0.0038064	0.0040188	-0.0019454	-0.0677608	0.8918189
142.	14.2115000	0.8478649	0.4511786	-0.0136721	0.0046005	0.0041773	-0.0021932	-0.0388870	0.8949901
143.	14.2130000	0.8543222	0.4333114	-0.0144072	0.0052837	0.0043093	-0.0024470	-0.0096209	0.8972088
144.	14.2145000	0.8603745	0.4151255	-0.0152236	0.0061678	0.0044190	-0.0027445	0.0195599	0.8981139
145.	14.2160000	0.8661156	0.3964761	-0.0159707	0.0071341	0.0045247	-0.0030780	0.0488441	0.8981995
146.	14.2175000	0.8714242	0.3775562	-0.0168562	0.0081489	0.0046313	-0.0033579	0.0780197	0.8973232
147.	14.2190000	0.8764289	0.3583379	-0.0178161	0.0092546	0.0047502	-0.0037512	0.1073372	0.8949612
148.	14.2205000	0.8809520	0.3388614	-0.0188247	0.0105776	0.0048941	-0.0041381	0.1366515	0.8914143
149.	14.2220000	0.8852135	0.3190559	-0.0196323	0.0118417	0.0049878	-0.0045276	0.1657471	0.8869219
150.	14.2235000	0.8889209	0.2987222	-0.0207017	0.0133284	0.0050958	-0.0049507	0.1949430	0.8811532
151.	14.2250000	0.8922709	0.2783277	-0.0215560	0.0148768	0.0052324	-0.0054261	0.2238215	0.8741953
152.	14.2265000	0.8952157	0.2575299	-0.0225233	0.0167090	0.0053660	-0.0059407	0.2525136	0.8663674
153.	14.2280000	0.8975720	0.2363213	-0.0234767	0.0187272	0.0054957	-0.0064949	0.2810918	0.8571906
154.	14.2295000	0.8994107	0.2148352	-0.0244280	0.0209259	0.0055974	-0.0070894	0.3093811	0.8471675
155.	14.2310000	0.9008357	0.1930048	-0.0253061	0.0231986	0.0057232	-0.0077439	0.3374808	0.8356611
156.	14.2325000	0.9015326	0.1708880	-0.0261749	0.0257681	0.0058109	-0.0084250	0.3651189	0.8230661
157.	14.2340000	0.9018638	0.1483898	-0.0267467	0.0286741	0.0058536	-0.0091319	0.3923570	0.8092955
158.	14.2355000	0.9015561	0.1257456	-0.0273776	0.0316603	0.0058986	-0.0099306	0.4191457	0.7945895
159.	14.2370000	0.9006224	0.1025670	-0.0278743	0.0349089	0.0059208	-0.0108036	0.4457927	0.7783120
160.	14.2385000	0.8989756	0.0792068	-0.0283191	0.0384672	0.0059365	-0.0117008	0.4716284	0.7611321
161.	14.2400000	0.8966674	0.0554895	-0.0285721	0.0423238	-0.0048237	0.0053580	0.4970480	0.7425546
162.	14.2415000	0.8937003	0.0315628	-0.0286335	0.0465075	-0.0049190	0.0058791	0.5220090	0.7228124
163.	14.2430000	0.8900367	0.0073356	-0.0285652	0.0508214	-0.0050004	0.0064818	0.5460669	0.7021526
164.	14.2445000	0.8854725	-0.0171370	-0.0280906	0.0555965	-0.0050792	0.0071106	0.5696363	0.6800709
165.	14.2460000	0.8801093	-0.0420446	0.0014381	0.0104937	-0.0051702	0.0078083	0.5923468	0.6568918
166.	14.2475000	0.8739935	-0.0671664	0.0019747	0.0111122	-0.0052313	0.0085109	0.6143683	0.6324664
167.	14.2490000	0.8669855	-0.0924351	0.0026526	0.0117239	-0.0052173	0.0093090	0.6354014	0.6068704
168.	14.2505000	0.8591239	-0.1179573	0.0034297	0.0124312	-0.0052215	0.0101594	0.6555915	0.5801259
169.	14.2520000	0.8501538	-0.1436724	0.0042738	0.0131363	-0.0051104	0.0111277	0.6748114	0.5519813
170.	14.2535000	0.8403435	-0.1694046	0.0053129	0.0138414	-0.0049883	0.0120902	0.6929821	0.5227813
171.	14.2550000	0.8294087	-0.1953377	0.0063943	0.0146556	-0.0048295	0.0131609	0.7100430	0.4922825

172.	14.2565000	0.8173765	-0.2213736	0.0075898	0.0152807	-0.0045865	0.0143102	0.7259624	0.4609281
173.	14.2580000	0.8042357	-0.2476962	0.0089806	0.0160065	-0.0043303	0.0155533	0.7404320	0.4280648
174.	14.2595000	0.7899594	-0.2738143	0.0104100	0.0166635	-0.0039776	0.0169059	0.7534124	0.3942149
175.	14.2610000	0.7744123	-0.3000669	0.0121935	0.0172872	-0.0034413	0.0184152	0.7651215	0.3590178
176.	14.2625000	0.7576242	-0.3263189	0.0139294	0.0178696	-0.0028306	0.0199153	0.7751222	0.3227794
177.	14.2640000	0.7393059	-0.3522989	0.0159225	0.0184258	-0.0020355	0.0215764	0.7834800	0.2855856
178.	14.2655000	0.7195796	-0.3783737	0.0181711	0.0188512	-0.0011630	0.0232884	0.7901003	0.2471307
179.	14.2670000	0.6984897	-0.4040792	0.0205185	0.0191475	-0.0000687	0.0251188	0.7945979	0.2076548
180.	14.2685000	0.6757559	-0.4297399	0.0231753	0.0194896	0.0011989	0.0270814	0.7971136	0.1671944
181.	14.2700000	0.6515801	-0.4548329	0.0260909	0.0195122	0.0028056	0.0291850	0.7975003	0.1257353
182.	14.2715000	0.6256810	-0.4794935	0.0291896	0.0193375	0.0046066	0.0314045	0.7954733	0.0836460
183.	14.2730000	0.5979208	-0.5036476	0.0326596	0.0188944	0.0067808	0.0336406	0.7908624	0.0404993
184.	14.2745000	0.5683700	-0.5271614	0.0363689	0.0183141	0.0092780	0.0360479	0.7836246	-0.0031037
185.	14.2760000	0.5369460	-0.5498941	0.0404159	0.0174505	0.0121672	0.0384973	0.7734707	-0.0473192
186.	14.2775000	0.5036967	-0.5717679	0.0445410	0.0162077	0.0154918	0.0409229	0.7601616	-0.0919124
187.	14.2790000	0.4682746	-0.5925235	0.0490691	0.0144866	0.0193089	0.0434386	0.7436554	-0.1368794
188.	14.2805000	0.4308801	-0.6118625	0.0539560	0.0123429	0.0237693	0.0459965	0.7237241	-0.1818128
189.	14.2820000	0.3913832	-0.6300113	0.0591254	0.0095800	0.0288225	0.0483884	0.7000937	-0.2264294
190.	14.2835000	0.3495737	-0.6461786	0.0645164	0.0061506	0.0346616	0.0506218	0.6725798	-0.2705537
191.	14.2850000	0.3057447	-0.6606467	0.0700907	0.0020285	0.0413003	0.0526971	0.6410715	-0.3139308
192.	14.2865000	0.2594725	-0.6729420	0.0759130	-0.0029251	0.0488682	0.0544195	0.6050808	-0.3559930
193.	14.2880000	0.2111629	-0.6827114	0.0818590	-0.0089535	0.0571887	0.0554767	0.5646835	-0.3966540
194.	14.2895000	0.1605913	-0.6896510	0.0879118	-0.0160565	0.0667482	0.0559900	0.5195186	-0.4350092
195.	14.2910000	0.1079894	-0.6933815	0.0938677	-0.0242450	0.0773799	0.0556217	0.4697230	-0.4704688
196.	14.2925000	0.0534105	-0.6934939	0.0996609	-0.0338495	0.0889657	0.0541970	0.4152818	-0.5025492
197.	14.2940000	-0.0031053	-0.6895064	0.1051298	-0.0448617	0.1018136	0.0512869	0.3558713	-0.5303345
198.	14.2955000	-0.0610830	-0.6811897	0.1100638	-0.0576119	0.1156747	0.0466841	0.2920716	-0.5531755
199.	14.2970000	-0.1205210	-0.6678876	0.1141381	-0.0721887	0.1304587	0.0400296	0.2238608	-0.5700873
200.	14.2985000	-0.1805925	-0.6491905	0.1172349	-0.0885531	0.1460273	0.0308947	0.1517829	-0.5800083
201.	14.3000000	-0.2410859	-0.6246107	0.1186917	-0.1070549	0.1621241	0.0189579	0.0762240	-0.5820677
202.	14.3015000	-0.3014365	-0.5941538	0.1183630	-0.1274422	0.1781214	0.0036478	-0.0011485	-0.5755345
203.	14.3030000	-0.3605159	-0.5563761	0.1155585	-0.1497815	0.1938041	-0.0154241	-0.0798870	-0.5591896
204.	14.3045000	-0.4177308	-0.5115787	0.1095750	-0.1741202	0.2082607	-0.0384750	-0.1585275	-0.5324820
205.	14.3060000	-0.4716117	-0.4593304	0.1000916	-0.1997825	0.2208548	-0.0657458	-0.2347186	-0.4950147
206.	14.3075000	-0.5213296	-0.3996521	0.0862364	-0.2267881	0.2304887	-0.0973528	-0.3076061	-0.4459313
207.	14.3090000	-0.5651901	-0.3331545	0.0674129	-0.2543175	0.2357679	-0.1328307	-0.3743642	-0.3862064
208.	14.3105000	-0.6020711	-0.2595521	0.0426560	-0.2816177	0.2363244	-0.1721845	-0.4326382	-0.3162583
209.	14.3120000	-0.6302035	-0.1804411	0.0120036	-0.3074457	0.2301665	-0.2142938	-0.4805672	-0.2374437
210.	14.3135000	-0.6484579	-0.0966721	-0.0250207	-0.3306503	0.2168628	-0.2580230	-0.5162524	-0.1517117
211.	14.3150000	-0.6556233	-0.0098844	-0.0687654	-0.3500230	0.1955289	-0.3022970	-0.5382217	-0.0610291
212.	14.3165000	-0.6509820	0.0776018	-0.1183993	-0.3633405	0.1657559	-0.3449360	-0.5459546	0.0314230
213.	14.3180000	-0.6340272	0.1639350	-0.1734306	-0.3692715	0.1274120	-0.3847329	-0.5387761	0.1232650
214.	14.3195000	-0.6049252	0.2463759	-0.2324843	-0.3664059	0.0812326	-0.4192854	-0.5175024	0.2110478
215.	14.3210000	-0.5647731	0.3232186	-0.2940588	-0.3532854	0.0276880	-0.4472968	-0.4829849	0.2925871

216.	14.3225000	-0.5148160	0.3918704	-0.3557689	-0.3293973	-0.0314247	-0.4673393	-0.4373050	0.3655551
217.	14.3240000	-0.4571443	0.4509453	-0.4151435	-0.2942756	-0.0947109	-0.4782318	-0.3829398	0.4280633
218.	14.3255000	-0.3935474	0.4993149	-0.4704520	-0.2480242	-0.1605818	-0.4793691	-0.3216854	0.4797590
219.	14.3270000	-0.3268756	0.5366319	-0.5188680	-0.1920260	-0.2268157	-0.4704494	-0.2565128	0.5198182
220.	14.3285000	-0.2588408	0.5628942	-0.5588765	-0.1271070	-0.2922266	-0.4515571	-0.1890775	0.5481088
221.	14.3300000	-0.1919518	0.5790981	-0.5887777	-0.0557425	-0.3545636	-0.4232721	-0.1216499	0.5657123
222.	14.3315000	-0.1275759	0.5859838	-0.6074745	0.0207648	-0.4129614	-0.3862460	-0.0559439	0.5732644
223.	14.3330000	-0.0670775	0.5851004	-0.6146144	0.0997503	-0.4660150	-0.3413334	0.0068744	0.5716628
224.	14.3345000	-0.0111488	0.5778161	-0.6100535	0.1790270	-0.5126515	-0.2898928	0.0651783	0.5623838
225.	14.3360000	0.0401259	0.5655782	-0.5940647	0.2570702	-0.5522429	-0.2327384	0.1192389	0.5463899
226.	14.3375000	0.0861077	0.5495338	-0.5672140	0.3317661	-0.5843729	-0.1713450	0.1677552	0.5253126
227.	14.3390000	0.1276330	0.5306479	-0.5305147	0.4020763	-0.6088656	-0.1061936	0.2112563	0.4993337
228.	14.3405000	0.1646264	0.5098305	-0.4855514	0.4662451	-0.6251315	-0.0389384	0.2489127	0.4702563
229.	14.3420000	0.1974280	0.4879121	-0.4334168	0.5233768	-0.6335303	0.0294585	0.2813669	0.4385044
230.	14.3435000	0.2269603	0.4649510	-0.3748403	0.5732816	-0.6339924	0.0982892	0.3086363	0.4047705
231.	14.3450000	0.2532424	0.4413743	-0.3117142	0.6150048	-0.6269585	0.1663299	0.3307535	0.3703838
232.	14.3465000	0.2767109	0.4172873	-0.2447135	0.6485565	-0.6123815	0.2330394	0.3480506	0.3351987
233.	14.3480000	0.2976565	0.3932377	-0.1754556	0.6738622	-0.5909685	0.2973716	0.3607495	0.3001550
234.	14.3495000	0.3163512	0.3685400	-0.1044749	0.6913803	-0.5626240	0.3592229	0.3693065	0.2652340
235.	14.3510000	0.3329090	0.3436573	-0.0332742	0.7007421	-0.5284706	0.4172926	0.3739677	0.2311375
236.	14.3525000	0.3474370	0.3183985	0.0373324	0.7028845	-0.4887736	0.4716205	0.3748460	0.1982923
237.	14.3540000	0.3599203	0.2927695	0.1071335	0.6972671	-0.4434064	0.5215281	0.3724746	0.1666875
238.	14.3555000	0.3703151	0.2669132	0.1747543	0.6849410	-0.3937496	0.5664290	0.3670940	0.1367855
239.	14.3570000	0.3787182	0.2407574	0.2402131	0.6663803	-0.3396960	0.6061468	0.3589348	0.1085875
240.	14.3585000	0.3849168	0.2145470	0.3025254	0.6422009	-0.2824472	0.6405001	0.3483566	0.0823201
241.	14.3600000	0.3890977	0.1883760	0.3616541	0.6122419	-0.2219588	0.6690090	0.3356704	0.0579468
242.	14.3615000	0.3910694	0.1622822	0.4172603	0.5775073	-0.1591784	0.6917039	0.3210610	0.0359935
243.	14.3630000	0.3908340	0.1363644	0.4689597	0.5383942	-0.0947092	0.7079117	0.3049034	0.0161494
244.	14.3645000	0.3883652	0.1110376	0.5163262	0.4952097	-0.0288281	0.7181200	0.2873976	-0.0014478
245.	14.3660000	0.3836734	0.0863412	0.5595740	0.4485753	0.0376400	0.7219697	0.2687453	-0.0167872
246.	14.3675000	0.3769190	0.0624152	0.5982119	0.3987579	0.1040045	0.7196265	0.2492190	-0.0297611
247.	14.3690000	0.3682767	0.0397918	0.6323043	0.3465138	0.1696954	0.7113783	0.2292266	-0.0404157
248.	14.3705000	0.3575781	0.0182799	0.6618116	0.2915174	0.2345039	0.6968741	0.2087491	-0.0488164
249.	14.3720000	0.3450994	-0.0017407	0.6865135	0.2346307	0.2975456	0.6764901	0.1880813	-0.0550109
250.	14.3735000	0.3309868	-0.0200334	0.7063190	0.1761776	0.3583298	0.6504601	0.1675041	-0.0589883
251.	14.3750000	0.3154537	-0.0365333	0.7213326	0.1161419	0.4165539	0.6189451	0.1470194	-0.0609889
252.	14.3765000	0.2987401	-0.0510465	0.7315367	0.0553445	0.4714275	0.5825918	0.1270792	-0.0607614
253.	14.3780000	0.2810797	-0.0633683	0.7366170	-0.0060985	0.5229077	0.5412312	0.1076241	-0.0588666
254.	14.3795000	0.2626814	-0.0736454	0.7367436	-0.0674609	0.5701233	0.4958094	0.0890232	-0.0550710
255.	14.3810000	0.2436594	-0.0818447	0.7318426	-0.1291047	0.6133450	0.4461041	0.0712704	-0.0495577
256.	14.3825000	0.2246039	-0.0876464	0.7219287	-0.1901332	0.6516696	0.3930214	0.0545907	-0.0423978
257.	14.3840000	0.2056214	-0.0912083	0.7070007	-0.2501458	0.6851208	0.3369956	0.0389504	-0.0337972
258.	14.3855000	0.1869444	-0.0926305	0.6870816	-0.3091107	0.7136251	0.2780404	0.0244981	-0.0238041
259.	14.3870000	0.1688989	-0.0919622	0.6624311	-0.3659856	0.7369356	0.2172629	0.0115562	-0.0127137

260.	14.3885000	0.1516929	-0.0894166	0.6327834	-0.4213331	0.7545580	0.1545531	-0.0001025	-0.0004297
261.	14.3900000	0.1356004	-0.0849545	0.5985903	-0.4741654	0.7667657	0.0910562	-0.0101760	0.0127635
262.	14.3915000	0.1208827	-0.0788893	0.5601709	-0.5240931	0.7735291	0.0265624	-0.0186137	0.0266423
263.	14.3930000	0.1076144	-0.0713630	0.5176787	-0.5706943	0.7745035	-0.0378790	-0.0253205	0.0412767
264.	14.3945000	0.0961386	-0.0627372	0.4711531	-0.6134241	0.7701243	-0.1020532	-0.0303846	0.0561894
265.	14.3960000	0.0861919	-0.0531616	0.4210358	-0.6525385	0.7603549	-0.1655393	-0.0336987	0.0714879
266.	14.3975000	0.0782916	-0.0429533	0.3677068	-0.6869704	0.7453617	-0.2274208	-0.0350821	0.0867966
267.	14.3990000	0.0721106	-0.0322692	0.3114040	-0.7169655	0.7252136	-0.2880754	-0.0346542	0.1020101
268.	14.4005000	0.0678285	-0.0215025	0.2521759	-0.7421135	0.7010344	-0.3466257	-0.0326924	0.1170653
269.	14.4020000	0.0652719	-0.0109021	0.1916543	-0.7619787	0.6713070	-0.4023705	-0.0286746	0.1313738
270.	14.4035000	0.0647716	-0.0006707	0.1296134	-0.7766797	0.6372030	-0.4554003	-0.0230679	0.1451051
271.	14.4050000	0.0657537	0.0088054	0.0668552	-0.7861622	0.5991231	-0.5051491	-0.0157293	0.1577899
272.	14.4065000	0.0682749	0.0175914	0.0030212	-0.7901316	0.5571541	-0.5514733	-0.0069489	0.1694473
273.	14.4080000	0.0719583	0.0252163	-0.0601667	-0.7885912	0.5119223	-0.5939882	0.0032699	0.1797839
274.	14.4095000	0.0769901	0.0317258	-0.1231832	-0.7819560	0.4634910	-0.6326354	0.0148970	0.1887004
275.	14.4110000	0.0828934	0.0369671	-0.1850556	-0.7700005	0.4125026	-0.6672279	0.0276035	0.1960081
276.	14.4125000	0.0895789	0.0406155	-0.2454077	-0.7531201	0.3591809	-0.6971928	0.0411311	0.2014517
277.	14.4140000	0.0966445	0.0430429	-0.3039367	-0.7312098	0.3035853	-0.7229635	0.0556566	0.2049645
278.	14.4155000	0.1040802	0.0439123	-0.3599893	-0.7049448	0.2466787	-0.7439584	0.0703079	0.2064079
279.	14.4170000	0.1115849	0.0432834	-0.4135699	-0.6742520	0.1883983	-0.7604960	0.0853655	0.2057369
280.	14.4185000	0.1189708	0.0412657	-0.4641162	-0.6395068	0.1295774	-0.7723843	0.1003829	0.2029386
281.	14.4200000	0.1261132	0.0377747	-0.5115643	-0.6010681	0.0699406	-0.7794906	0.1151171	0.1980346
282.	14.4215000	0.1327467	0.0331168	-0.5553502	-0.5593209	0.0102793	-0.7819979	0.1292150	0.1909208
283.	14.4230000	0.1387689	0.0271578	-0.5953878	-0.5146163	-0.0488662	-0.7800815	0.1424294	0.1817838
284.	14.4245000	0.1440936	0.0201822	-0.6315431	-0.4672899	-0.1076585	-0.7735588	0.1545198	0.1705194
285.	14.4260000	0.1484047	0.0122770	-0.6636065	-0.4177614	-0.1652077	-0.7625185	0.1651447	0.1574581
286.	14.4275000	0.1519134	0.0033712	-0.6915765	-0.3660676	-0.2216797	-0.7473251	0.1741955	0.1426479
287.	14.4290000	0.1544883	-0.0061972	-0.7152315	-0.3130706	-0.2765065	-0.7280865	0.1812787	0.1263662
288.	14.4305000	0.1558042	-0.0163692	-0.7348531	-0.2585577	-0.3295546	-0.7046264	0.1861534	0.1086609
289.	14.4320000	0.1560809	-0.0269647	-0.7502586	-0.2034328	-0.3803569	-0.6777889	0.1887993	0.0900269
290.	14.4335000	0.1552963	-0.0379652	-0.7613052	-0.1477304	-0.4289481	-0.6470121	0.1888798	0.0706271
291.	14.4350000	0.1533712	-0.0490957	-0.7681226	-0.0916993	-0.4747669	-0.6130623	0.1864213	0.0508441
292.	14.4365000	0.1501160	-0.0603836	-0.7707899	-0.0358222	-0.5178125	-0.5758957	0.1812555	0.0309531
293.	14.4380000	0.1458881	-0.0716153	-0.7693427	0.0198347	-0.5577361	-0.5357150	0.1733689	0.0111803
294.	14.4395000	0.1405857	-0.0827914	-0.7640267	0.0747234	-0.5945006	-0.4927810	0.1627417	-0.0078360
295.	14.4410000	0.1342141	-0.0937559	-0.7548677	0.1288079	-0.6278099	-0.4475884	0.1492571	-0.0261278
296.	14.4425000	0.1267551	-0.1043585	-0.7420160	0.1815465	-0.6576029	-0.4000236	0.1333300	-0.0430989
297.	14.4440000	0.1181868	-0.1146323	-0.7254322	0.2328454	-0.6834822	-0.3509401	0.1149722	-0.0583586
298.	14.4455000	0.1087004	-0.1245363	-0.7054505	0.2825697	-0.7053936	-0.3002185	0.0942531	-0.0717117
299.	14.4470000	0.0983245	-0.1338802	-0.6822302	0.3304227	-0.7237178	-0.2481560	0.0714198	-0.0827387
300.	14.4485000	0.0870571	-0.1426782	-0.6559262	0.3762185	-0.7378879	-0.1950109	0.0469455	-0.0912452
301.	14.4500000	0.0748091	-0.1507304	-0.6265672	0.4198148	-0.7480490	-0.1416045	0.0209809	-0.0968543
302.	14.4515000	0.0618308	-0.1582090	-0.5945135	0.4612257	-0.7542721	-0.0875924	-0.0061862	-0.0996171
303.	14.4530000	0.0481332	-0.1647762	-0.5599273	0.4999000	-0.7564049	-0.0335758	-0.0339811	-0.0989609

304.	14.4545000	0.0337094	-0.1704537	-0.5232521	0.5355176	-0.7544497	0.0196684	-0.0621747	-0.0951162
305.	14.4560000	0.0186051	-0.1754398	-0.4842000	0.5687889	-0.7487280	0.0726926	-0.0902535	-0.0878152
306.	14.4575000	0.0029788	-0.1794824	-0.4434009	0.5989252	-0.7392213	0.1243226	-0.1177701	-0.0774953
307.	14.4590000	-0.0133005	-0.1825561	-0.4006739	0.6263845	-0.7259809	0.1752207	-0.1445505	-0.0637190
308.	14.4605000	-0.0299484	-0.1843275	-0.3567159	0.6502965	-0.7093003	0.2241459	-0.1698909	-0.0470134
309.	14.4620000	-0.0471026	-0.1853011	-0.3115964	0.6712993	-0.6893432	0.2714314	-0.1933873	-0.0273643
310.	14.4635000	-0.0645963	-0.1852327	-0.2651124	0.6892490	-0.6661381	0.3168551	-0.2151362	-0.0048710
311.	14.4650000	-0.0823032	-0.1837997	-0.2181213	0.7039878	-0.6401680	0.3597221	-0.2344092	0.0200937
312.	14.4665000	-0.1002754	-0.1812976	-0.1702980	0.7153555	-0.6114233	0.4005996	-0.2510403	0.0472859
313.	14.4680000	-0.1182823	-0.1775137	-0.1223344	0.7234833	-0.5804471	0.4385589	-0.2648104	0.0761791
314.	14.4695000	-0.1363742	-0.1724877	-0.0740650	0.7285219	-0.5471524	0.4742447	-0.2755132	0.1068777
315.	14.4710000	-0.1542617	-0.1662412	-0.0260828	0.7304964	-0.5119315	0.5069575	-0.2829675	0.1385400
316.	14.4725000	-0.1720864	-0.1584611	0.0219411	0.7290761	-0.4751383	0.5369006	-0.2871897	0.1710022
317.	14.4740000	-0.1895059	-0.1494924	0.0693542	0.7250207	-0.4367901	0.5640153	-0.2879608	0.2037995
318.	14.4755000	-0.2066417	-0.1392399	0.1161559	0.7177708	-0.3976028	0.5882402	-0.2853347	0.2364990
319.	14.4770000	-0.2232436	-0.1276964	0.1622668	0.7077465	-0.3570656	0.6095729	-0.2794157	0.2690161
320.	14.4785000	-0.2391451	-0.1149799	0.2072406	0.6947563	-0.3159400	0.6281334	-0.2704318	0.3007078
321.	14.4800000	-0.2544756	-0.1009753	0.2512185	0.6790274	-0.2743890	0.6439466	-0.2583448	0.3312333
322.	14.4815000	-0.2689299	-0.0856571	0.2940254	0.6606599	-0.2324069	0.6568754	-0.2433369	0.3602638
323.	14.4830000	-0.2823507	-0.0692322	0.3351082	0.6398156	-0.1902846	0.6673088	-0.2256096	0.3878748
324.	14.4845000	-0.2948495	-0.0517533	0.3749648	0.6165446	-0.1479092	0.6752185	-0.2053549	0.4135070
325.	14.4860000	-0.3061402	-0.0332943	0.4129298	0.5910643	-0.1058042	0.6804320	-0.1829759	0.4368033
326.	14.4875000	-0.3161554	-0.0138548	0.4494908	0.5632390	-0.0639025	0.6833926	-0.1584867	0.4579956
327.	14.4890000	-0.3248389	0.0063704	0.4839180	0.5336992	-0.0223802	0.6839245	-0.1321455	0.4766489
328.	14.4905000	-0.3321716	0.0274487	0.5163891	0.5020571	0.0187964	0.6822528	-0.1044208	0.4927279
329.	14.4920000	-0.3378734	0.0490724	0.5467176	0.4686596	0.0594404	0.6785293	-0.0755413	0.5060623
330.	14.4935000	-0.3421593	0.0711669	0.5750187	0.4334933	0.0993719	0.6723006	-0.0457789	0.5163234
331.	14.4950000	-0.3447506	0.0936546	0.6012396	0.3967059	0.1386680	0.6643859	-0.0152353	0.5242037
332.	14.4965000	-0.3557967	0.0831402	0.5624071	0.4506963	0.1142986	0.6692222	-0.0630947	0.5284982
333.	14.4980000	-0.3448553	0.1391394	0.6466895	0.3190840	0.2152796	0.6425678	0.0468919	0.5308200
334.	14.4995000	-0.3423144	0.1618113	0.6660303	0.2785593	0.2522936	0.6289843	0.0774957	0.5301003
335.	14.5010000	-0.3381329	0.1843549	0.6825165	0.2363616	0.2886504	0.6134148	0.1079832	0.5264050
336.	14.5025000	-0.3319925	0.2065319	0.6968629	0.1937519	0.3240296	0.5962282	0.1377255	0.5201842
337.	14.5040000	-0.3244888	0.2279983	0.7086561	0.1503783	0.3586535	0.5772167	0.1666129	0.5112805
338.	14.5055000	-0.3151636	0.2487669	0.7179258	0.1061591	0.3922202	0.5565033	0.1943521	0.4998199
339.	14.5070000	-0.3042987	0.2688195	0.7244312	0.0614506	0.4249430	0.5340849	0.2206414	0.4859259
340.	14.5085000	-0.2919387	0.2879019	0.7282760	0.0162714	0.4567156	0.5099599	0.2454294	0.4698875
341.	14.5100000	-0.2780022	0.3057307	0.7294945	-0.0291529	0.4872476	0.4841458	0.2685029	0.4516108
342.	14.5115000	-0.2629409	0.3222295	0.7280234	-0.0746807	0.5164961	0.4569037	0.2895292	0.4315926
343.	14.5130000	-0.2465826	0.3374517	0.7237880	-0.1202055	0.5448974	0.4276051	0.3084758	0.4096871
344.	14.5145000	-0.2291493	0.3510433	0.7167789	-0.1655998	0.5717695	0.3967732	0.3250883	0.3864718
345.	14.5160000	-0.2108591	0.3632199	0.7071016	-0.2107566	0.5971693	0.3642195	0.3393902	0.3619687
346.	14.5175000	-0.1918692	0.3735033	0.6947199	-0.2553091	0.6211089	0.3300292	0.3510550	0.3363029
347.	14.5190000	-0.1723013	0.3820375	0.6793169	-0.2994954	0.6435906	0.2941362	0.3601097	0.3100498

348.	14.5205000	-0.1523407	0.3889256	0.6612845	-0.3427244	0.6642402	0.2565308	0.3665200	0.2831757
349.	14.5220000	-0.1322474	0.3938965	0.6405471	-0.3849076	0.6829315	0.2173737	0.3702188	0.2562003
350.	14.5235000	-0.1119707	0.3969575	0.6168438	-0.4262983	0.6996019	0.1765333	0.3711821	0.2291172
351.	14.5250000	-0.0920712	0.3982807	0.5906034	-0.4661143	0.7140210	0.1343127	0.3693757	0.2025192
352.	14.5265000	-0.0723653	0.3978601	0.5616023	-0.5047067	0.7262510	0.0903144	0.3649920	0.1764376
353.	14.5280000	-0.0533844	0.3956749	0.5303235	-0.5414422	0.7356902	0.0453024	0.3579854	0.1514127
354.	14.5295000	-0.0350303	0.3917044	0.4963039	-0.5763027	0.7424347	-0.0011135	0.3483310	0.1274685
355.	14.5310000	-0.0176391	0.3862353	0.4598178	-0.6091124	0.7462222	-0.0484141	0.3364356	0.1051203
356.	14.5325000	-0.0014049	0.3794746	0.4239613	-0.6380573	0.7465976	-0.0996266	0.3224149	0.0847017
357.	14.5340000	0.0136022	0.3714298	0.3803646	-0.6678273	0.7445424	-0.1454476	0.3064086	0.0661884
358.	14.5355000	0.0272568	0.3623892	0.3405532	-0.6921126	0.7377214	-0.1977022	0.2888262	0.0499456
359.	14.5370000	0.0395910	0.3523450	0.2957877	-0.7151133	0.7281668	-0.2469773	0.2697577	0.0362106
360.	14.5385000	0.0503403	0.3415909	0.2494005	-0.7350352	0.7149677	-0.2959961	0.2496915	0.0248316
361.	14.5400000	0.0595519	0.3304861	0.2016450	-0.7521561	0.6980543	-0.3447169	0.2290202	0.0162694
362.	14.5415000	0.0672477	0.3190099	0.1526728	-0.7658665	0.6774662	-0.3923825	0.2080701	0.0104899
363.	14.5430000	0.0733407	0.3075159	0.1024633	-0.7762493	0.6533939	-0.4390244	0.1872202	0.0073501
364.	14.5445000	0.0779023	0.2961516	0.0515899	-0.7833951	0.6256958	-0.4841915	0.1667512	0.0067784
365.	14.5460000	0.0810098	0.2850757	0.0001765	-0.7868703	0.5944598	-0.5273751	0.1471189	0.0087303
366.	14.5475000	0.0827243	0.2745200	-0.0517810	-0.7869321	0.5598135	-0.5685605	0.1285180	0.0129653
367.	14.5490000	0.0832856	0.2646276	-0.1035591	-0.7833621	0.5221989	-0.6073169	0.1113098	0.0193684
368.	14.5505000	0.0827979	0.2554580	-0.1552757	-0.7761691	0.4814739	-0.6431770	0.0954841	0.0276767
369.	14.5520000	0.0813775	0.2474469	-0.2062498	-0.7657124	0.4383058	-0.6761003	0.0817419	0.0375398
370.	14.5535000	0.0791758	0.2403327	-0.2565772	-0.7515543	0.3927217	-0.7058699	0.0699530	0.0486759
371.	14.5550000	0.0765432	0.2342372	-0.3059564	-0.7340207	0.3448976	-0.7319875	0.0603147	0.0607738
372.	14.5565000	0.0734856	0.2293755	-0.3538949	-0.7131333	0.2953378	-0.7548329	0.0528617	0.0732613
373.	14.5580000	0.0703503	0.2256756	-0.4003123	-0.6889170	0.2442155	-0.7738553	0.0476186	0.0859898
374.	14.5595000	0.0673281	0.2229769	-0.4449600	-0.6615878	0.1922556	-0.7892559	0.0443815	0.0987381
375.	14.5610000	0.0643993	0.2213507	-0.4878496	-0.6311571	0.1390480	-0.8006829	0.0431514	0.1109193
376.	14.5625000	0.0620731	0.2207700	-0.5283355	-0.5981554	0.0854763	-0.8083616	0.0438003	0.1224304
377.	14.5640000	0.0602775	0.2210093	-0.5662913	-0.5626811	0.0319608	-0.8124474	0.0462332	0.1329609
378.	14.5655000	0.0591481	0.2219498	-0.6020679	-0.5243607	-0.0219003	-0.8128221	0.0500456	0.1425064
379.	14.5670000	0.0588538	0.2234536	-0.6348913	-0.4842502	-0.0751424	-0.8092980	0.0550099	0.1505091
380.	14.5685000	0.0595108	0.2253760	-0.6650708	-0.4417634	-0.1278786	-0.8025255	0.0609058	0.1571989
381.	14.5700000	0.0612435	0.2275652	-0.6922227	-0.3976052	-0.1798382	-0.7923778	0.0677345	0.1621928
382.	14.5715000	0.0638812	0.2297329	-0.7163270	-0.3519598	-0.2308352	-0.7786437	0.0747051	0.1657610
383.	14.5730000	0.0675898	0.2316183	-0.7375917	-0.3045560	-0.2805318	-0.7616951	0.0819628	0.1676678
384.	14.5745000	0.0722438	0.2332692	-0.7554120	-0.2562777	-0.3290695	-0.7417858	0.0890982	0.1678523
385.	14.5760000	0.0779594	0.2344195	-0.7700507	-0.2069504	-0.3760177	-0.7188969	0.0958701	0.1665345
386.	14.5775000	0.0843688	0.2347803	-0.7816012	-0.1570007	-0.4212297	-0.6931342	0.1020111	0.1638260
387.	14.5790000	0.0916882	0.2343834	-0.7896759	-0.1062212	-0.4648542	-0.6645459	0.1073657	0.1598247
388.	14.5805000	0.0995842	0.2329145	-0.7945463	-0.0552283	-0.5064143	-0.6333950	0.1116633	0.1547124
389.	14.5820000	0.1079368	0.2303452	-0.7961967	-0.0043601	-0.5458946	-0.5996922	0.1147832	0.1485978
390.	14.5835000	0.1165924	0.2264519	-0.7945663	0.0469206	-0.5832884	-0.5636528	0.1165660	0.1417870
391.	14.5850000	0.1253803	0.2212428	-0.7895072	0.0974892	-0.6181893	-0.5251960	0.1168900	0.1342826

392.	14.5865000	0.1341410	0.2147333	-0.7813269	0.1479382	-0.6508089	-0.4845909	0.1157437	0.1267673
393.	14.5880000	0.1426115	0.2069115	-0.7701035	0.1973730	-0.6806799	-0.4421317	0.1129429	0.1189581
394.	14.5895000	0.1505829	0.1977294	-0.7555643	0.2462740	-0.7079260	-0.3975963	0.1086334	0.1114257
395.	14.5910000	0.1579221	0.1870072	-0.7380617	0.2939032	-0.7323417	-0.3514040	0.1028428	0.1043303
396.	14.5925000	0.1643277	0.1752670	-0.7176726	0.3403707	-0.7536314	-0.3036112	0.0955103	0.0980403
397.	14.5940000	0.1697678	0.1620436	-0.6942762	0.3852446	-0.7719935	-0.2541963	0.0867046	0.0926122
398.	14.5955000	0.1738839	0.1479880	-0.6680003	0.4288036	-0.7871858	-0.2037377	0.0767344	0.0884673
399.	14.5970000	0.1766492	0.1329089	-0.6388699	0.4706821	-0.7988386	-0.1521753	0.0655678	0.0855187
400.	14.5985000	0.1778956	0.1171391	-0.6073408	0.5103403	-0.8069444	-0.0997755	0.0535492	0.0841599
401.	14.6000000	0.1774451	0.1006598	-0.5733560	0.5479366	-0.8115866	-0.0468487	0.0408536	0.0844964
402.	14.6015000	0.1752120	0.0839778	-0.5373591	0.5836902	-0.8118101	0.0065581	0.0276844	0.0865176
403.	14.6030000	0.1711253	0.0671942	-0.4988090	0.6164255	-0.8090088	0.0597576	0.0143504	0.0906175
404.	14.6045000	0.1652583	0.0502923	-0.4581476	0.6469018	-0.8025886	0.1127583	0.0011186	0.0966018
405.	14.6060000	0.1574268	0.0337296	-0.4156182	0.6745829	-0.7925400	0.1650176	-0.0117920	0.1046257
406.	14.6075000	0.1478047	0.0178508	-0.3713183	0.6993835	-0.7788863	0.2165723	-0.0239720	0.1144267
407.	14.6090000	0.1364726	0.0026770	-0.3256684	0.7212377	-0.7615395	0.2669798	-0.0352164	0.1260988
408.	14.6105000	0.1232143	-0.0117325	-0.2785746	0.7404742	-0.7406485	0.3158985	-0.0453025	0.1395072
409.	14.6120000	0.1084429	-0.0247698	-0.2303692	0.7562476	-0.7166137	0.3631395	-0.0540123	0.1545282
410.	14.6135000	0.0923646	-0.0365415	-0.1815011	0.7690342	-0.6892931	0.4082638	-0.0611753	0.1709358
411.	14.6150000	0.0746820	-0.0467256	-0.1318349	0.7782915	-0.6588142	0.4513309	-0.0664116	0.1885065
412.	14.6165000	0.0561828	-0.0552363	-0.0818991	0.7843947	-0.6257381	0.4916673	-0.0697946	0.2069689
413.	14.6180000	0.0365779	-0.0619324	-0.0314881	0.7869934	-0.5897963	0.5294807	-0.0709819	0.2261276
414.	14.6195000	0.0163123	-0.0668226	0.0187723	0.7865897	-0.5520172	0.5645039	-0.0700820	0.2456287
415.	14.6210000	-0.0045102	-0.0696879	0.0688271	0.7828567	-0.5117693	0.5964771	-0.0668261	0.2653348
416.	14.6225000	-0.0255948	-0.0706769	0.1184622	0.7757455	-0.4700228	0.6254386	-0.0615829	0.2847400
417.	14.6240000	-0.0466593	-0.0697095	0.1670894	0.7658511	-0.4267943	0.6511573	-0.0541325	0.3038252
418.	14.6255000	-0.0675233	-0.0667693	0.2152730	0.7526790	-0.3823725	0.6736380	-0.0446294	0.3222202
419.	14.6270000	-0.0881396	-0.0618245	0.2621209	0.7367016	-0.3369049	0.6928467	-0.0330947	0.3398248
420.	14.6285000	-0.1082019	-0.0550156	0.3079229	0.7175434	-0.2906807	0.7090011	-0.0196947	0.3563048
421.	14.6300000	-0.1275320	-0.0464902	0.3521163	0.6957518	-0.2443104	0.7220944	-0.0047637	0.3713839
422.	14.6315000	-0.1459471	-0.0363221	0.3949954	0.6712289	-0.1974924	0.7319985	0.0116769	0.3850329
423.	14.6330000	-0.1631382	-0.0247585	0.4359748	0.6438981	-0.1506718	0.7386539	0.0296052	0.3970933
424.	14.6345000	-0.1793254	-0.0117905	0.4750161	0.6143115	-0.1042983	0.7423119	0.0485840	0.4074965
425.	14.6360000	-0.1942393	0.0024324	0.5122536	0.5822945	-0.0581587	0.7432973	0.0686084	0.4162369
426.	14.6375000	-0.2078214	0.0176660	0.5471587	0.5482295	-0.0125580	0.7413787	0.0893126	0.4229555
427.	14.6390000	-0.2199358	0.0338508	0.5797381	0.5119997	0.0322438	0.7368887	0.1106453	0.4278915
428.	14.6405000	-0.2305894	0.0507592	0.6099060	0.4740653	0.0764021	0.7296775	0.1323778	0.4307643
429.	14.6420000	-0.2397234	0.0680554	0.6376410	0.4343306	0.1194736	0.7202619	0.1541554	0.4318322
430.	14.6435000	-0.2474609	0.0859401	0.6628408	0.3929134	0.1615709	0.7084990	0.1759422	0.4310715
431.	14.6450000	-0.2536837	0.1040084	0.6852559	0.3503524	0.2024021	0.6944619	0.1974921	0.4285128
432.	14.6465000	-0.2584333	0.1222379	0.7051786	0.3063075	0.2422931	0.6783621	0.2188901	0.4240646
433.	14.6480000	-0.2619889	0.1404579	0.7222248	0.2614756	0.2805687	0.6601414	0.2396998	0.4178390
434.	14.6495000	-0.2640992	0.1586148	0.7364911	0.2152707	0.3178284	0.6399314	0.2599130	0.4099513
435.	14.6510000	-0.2651103	0.1765922	0.7478070	0.1685941	0.3535072	0.6180003	0.2794535	0.4005259

436.	14.6525000	-0.2649008	0.1941064	0.7561570	0.1215466	0.3878966	0.5945573	0.2980568	0.3897430
437.	14.6540000	-0.2634672	0.2114192	0.7615935	0.0738167	0.4205742	0.5692376	0.3157729	0.3775020
438.	14.6555000	-0.2610305	0.2281006	0.7640182	0.0259404	0.4518822	0.5423054	0.3324237	0.3639866
439.	14.6570000	-0.2577344	0.2444696	0.7633451	-0.0222081	0.4815246	0.5139481	0.3479025	0.3493241
440.	14.6585000	-0.2535130	0.2603023	0.7598171	-0.0699557	0.5094792	0.4842476	0.3621496	0.3338016
441.	14.6600000	-0.2486149	0.2757013	0.7532233	-0.1175077	0.5360062	0.4529777	0.3752219	0.3170125
442.	14.6615000	-0.2430199	0.2904780	0.7438670	-0.1644541	0.5607523	0.4205997	0.3869826	0.2994961
443.	14.6630000	-0.2368498	0.3046539	0.7314690	-0.2108035	0.5837523	0.3868929	0.3974620	0.2812274
444.	14.6645000	-0.2301300	0.3185015	0.7160583	-0.2563099	0.6048064	0.3521050	0.4064125	0.2623874
445.	14.6660000	-0.2227279	0.3315637	0.6978281	-0.3005878	0.6240333	0.3161237	0.4140238	0.2429251
446.	14.6675000	-0.2148703	0.3442363	0.6768598	-0.3436731	0.6414727	0.2790345	0.4202044	0.2230594
447.	14.6690000	-0.2066705	0.3564271	0.6532284	-0.3852316	0.6568705	0.2411333	0.4250378	0.2028723
448.	14.6705000	-0.1980850	0.3682041	0.6267813	-0.4255866	0.6703105	0.2022617	0.4284176	0.1823912
449.	14.6720000	-0.1890951	0.3795708	0.5979238	-0.4639777	0.6815900	0.1626175	0.4302745	0.1618316
450.	14.6735000	-0.1798628	0.3905907	0.5667308	-0.5004817	0.6907099	0.1224079	0.4307822	0.1413587
451.	14.6750000	-0.1700732	0.4011708	0.5332737	-0.5346792	0.6976092	0.0814474	0.4297898	0.1208217
452.	14.6765000	-0.1599869	0.4112870	0.4976153	-0.5666558	0.7023547	0.0401023	0.4274960	0.1005687
453.	14.6780000	-0.1494572	0.4213078	0.4600721	-0.5965641	0.7046206	-0.0018607	0.4238173	0.0805336
454.	14.6795000	-0.1386090	0.4308530	0.4208275	-0.6237125	0.7045870	-0.0439386	0.4187540	0.0609143
455.	14.6810000	-0.1271893	0.4400826	0.3796933	-0.6481997	0.7021763	-0.0863591	0.4124428	0.0416740
456.	14.6825000	-0.1153799	0.4488948	0.3372255	-0.6698151	0.6972315	-0.1287356	0.4049124	0.0229762
457.	14.6840000	-0.1031549	0.4573116	0.2935665	-0.6887557	0.6898933	-0.1710220	0.3960854	0.0048833
458.	14.6855000	-0.0903955	0.4654105	0.2487624	-0.7049240	0.6800429	-0.2131423	0.3859687	-0.0126724
459.	14.6870000	-0.0770962	0.4730681	0.2033450	-0.7182065	0.6676066	-0.2548530	0.3748618	-0.0292879
460.	14.6885000	-0.0632020	0.4803033	0.1569773	-0.7283326	0.6526166	-0.2961704	0.3627272	-0.0452427
461.	14.6900000	-0.0488269	0.4868989	0.1104239	-0.7355695	0.6351143	-0.3366775	0.3495454	-0.0602538
462.	14.6915000	-0.0339999	0.4931316	0.0635599	-0.7397877	0.6149380	-0.3764687	0.3354127	-0.0743713
463.	14.6930000	-0.0185600	0.4985863	0.0165348	-0.7410568	0.5922205	-0.4151073	0.3202793	-0.0873818
464.	14.6945000	-0.0024957	0.5032929	-0.0303102	-0.7391570	0.5671527	-0.4526372	0.3044582	-0.0993461
465.	14.6960000	0.0140075	0.5072830	-0.0767615	-0.7342754	0.5393874	-0.4888922	0.2877404	-0.1102075
466.	14.6975000	0.0310292	0.5104417	-0.1225940	-0.7267818	0.5093464	-0.5233654	0.2704220	-0.1198643
467.	14.6990000	0.0485927	0.5127571	-0.1678324	-0.7164097	0.4767069	-0.5563030	0.2524805	-0.1283054
468.	14.7005000	0.0663231	0.5143138	-0.2119616	-0.7037865	0.4419591	-0.5874205	0.2340907	-0.1354868
469.	14.7020000	0.0847962	0.5144707	-0.2553715	-0.6877990	0.4050202	-0.6163180	0.2152887	-0.1414414
470.	14.7035000	0.1034418	0.5137343	-0.2975295	-0.6694292	0.3659634	-0.6432041	0.1960349	-0.1460046
471.	14.7050000	0.1222570	0.5117812	-0.3381210	-0.6486467	0.3249685	-0.6674174	0.1767669	-0.1492252
472.	14.7065000	0.1412224	0.5084875	-0.3776250	-0.6253149	0.2820772	-0.6894379	0.1571866	-0.1511053
473.	14.7080000	0.1603419	0.5040318	-0.4155162	-0.5996913	0.2375859	-0.7084116	0.1375688	-0.1516162
474.	14.7095000	0.1794444	0.4983841	-0.4518183	-0.5720236	0.1915191	-0.7246536	0.1181627	-0.1507537
475.	14.7110000	0.1983585	0.4913822	-0.4863289	-0.5422266	0.1441431	-0.7378346	0.0988229	-0.1486254
476.	14.7125000	0.2170217	0.4829621	-0.5187923	-0.5104025	0.0957526	-0.7480338	0.0797327	-0.1449955
477.	14.7140000	0.2353646	0.4731945	-0.5493620	-0.4768917	0.0463101	-0.7546763	0.0609360	-0.1399671
478.	14.7155000	0.2531219	0.4620779	-0.5778799	-0.4415128	-0.0036003	-0.7582168	0.0427448	-0.1337426
479.	14.7170000	0.2704179	0.4495183	-0.6041815	-0.4044182	-0.0542312	-0.7582654	0.0250643	-0.1262807

480.	14.7185000	0.2869136	0.4359657	-0.6283594	-0.3658766	-0.1047678	-0.7549127	0.0081114	-0.1175137
481.	14.7200000	0.3025665	0.4210237	-0.6503126	-0.3259696	-0.1554187	-0.7479802	-0.0083173	-0.1075625
482.	14.7215000	0.3171368	0.4047015	-0.6696983	-0.2846937	-0.2056204	-0.7375993	-0.0238724	-0.0965226
483.	14.7230000	0.3309490	0.3873978	-0.6867619	-0.2425046	-0.2551393	-0.7236820	-0.0384129	-0.0845283
484.	14.7245000	0.3433430	0.3688677	-0.7013059	-0.1987626	-0.3040734	-0.7060646	-0.0520982	-0.0713992
485.	14.7260000	0.3547009	0.3494925	-0.7133365	-0.1543994	-0.3516768	-0.6850848	-0.0646738	-0.0573941
486.	14.7275000	0.3644233	0.3290206	-0.7226617	-0.1090704	-0.3979433	-0.6608096	-0.0761143	-0.0426843
487.	14.7290000	0.3726044	0.3080428	-0.7294265	-0.0631645	-0.4425266	-0.6332133	-0.0864127	-0.0272677
488.	14.7305000	0.3793553	0.2863214	-0.7333364	-0.0165050	-0.4852838	-0.6025363	-0.0953417	-0.0110396
489.	14.7320000	0.3844911	0.2640536	-0.7343304	0.0303406	-0.5258235	-0.5684999	-0.1031209	0.0054803
490.	14.7335000	0.3878617	0.2414753	-0.7326269	0.0773395	-0.5639468	-0.5318251	-0.1095161	0.0223901
491.	14.7350000	0.3894230	0.2185466	-0.7280329	0.1246900	-0.5997360	-0.4924473	-0.1144938	0.0397390
492.	14.7365000	0.3893379	0.1956752	-0.7203038	0.1719218	-0.6324833	-0.4504230	-0.1183282	0.0571112
493.	14.7380000	0.3874064	0.1728954	-0.7096213	0.2191120	-0.6622981	-0.4060696	-0.1206162	0.0747479
494.	14.7395000	0.3837402	0.1502996	-0.6959522	0.2655651	-0.6889160	-0.3597825	-0.1218835	0.0922591
495.	14.7410000	0.3781244	0.1282284	-0.6790161	0.3116188	-0.7123191	-0.3112957	-0.1215598	0.1097470
496.	14.7425000	0.3707900	0.1067499	-0.6592303	0.3566560	-0.7324128	-0.2614468	-0.1201385	0.1268826
497.	14.7440000	0.3618364	0.0861171	-0.6362935	0.4010915	-0.7487013	-0.2102816	-0.1173873	0.1438569
498.	14.7455000	0.3511367	0.0663126	-0.6101491	0.4440612	-0.7613135	-0.1578711	-0.1134107	0.1603214
499.	14.7470000	0.3391054	0.0478049	-0.5811771	0.4857423	-0.7702585	-0.1048529	-0.1082820	0.1763218
500.	14.7485000	0.3255734	0.0304190	-0.5490042	0.5258556	-0.7754096	-0.0510305	-0.1019577	0.1915964
501.	14.7500000	0.3107501	0.0144737	-0.5141054	0.5639379	-0.7765939	0.0028041	-0.0947036	0.2062483
502.	14.7515000	0.2948433	0.0001644	-0.4761657	0.6000383	-0.7740883	0.0568034	-0.0863545	0.2202945
503.	14.7530000	0.2779174	-0.0125782	-0.4354841	0.6337957	-0.7677760	0.1104389	-0.0770144	0.2335092
504.	14.7545000	0.2602485	-0.0234716	-0.3922912	0.6650329	-0.7576879	0.1634761	-0.0668160	0.2456980
505.	14.7560000	0.2420243	-0.0323708	-0.3462455	0.6932860	-0.7438456	0.2156442	-0.0557047	0.2571784
506.	14.7575000	0.2234462	-0.0395443	-0.2980604	0.7183162	-0.7263840	0.2666464	-0.0440727	0.2675295
507.	14.7590000	0.2046261	-0.0448108	-0.2474694	0.7404662	-0.7053590	0.3165399	-0.0315715	0.2769111
508.	14.7605000	0.1860287	-0.0481992	-0.1951600	0.7588935	-0.6810585	0.3646656	-0.0185866	0.2851861
509.	14.7620000	0.1676783	-0.0494990	-0.1410462	0.7736765	-0.6533226	0.4109286	-0.0051259	0.2921865
510.	14.7635000	0.1497743	-0.0490452	-0.0854463	0.7842762	-0.6224309	0.4552558	0.0088949	0.2981659
511.	14.7650000	0.1326451	-0.0468947	-0.0288267	0.7907156	-0.5885193	0.4972059	0.0231403	0.3028336
512.	14.7665000	0.1164654	-0.0431426	0.0288574	0.7934029	-0.5517805	0.5368105	0.0376191	0.3063339
513.	14.7680000	0.1014320	-0.0377896	0.0867894	0.7914797	-0.5123166	0.5737082	0.0522258	0.3084830
514.	14.7695000	0.0875326	-0.0311574	0.1448697	0.7853009	-0.4703650	0.6077609	0.0668134	0.3093266
515.	14.7710000	0.0749897	-0.0233263	0.2028985	0.7742421	-0.4260698	0.6390332	0.0812251	0.3089454
516.	14.7725000	0.0640809	-0.0144861	0.2601364	0.7590044	-0.3798395	0.6671022	0.0954671	0.3071742
517.	14.7740000	0.0547058	-0.0049031	0.3167573	0.7391223	-0.3314499	0.6919295	0.1094842	0.3041696
518.	14.7755000	0.0471033	0.0051433	0.3715999	0.7150827	-0.2815936	0.7137014	0.1228970	0.2998410
519.	14.7770000	0.0412665	0.0155220	0.4251454	0.6862479	-0.2298898	0.7317145	0.1359016	0.2941487
520.	14.7785000	0.0371362	0.0260750	0.4763735	0.6532573	-0.1773272	0.7463471	0.1480554	0.2872012
521.	14.7800000	0.0346798	0.0364612	0.5254294	0.6160944	-0.1233281	0.7572448	0.1594055	0.2789854
522.	14.7815000	0.0339145	0.0466283	0.5712762	0.5752081	-0.0685763	0.7643033	0.1697878	0.2696307
523.	14.7830000	0.0346200	0.0558895	0.6141305	0.5301846	-0.0133816	0.7677927	0.1789978	0.2592974

524.	14.7845000	0.0368308	0.0648394	0.6533802	0.4820624	0.0424469	0.7671747	0.1868265	0.2479391
525.	14.7860000	0.0404047	0.0726098	0.6887673	0.4306827	0.0982837	0.7628039	0.1932956	0.2358261
526.	14.7875000	0.0451316	0.0796141	0.7202965	0.3762510	0.1542735	0.7544989	0.1981432	0.2229099
527.	14.7890000	0.0508744	0.0851734	0.7471815	0.3193702	0.2097363	0.7420360	0.2012945	0.2094927
528.	14.7905000	0.0575732	0.0897083	0.7696790	0.2601496	0.2646311	0.7252899	0.2025507	0.1955164
529.	14.7920000	0.0647503	0.0927396	0.7875826	0.1991538	0.3188680	0.7047057	0.2018995	0.1815087
530.	14.7935000	0.0726351	0.0945670	0.8004889	0.1368519	0.3717340	0.6799243	0.1992601	0.1675137
531.	14.7950000	0.0807627	0.0946002	0.8080283	0.0732161	0.4233811	0.6507851	0.1943441	0.1538958
532.	14.7965000	0.0796468	0.1032545	0.7996261	0.1330844	0.4159783	0.6577997	0.1638852	0.1691668
533.	14.7980000	0.0976161	0.0908228	0.8077044	-0.0551618	0.5207736	0.5801541	0.1781028	0.1290853
534.	14.7995000	0.1058094	0.0868764	0.7996508	-0.1189220	0.5658687	0.5385664	0.1668288	0.1184891
535.	14.8010000	0.1138390	0.0813401	0.7860866	-0.1822811	0.6082986	0.4931193	0.1534739	0.1097099
536.	14.8025000	0.1213748	0.0745757	0.7674530	-0.2443680	0.6470840	0.4434291	0.1382449	0.1028460
537.	14.8040000	0.1283966	0.0666833	0.7438657	-0.3046445	0.6821868	0.3899158	0.1213301	0.0985710
538.	14.8055000	0.1348265	0.0575158	0.7151955	-0.3630962	0.7128443	0.3326520	0.1031180	0.0969836
539.	14.8070000	0.1403633	0.0473727	0.6817448	-0.4188769	0.7385882	0.2722226	0.0839952	0.0986961
540.	14.8085000	0.1452694	0.0361689	0.6434065	-0.4720026	0.7591734	0.2086669	0.0644421	0.1038015
541.	14.8100000	0.1491444	0.0239337	0.6008459	-0.5217087	0.7737110	0.1428836	0.0448050	0.1126786
542.	14.8115000	0.1519189	0.0109403	0.5543953	-0.5674919	0.7820210	0.0753384	0.0260898	0.1252753
543.	14.8130000	0.1537401	-0.0031695	0.5037165	-0.6096489	0.7835518	0.0065054	0.0087242	0.1416146
544.	14.8145000	0.1543978	-0.0179292	0.4498332	-0.6468908	0.7781764	-0.0623720	-0.0066414	0.1617901
545.	14.8160000	0.1538683	-0.0333495	0.3925076	-0.6795626	0.7660692	-0.1308153	-0.0189876	0.1852268
546.	14.8175000	0.1519890	-0.0493438	0.3328745	-0.7069823	0.7465454	-0.1976821	-0.0278532	0.2117810
547.	14.8190000	0.1487985	-0.0659903	0.2706894	-0.7296337	0.7202426	-0.2620327	-0.0326111	0.2409182
548.	14.8205000	0.1442797	-0.0830545	0.2067292	-0.7462167	0.6874503	-0.3230898	-0.0327451	0.2718489
549.	14.8220000	0.1381203	-0.1001820	0.1419509	-0.7570941	0.6486886	-0.3796871	-0.0278951	0.3036290
550.	14.8235000	0.1303579	-0.1178502	0.0761510	-0.7621346	0.6043848	-0.4315487	-0.0178922	0.3354452
551.	14.8250000	0.1209135	-0.1356239	0.0103529	-0.7610947	0.5557303	-0.4776798	-0.0025209	0.3666103
552.	14.8265000	0.1097121	-0.1533403	-0.0551791	-0.7541199	0.5034908	-0.5178711	0.0180917	0.3961520
553.	14.8280000	0.0965795	-0.1709947	-0.1192263	-0.7412536	0.4483077	-0.5516335	0.0433000	0.4227809
554.	14.8295000	0.0814712	-0.1882053	-0.1819216	-0.7226413	0.3912990	-0.5788066	0.0730827	0.4463027
555.	14.8310000	0.0646430	-0.2047850	-0.2420967	-0.6985553	0.3335943	-0.5998222	0.1063534	0.4658030
556.	14.8325000	0.0456559	-0.2206022	-0.2994018	-0.6691197	0.2757532	-0.6144016	0.1427593	0.4808018
557.	14.8340000	0.0246750	-0.2352467	-0.3535655	-0.6345728	0.2185400	-0.6233987	0.1813070	0.4907836
558.	14.8355000	0.0017741	-0.2486509	-0.4038248	-0.5955031	0.1626760	-0.6269081	0.2212799	0.4958263
559.	14.8370000	-0.0230593	-0.2604848	-0.4500651	-0.5522812	0.1083194	-0.6256584	0.2620206	0.4953494
560.	14.8385000	-0.0491994	-0.2703932	-0.4914075	-0.5058421	0.0564510	-0.6201395	0.3025570	0.4898729
561.	14.8400000	-0.0772857	-0.2782306	-0.5281157	-0.4561049	0.0066039	-0.6106480	0.3426537	0.4792081
562.	14.8415000	-0.1067204	-0.2837003	-0.5596452	-0.4038449	-0.0403374	-0.5980337	0.3811989	0.4638032
563.	14.8430000	-0.1369765	-0.2865698	-0.5861269	-0.3499876	-0.0849624	-0.5826309	0.4177645	0.4439391
564.	14.8445000	-0.1681856	-0.2865431	-0.6075780	-0.2944664	-0.1268478	-0.5648162	0.4519450	0.4199639
565.	14.8460000	-0.1997187	-0.2838258	-0.6238214	-0.2383316	-0.1662455	-0.5451356	0.4832241	0.3919184
566.	14.8475000	-0.2314382	-0.2779744	-0.6351188	-0.1814850	-0.2036465	-0.5236956	0.5112904	0.3603423
567.	14.8490000	-0.2627487	-0.2688676	-0.6417685	-0.1248682	-0.2386931	-0.5010102	0.5357420	0.3258058

568.	14.8505000	-0.2936264	-0.2566989	-0.6438091	-0.0684216	-0.2720231	-0.4769329	0.5563313	0.2882845
569.	14.8520000	-0.3231467	-0.2415237	-0.6415257	-0.0128964	-0.3037988	-0.4518466	0.5726056	0.2485920
570.	14.8535000	-0.3513788	-0.2233682	-0.6352299	0.0417350	-0.3340792	-0.4256788	0.5843807	0.2069135
571.	14.8550000	-0.3777084	-0.2020596	-0.6247970	0.0956510	-0.3634865	-0.3983920	0.5912958	0.1633418
572.	14.8565000	-0.4016145	-0.1781503	-0.6109921	0.1482843	-0.3919182	-0.3699431	0.5931289	0.1187098
573.	14.8580000	-0.4229968	-0.1517796	-0.5935365	0.2001173	-0.4198744	-0.3397038	0.5893909	0.0732617
574.	14.8595000	-0.4410696	-0.1228866	-0.5724832	0.2507002	-0.4473430	-0.3078010	0.5796987	0.0278064
575.	14.8610000	-0.4554943	-0.0919077	-0.5479732	0.3006694	-0.4747222	-0.2735290	0.5636758	-0.0172869
576.	14.8625000	-0.4659176	-0.0592942	-0.5197914	0.3499860	-0.5019584	-0.2362083	0.5405570	-0.0611058
577.	14.8640000	-0.4714256	-0.0254439	-0.4875530	0.3987378	-0.5290564	-0.1950158	0.5099740	-0.1023637
578.	14.8655000	-0.4717186	0.0091134	-0.4506128	0.4471034	-0.5556191	-0.1487370	0.4709907	-0.1399782
579.	14.8670000	-0.4662168	0.0433412	-0.4085418	0.4948720	-0.5811761	-0.0963224	0.4235188	-0.1716449
580.	14.8685000	-0.4539437	0.0765249	-0.3595583	0.5421892	-0.6044604	-0.0356149	0.3667376	-0.1949785
581.	14.8700000	-0.4343576	0.1069588	-0.3028197	0.5882381	-0.6234868	0.0344987	0.3012952	-0.2063581
582.	14.8715000	-0.4070829	0.1323506	-0.2360604	0.6314768	-0.6342024	0.1159689	0.2291891	-0.2009076
583.	14.8730000	-0.3718283	0.1504104	-0.1569423	0.6697868	-0.6313851	0.2092503	0.1537624	-0.1733354
584.	14.8745000	-0.3299125	0.1570376	-0.0644195	0.6991271	-0.6083187	0.3124094	0.0831923	-0.1185511
585.	14.8760000	-0.2833908	0.1482177	0.0426349	0.7136683	-0.5565557	0.4193979	0.0296353	-0.0342899
586.	14.8775000	-0.2382836	0.1197740	0.1614752	0.7053080	-0.4714723	0.5178722	0.0084468	0.0740049
587.	14.8790000	-0.2028634	0.0699089	0.2856905	0.6658735	-0.3540772	0.5918069	0.0328953	0.1916196
588.	14.8805000	-0.1878223	0.0016479	0.4018328	0.5898658	-0.2175060	0.6259112	0.1064629	0.2945102
589.	14.8820000	-0.2024643	-0.0748846	0.4934444	0.4806288	-0.0818733	0.6152585	0.2167068	0.3605043
590.	14.8835000	-0.2491898	-0.1454317	0.5468818	0.3501816	0.0340537	0.5674453	0.3417518	0.3793983
591.	14.8850000	-0.3212659	-0.1958891	0.5571348	0.2180797	0.1199981	0.4974335	0.4590974	0.3542532
592.	14.8865000	-0.4064385	-0.2187828	0.5308305	0.1009027	0.1758144	0.4201080	0.5559918	0.2974260
593.	14.8880000	-0.4917311	-0.2150151	0.4813983	0.0088809	0.2069359	0.3459952	0.6271271	0.2224754
594.	14.8895000	-0.5688431	-0.1900662	0.4211710	-0.0571790	0.2200136	0.2797482	0.6744038	0.1393456
595.	14.8910000	-0.6334189	-0.1509521	0.3598947	-0.1003770	0.2214415	0.2233668	0.7006010	0.0551348
596.	14.8925000	-0.6849923	-0.1036460	0.3027005	-0.1261502	0.2154760	0.1767415	0.7101262	-0.0257326
597.	14.8940000	-0.7249755	-0.0523613	0.2518485	-0.1394852	0.2052606	0.1383404	0.7069338	-0.1018459
598.	14.8955000	-0.7544827	-0.0001633	0.2083730	-0.1445051	0.1930899	0.1071134	0.6934546	-0.1719982
599.	14.8970000	-0.7757322	0.0513608	0.1715364	-0.1438842	0.1798751	0.0816783	0.6722320	-0.2363533
600.	14.8985000	-0.7903645	0.1012533	0.1408680	-0.1397176	0.1665968	0.0611260	0.6450845	-0.2947229
601.	14.9000000	-0.7994482	0.1492603	0.1151580	-0.1335218	0.1536485	0.0444107	0.6131734	-0.3474798
602.	14.9015000	-0.8045918	0.1948890	0.0939465	-0.1263395	0.1412341	0.0309620	0.5782895	-0.3953080
603.	14.9030000	-0.8059205	0.2381822	0.0763540	-0.1186220	0.1296308	0.0198707	0.5395941	-0.4379094
604.	14.9045000	-0.8042578	0.2793761	0.0616836	-0.1108363	0.1188656	0.0106990	0.4981726	-0.4759621
605.	14.9060000	-0.7999825	0.3182440	0.0495002	-0.1030706	0.1087633	0.0034194	0.4551535	-0.5093750
606.	14.9075000	-0.7941897	0.3552669	0.0392711	-0.0955842	0.0994837	-0.0024487	0.4105604	-0.5388009
607.	14.9090000	-0.7865323	0.3903303	0.0307443	-0.0883875	0.0909281	-0.0074175	0.3645056	-0.5641348
608.	14.9105000	-0.7776574	0.4237527	0.0236989	-0.0817459	0.0833529	-0.0114328	0.3174120	-0.5853170
609.	14.9120000	-0.7673625	0.4553961	0.0178280	-0.0755121	0.0759802	-0.0144896	0.2696496	-0.6029497
610.	14.9135000	-0.7563583	0.4855313	0.0128265	-0.0696534	0.0692478	-0.0169632	0.2214389	-0.6169884
611.	14.9150000	-0.7444268	0.5142210	0.0087738	-0.0642299	0.0630929	-0.0188810	0.1727234	-0.6276138

612.	14.9165000	-0.7317483	0.5415017	0.0052671	-0.0592473	0.0575659	-0.0204306	0.1241213	-0.6347124
613.	14.9180000	-0.7184504	0.5678784	0.0023729	-0.0545829	0.0523872	-0.0215631	0.0752903	-0.6383457
614.	14.9195000	-0.7044832	0.5924750	0.0000232	-0.0503070	0.0474772	-0.0222546	0.0267986	-0.6386330
615.	14.9210000	-0.6900145	0.6162053	-0.0019782	-0.0463801	0.0430300	-0.0228742	-0.0215057	-0.6357234
616.	14.9225000	-0.6752462	0.6387323	-0.0036357	-0.0427531	0.0389862	-0.0231151	-0.0691505	-0.6298805
617.	14.9240000	-0.6600528	0.6602055	-0.0049482	-0.0394880	0.0354121	-0.0232576	-0.1161926	-0.6209724
618.	14.9255000	-0.6446145	0.6809847	-0.0061066	-0.0363963	0.0320382	-0.0232852	-0.1622939	-0.6090707
619.	14.9270000	-0.6289042	0.7005176	-0.0071231	-0.0334624	0.0289659	-0.0230831	-0.2073039	-0.5944000
620.	14.9285000	-0.6129782	0.7193892	-0.0078282	-0.0308512	0.0260052	-0.0227304	-0.2512557	-0.5768201
621.	14.9300000	-0.5967624	0.7371415	-0.0084068	-0.0284626	0.0233376	-0.0223615	-0.2938043	-0.5564763
622.	14.9315000	-0.5804818	0.7543245	-0.0088943	-0.0262318	0.0208834	-0.0218338	-0.3349140	-0.5335713
623.	14.9330000	-0.5640240	0.7706171	-0.0092287	-0.0241248	0.0185219	-0.0211971	-0.3744111	-0.5082256
624.	14.9345000	-0.5474451	0.7861623	-0.0094505	-0.0222129	0.0163964	-0.0206904	-0.4120082	-0.4804726
625.	14.9360000	-0.5306927	0.8011749	-0.0096167	-0.0204735	0.0145667	-0.0200762	-0.4478687	-0.4505937
626.	14.9375000	-0.5140717	0.8153547	-0.0097009	-0.0188886	0.0128314	-0.0193919	-0.4813894	-0.4187847
627.	14.9390000	-0.4971777	0.8287614	-0.0097721	-0.0173461	0.0112013	-0.0188114	-0.5130334	-0.3851613
628.	14.9405000	-0.4802069	0.8415831	-0.0097251	-0.0159790	0.0097845	-0.0181366	-0.5422970	-0.3494892
629.	14.9420000	-0.4632394	0.8537362	-0.0096702	-0.0147054	0.0084598	-0.0174527	-0.5693105	-0.3123774
630.	14.9435000	-0.4463036	0.8654534	-0.0095894	-0.0134785	0.0072678	-0.0167855	-0.5940347	-0.2738931
631.	14.9450000	-0.4292633	0.8764756	-0.0094714	-0.0122951	0.0061662	-0.0160801	-0.6158387	-0.2341677
632.	14.9465000	-0.4124434	0.8871861	-0.0092422	-0.0112535	0.0051498	-0.0153823	-0.6355680	-0.1931738
633.	14.9480000	-0.3955246	0.8971783	-0.0090569	-0.0102363	0.0042312	-0.0146093	-0.6526165	-0.1514903
634.	14.9495000	-0.3784922	0.9067556	-0.0088608	-0.0093359	0.0034191	-0.0139714	-0.6671177	-0.1090076
635.	14.9510000	-0.3616576	0.9156352	-0.0087111	-0.0085544	0.0026195	-0.0132393	-0.6788296	-0.0660176
636.	14.9525000	-0.3448659	0.9241494	-0.0085282	-0.0078133	0.0019615	-0.0126412	-0.6880651	-0.0226568
637.	14.9540000	-0.3279749	0.9320215	-0.0082803	-0.0070505	0.0013348	-0.0119007	-0.6946824	0.0211952
638.	14.9555000	-0.3113078	0.9396223	-0.0081172	-0.0064032	0.0007478	-0.0113190	-0.6986941	0.0649655
639.	14.9570000	-0.2944779	0.9464465	-0.0078916	-0.0058192	0.0002846	-0.0106949	-0.7001042	0.1086139
640.	14.9585000	-0.2779020	0.9531864	-0.0076469	-0.0052623	-0.0001792	-0.0100289	-0.6992329	0.1516776
641.	14.9600000	-0.2613273	0.9593702	-0.0074787	-0.0046993	-0.0004852	-0.0095161	-0.6957913	0.1945561
642.	14.9615000	-0.2447772	0.9651960	-0.0071686	-0.0041662	-0.0008274	-0.0089072	-0.6899619	0.2369540
643.	14.9630000	-0.2283989	0.9705960	-0.0068996	-0.0037353	-0.0011607	-0.0083465	-0.6817569	0.2784458
644.	14.9645000	-0.2120315	0.9756159	-0.0067235	-0.0033264	-0.0013182	-0.0079614	-0.6712848	0.3191293
645.	14.9660000	-0.1958606	0.9802238	-0.0064775	-0.0029406	-0.0015874	-0.0073317	-0.6587051	0.3587412
646.	14.9675000	-0.1796909	0.9845105	-0.0062119	-0.0025762	-0.0017994	-0.0068785	-0.6440867	0.3975036
647.	14.9690000	-0.1636191	0.9882950	-0.0060491	-0.0022203	-0.0019068	-0.0064383	-0.6276635	0.4350307
648.	14.9705000	-0.1478052	0.9920811	-0.0057659	-0.0019623	-0.0020605	-0.0059930	-0.6091678	0.4716129
649.	14.9720000	-0.1319243	0.9950614	-0.0055944	-0.0015970	0.0071727	0.0093591	-0.5890629	0.5063246
650.	14.9735000	-0.1162656	0.9981575	-0.0053683	-0.0014025	0.0071253	0.0085950	-0.5673696	0.5397522
651.	14.9750000	-0.1006337	1.0007520	-0.0050578	-0.0011062	0.0070508	0.0078925	-0.5443410	0.5716578
652.	14.9765000	-0.0852962	1.0031480	-0.0234308	-0.0209766	0.0069328	0.0072059	-0.5198344	0.6022738
653.	14.9780000	-0.0697605	1.0051360	-0.0229420	-0.0190485	0.0068222	0.0065540	-0.4939349	0.6311766
654.	14.9795000	-0.0544670	1.0066830	-0.0223841	-0.0173415	0.0066694	0.0060440	-0.4669936	0.6582160
655.	14.9810000	-0.0392860	1.0080300	-0.0218987	-0.0156731	0.0065310	0.0055001	-0.4389368	0.6838412

656.	14.9825000	-0.0243458	1.0094140	-0.0213259	-0.0143287	0.0064011	0.0049952	-0.4098459	0.7078179
657.	14.9840000	-0.0095341	1.0103610	-0.0209128	-0.0129840	0.0062322	0.0044807	-0.3801038	0.7297025
658.	14.9855000	0.0053882	1.0107890	-0.0203775	-0.0115552	0.0060341	0.0040395	-0.3496202	0.7503994
659.	14.9870000	0.0199104	1.0113170	-0.0196945	-0.0104144	0.0058575	0.0036717	-0.3185004	0.7692139
660.	14.9885000	0.0345022	1.0114520	-0.0191055	-0.0092061	0.0056488	0.0032709	-0.2866659	0.7861887
661.	14.9900000	0.0488776	1.0112370	-0.0184754	-0.0081079	0.0055066	0.0029273	-0.2547044	0.8016351
662.	14.9915000	0.0633298	1.0108540	-0.0179379	-0.0071773	0.0052773	0.0025925	-0.2222807	0.8154820
663.	14.9930000	0.0774287	1.0103150	-0.0172956	-0.0063011	0.0050988	0.0022888	-0.1898596	0.8275304
664.	14.9945000	0.0913911	1.0094250	-0.0167962	-0.0054397	0.0048990	0.0019833	-0.1571588	0.8380635
665.	14.9960000	0.1053361	1.0084630	-0.0162568	-0.0046928	0.0046799	0.0017548	-0.1242526	0.8469082
666.	14.9975000	0.1190092	1.0074110	-0.0156010	-0.0039450	0.0045030	0.0015506	-0.0915142	0.8542044
667.	14.9990000	0.1326190	1.0060260	-0.0149650	-0.0031931	0.0042990	0.0013047	-0.0587710	0.8601865
668.	15.0005000	0.1462477	1.0047240	-0.0144128	-0.0025736	0.0041051	0.0011466	-0.0261740	0.8649197
669.	15.0020000	0.1595505	1.0028420	-0.0137887	-0.0019173	0.0039498	0.0009662	0.0064122	0.8679275
670.	15.0035000	0.1726679	1.0008350	-0.0131851	-0.0014039	0.0037535	0.0008015	0.0386245	0.8695093
671.	15.0050000	0.1858684	0.9985185	-0.0125466	-0.0009092	0.0036037	0.0006436	0.0705263	0.8696966
672.	15.0065000	0.1987900	0.9961874	-0.0119438	-0.0004866	0.0034647	0.0005176	0.1021298	0.8684604
673.	15.0080000	0.2115360	0.9937198	-0.0114148	-0.0001604	0.0033064	0.0003781	0.1331407	0.8660261
674.	15.0095000	0.2242413	0.9911320	-0.0109313	0.0002532	0.0031301	0.0002838	0.1637566	0.8625302
675.	15.0110000	0.2368168	0.9882449	-0.0103822	0.0004753	0.0030236	0.0001443	0.1939487	0.8575779
676.	15.0125000	0.2491317	0.9853643	-0.0099074	0.0008843	0.0029008	0.0000995	0.2236180	0.8516672
677.	15.0140000	0.2616384	0.9820939	-0.0093461	0.0014535	0.0028505	0.0000275	0.2526757	0.8446308
678.	15.0155000	0.2737832	0.9788989	-0.0087825	0.0017761	0.0027528	-0.0000578	0.2811552	0.8367705
679.	15.0170000	0.2859071	0.9754437	-0.0079920	0.0021140	0.0026051	-0.0001665	0.3090131	0.8276144
680.	15.0185000	0.2977774	0.9716710	-0.0075327	0.0020966	0.0024597	-0.0002223	0.3361571	0.8176674
681.	15.0200000	0.3094971	0.9679382	-0.0070885	0.0021235	0.0022674	-0.0003156	0.3627772	0.8065985
682.	15.0215000	0.3211727	0.9639724	-0.0067602	0.0020843	0.0021507	-0.0003879	0.3887627	0.7948875
683.	15.0230000	0.3325730	0.9601426	-0.0063836	0.0021696	0.0020184	-0.0003544	0.4138589	0.7823935
684.	15.0245000	0.3438832	0.9559606	-0.0061663	0.0022282	0.0019022	-0.0003828	0.4384838	0.7689946
685.	15.0260000	0.3550073	0.9515776	-0.0058594	0.0022926	0.0017991	-0.0004282	0.4622503	0.7547624
686.	15.0275000	0.3660764	0.9471802	-0.0054495	0.0022155	0.0017158	-0.0004454	0.4854880	0.7397977
687.	15.0290000	0.3770576	0.9426942	-0.0051969	0.0022951	0.0016298	-0.0004594	0.5078700	0.7240433
688.	15.0305000	0.3880132	0.9379355	-0.0049101	0.0023259	0.0015675	-0.0004716	0.5296947	0.7078402
689.	15.0320000	0.3986971	0.9332390	-0.0045681	0.0025586	0.0014779	-0.0004890	0.5505474	0.6910952
690.	15.0335000	0.4091827	0.9284287	-0.0043434	0.0024904	0.0014189	-0.0005056	0.5705463	0.6736472
691.	15.0350000	0.4195936	0.9233215	-0.0039690	0.0024583	0.0013268	-0.0005321	0.5899706	0.6554305
692.	15.0365000	0.4299289	0.9183909	-0.0038085	0.0024712	0.0012304	-0.0005377	0.6083255	0.6370043
693.	15.0380000	0.4401768	0.9129418	-0.0035021	0.0025077	0.0011859	-0.0005532	0.6261476	0.6181749
694.	15.0395000	0.4502096	0.9079918	-0.0033418	0.0024791	0.0011261	-0.0005417	0.6432455	0.5986841
695.	15.0410000	0.4601622	0.9023892	-0.0031531	0.0023574	0.0010800	-0.0005652	0.6594781	0.5788411
696.	15.0425000	0.4698355	0.8969689	-0.0030036	0.0023266	0.0009484	-0.0005937	0.6749316	0.5586361
697.	15.0440000	0.4794103	0.8912824	-0.0028412	0.0023235	0.0008806	-0.0005185	0.6897100	0.5381390
698.	15.0455000	0.4888454	0.8857754	-0.0026722	0.0022615	0.0008156	-0.0005119	0.7037189	0.5171596
699.	15.0470000	0.4982708	0.8798510	-0.0026393	0.0021922	0.0007630	-0.0004939	0.7168732	0.4961988

700.	15.0485000	0.5076659	0.8741063	-0.0023809	0.0021125	0.0007111	-0.0004787	0.7292897	0.4745787
701.	15.0500000	0.5169199	0.8680885	-0.0023686	0.0021034	0.0006743	-0.0004753	0.7410262	0.4525776
702.	15.0515000	0.5259431	0.8622407	-0.0022801	0.0021432	0.0006330	-0.0004637	0.7521178	0.4305421
703.	15.0530000	0.5349274	0.8561312	-0.0023638	0.0018451	0.0005540	-0.0004512	0.7622454	0.4079881
704.	15.0545000	0.5436386	0.8498550	-0.0024420	0.0016898	0.0004768	-0.0003804	0.7715183	0.3856232
705.	15.0560000	0.5523075	0.8437261	-0.0024375	0.0014787	0.0004249	-0.0003672	0.7801847	0.3627318
706.	15.0575000	0.5608681	0.8371508	-0.0022178	0.0015834	0.0004428	-0.0003458	0.7881159	0.3397804
707.	15.0590000	0.5692725	0.8308640	-0.0019854	0.0017057	0.0004840	-0.0003990	0.7952552	0.3169345
708.	15.0605000	0.5776629	0.8243563	-0.0015666	0.0018979	0.0005667	-0.0004308	0.8015845	0.2936887
709.	15.0620000	0.5857853	0.8180740	-0.0012990	0.0020750	0.0005256	-0.0004853	0.8071544	0.2704397
710.	15.0635000	0.5939182	0.8113500	-0.0010092	0.0019446	0.0005478	-0.0005255	0.8120236	0.2470158
711.	15.0650000	0.6018216	0.8046798	-0.0008691	0.0018371	0.0004846	-0.0005390	0.8161687	0.2236140
712.	15.0665000	0.6095225	0.7979883	-0.0008545	0.0017169	0.0004118	-0.0005433	0.8195039	0.2001234
713.	15.0680000	0.6173306	0.7911179	-0.0007304	0.0016295	0.0004101	-0.0005086	0.8221443	0.1766003
714.	15.0695000	0.6250356	0.7844040	-0.0006246	0.0016737	0.0003625	-0.0004909	0.8240914	0.1530702
715.	15.0710000	0.6325408	0.7775260	-0.0006285	0.0015113	0.0003298	-0.0004765	0.8251563	0.1296037
716.	15.0725000	0.6397409	0.7704003	-0.0005228	0.0015791	0.0003123	-0.0004258	0.8257740	0.1061797
717.	15.0740000	0.6470956	0.7635414	-0.0005666	0.0014258	0.0002780	-0.0004276	0.8255282	0.0827346
718.	15.0755000	0.6543736	0.7564408	-0.0006178	0.0013857	0.0002591	-0.0003984	0.8246434	0.0593117
719.	15.0770000	0.6614122	0.7493936	-0.0005751	0.0013982	0.0002424	-0.0004234	0.8230606	0.0360931
720.	15.0785000	0.6683167	0.7422428	-0.0005341	0.0013382	0.0002288	-0.0003592	0.8208150	0.0128394
721.	15.0800000	0.6752979	0.7351643	-0.0004870	0.0012773	0.0002381	-0.0003573	0.8177506	-0.0102367
722.	15.0815000	0.6819110	0.7280381	-0.0004451	0.0013065	0.0001662	-0.0003285	0.8141241	-0.0330633
723.	15.0830000	0.6884877	0.7207109	-0.0003323	0.0012451	0.0001901	-0.0003199	0.8098372	-0.0558335
724.	15.0845000	0.6950096	0.7133358	-0.0004310	0.0011031	0.0001334	-0.0003120	0.8047025	-0.0785755
725.	15.0860000	0.7014530	0.7060780	-0.0003903	0.0009939	0.0001450	-0.0002822	0.7987819	-0.1010557
726.	15.0875000	0.7077919	0.6986460	-0.0003926	0.0010954	0.0001572	-0.0003225	0.7923853	-0.1234333
727.	15.0890000	0.7139548	0.6913078	-0.0003415	0.0011031	0.0001815	-0.0003402	0.7852067	-0.1455324
728.	15.0905000	0.7198244	0.6837882	-0.0002534	0.0010506	0.0001691	-0.0003169	0.7773880	-0.1673225
729.	15.0920000	0.7258967	0.6762583	-0.0001551	0.0010427	0.0001197	-0.0003381	0.7690488	-0.1889589
730.	15.0935000	0.7315996	0.6688867	0.0000166	0.0009962	0.0001339	-0.0002946	0.7599093	-0.2103177
731.	15.0950000	0.7372494	0.6613126	-0.0000093	0.0009898	0.0001029	-0.0003387	0.7501467	-0.2315310
732.	15.0965000	0.6781225	0.7247743	0.0006973	0.0007318	0.0002719	-0.0001177	0.7669296	-0.1409742
733.	15.0980000	0.7484854	0.6461911	0.0001322	0.0008806	0.0000830	-0.0002988	0.7286621	-0.2728896
734.	15.0995000	0.7539591	0.6384460	0.0001573	0.0008815	0.0000928	-0.0003425	0.7170092	-0.2930070
735.	15.1010000	0.7587016	0.6302636	0.0001152	0.0008924	0.0000600	-0.0002686	0.7044072	-0.3129041
736.	15.1025000	0.7640603	0.6225811	0.0000819	0.0008634	0.0000417	-0.0002797	0.6915194	-0.3323430
737.	15.1040000	0.7692161	0.6151063	0.0000017	0.0007493	0.0000699	-0.0002560	0.6780601	-0.3515130
738.	15.1055000	0.7741807	0.6073056	0.0001068	0.0007736	0.0000329	-0.0002470	0.6638228	-0.3702210
739.	15.1070000	0.7791014	0.5996908	0.0000046	0.0007344	0.0000401	-0.0002209	0.6490515	-0.3886901
740.	15.1085000	0.7838887	0.5918298	-0.0000611	0.0007889	0.0000219	-0.0002185	0.6337511	-0.4067513
741.	15.1100000	0.7886322	0.5839696	-0.0000058	0.0006001	0.0000163	-0.0001924	0.6177260	-0.4243437
742.	15.1115000	0.7932734	0.5761222	0.0000575	0.0006712	0.0000578	-0.0001756	0.6013359	-0.4415588
743.	15.1130000	0.7977771	0.5683250	0.0000763	0.0006468	0.0000343	-0.0001796	0.5841951	-0.4581937

744.	15.1145000	0.8020578	0.5605034	-0.0000375	0.0006089	0.0000242	-0.0001792	0.5666283	-0.4743525
745.	15.1160000	0.8063992	0.5527729	0.0000150	0.0006330	0.0000249	-0.0001652	0.5484380	-0.4901319
746.	15.1175000	0.8107018	0.5448776	0.0000279	0.0006041	0.0000181	-0.0001778	0.5297279	-0.5051880
747.	15.1190000	0.8147629	0.5369824	0.0000424	0.0004797	0.0000317	-0.0001943	0.5104774	-0.5197535
748.	15.1205000	0.8190014	0.5292904	-0.0000817	0.0004782	0.0000132	-0.0001973	0.4907682	-0.5338392
749.	15.1220000	0.8228953	0.5214734	0.0000069	0.0005247	0.0000074	-0.0001838	0.4704354	-0.5472645
750.	15.1235000	0.8266665	0.5134832	0.0000247	0.0005280	0.0000211	-0.0001708	0.4496352	-0.5602033
751.	15.1250000	0.8305560	0.5054951	0.0001511	0.0004916	0.0000124	-0.0001658	0.4285433	-0.5725213
752.	15.1265000	0.8342386	0.4974786	0.0001845	0.0005123	0.0000027	-0.0001800	0.4066733	-0.5841419
753.	15.1280000	0.8377700	0.4896120	0.0000942	0.0005243	-0.0000149	-0.0001756	0.3846147	-0.5949320
754.	15.1295000	0.8412383	0.4816028	0.0000778	0.0004744	-0.0000137	-0.0001457	0.3619719	-0.6052684
755.	15.1310000	0.8447032	0.4735798	0.0000979	0.0003849	-0.0000145	-0.0001423	0.3390306	-0.6149076
756.	15.1325000	0.8479456	0.4656802	0.0002205	0.0003917	0.0000036	-0.0001441	0.3155945	-0.6236727
757.	15.1340000	0.8512018	0.4576613	0.0001564	0.0003280	-0.0000235	-0.0001454	0.2916797	-0.6317897
758.	15.1355000	0.8543570	0.4496478	0.0000750	0.0003214	-0.0000226	-0.0001213	0.2674565	-0.6391815
759.	15.1370000	0.8573989	0.4416812	0.0000666	0.0003534	-0.0000106	-0.0001422	0.2428988	-0.6456210
760.	15.1385000	0.8603669	0.4336263	0.0001870	0.0003392	-0.0000451	-0.0001454	0.2181257	-0.6514018
761.	15.1400000	0.8632482	0.4256648	0.0001126	0.0003382	-0.0000090	-0.0001259	0.1928756	-0.6564306
762.	15.1415000	0.8661040	0.4176144	0.0000564	0.0002654	0.0000067	-0.0000871	0.1673956	-0.6605332
763.	15.1430000	0.8688244	0.4097233	0.0000426	0.0002959	-0.0000055	-0.0001006	0.1417202	-0.6639556
764.	15.1445000	0.8715308	0.4015827	-0.0000542	0.0003097	-0.0000186	-0.0000781	0.1156284	-0.6664848
765.	15.1460000	0.8740941	0.3935341	-0.0000881	0.0001890	-0.0000105	-0.0000981	0.0895639	-0.6681386
766.	15.1475000	0.8765380	0.3854876	0.0001346	0.0003071	-0.0000280	-0.0001078	0.0630915	-0.6687734
767.	15.1490000	0.8789079	0.3775367	0.0000866	0.0002453	-0.0000504	-0.0001225	0.0368322	-0.6688098
768.	15.1505000	0.8812138	0.3694676	0.0001069	0.0002883	-0.0000738	-0.0000862	0.0103231	-0.6677660
769.	15.1520000	0.8833950	0.3614249	0.0001780	0.0002781	-0.0000742	-0.0001189	-0.0162457	-0.6657795
770.	15.1535000	0.8856032	0.3533447	0.0002481	0.0003345	-0.0000636	-0.0001178	-0.0429648	-0.6627538
771.	15.1550000	0.8877092	0.3453723	0.0002961	0.0002005	-0.0001025	-0.0001004	-0.0696979	-0.6588493
772.	15.1565000	0.8895757	0.3374153	0.0003143	0.0002360	-0.0000527	-0.0001069	-0.0963205	-0.6539891
773.	15.1580000	0.8916019	0.3294154	0.0003711	0.0001695	-0.0000782	-0.0000791	-0.1228775	-0.6482774
774.	15.1595000	0.8933632	0.3214170	0.0002361	0.0002987	-0.0000912	-0.0001075	-0.1495035	-0.6415028
775.	15.1610000	0.8951559	0.3134563	0.0002959	0.0001585	-0.0000525	-0.0000509	-0.1760455	-0.6335980
776.	15.1625000	0.8968629	0.3054494	0.0001011	0.0001005	-0.0000361	-0.0000679	-0.2021984	-0.6248978
777.	15.1640000	0.8984181	0.2975268	0.0000933	0.0001334	-0.0000753	-0.0000759	-0.2281922	-0.6150596
778.	15.1655000	0.8998523	0.2895598	0.0002519	0.0001806	-0.0001105	-0.0000743	-0.2539581	-0.6043030
779.	15.1670000	0.9014370	0.2815967	0.0003794	0.0001496	-0.0001113	-0.0000680	-0.2792957	-0.5925913
780.	15.1685000	0.9028301	0.2735118	0.0003901	0.0001661	-0.0001014	-0.0000363	-0.3045204	-0.5798006
781.	15.1700000	0.9041765	0.2655543	0.0004759	0.0001234	-0.0000861	-0.0000471	-0.3292332	-0.5661076
782.	15.1715000	0.9053649	0.2575333	0.0004988	0.0000739	-0.0000882	-0.0000775	-0.3536357	-0.5513359
783.	15.1730000	0.9065433	0.2496314	0.0004150	0.0000748	-0.0000247	-0.0000548	-0.3775428	-0.5356691
784.	15.1745000	0.9076274	0.2416463	0.0004890	0.0000747	-0.0000294	-0.0000631	-0.4011637	-0.5190985
785.	15.1760000	0.9084690	0.2336368	0.0003855	0.0001171	-0.0000153	-0.0000589	-0.4239936	-0.5014300
786.	15.1775000	0.9094262	0.2256908	0.0002448	-0.0000109	0.0000057	-0.0000857	-0.4463516	-0.4829489
787.	15.1790000	0.9102769	0.2178624	0.0000571	-0.0000465	0.0000050	-0.0000901	-0.4680983	-0.4635190

788.	15.1805000	0.9109378	0.2099699	0.0000122	-0.0000038	0.0000099	-0.0000751	-0.4889115	-0.4434420
789.	15.1820000	0.9116141	0.2020459	-0.0000744	0.0000597	0.0000206	-0.0000830	-0.5092027	-0.4223311
790.	15.1835000	0.9122987	0.1941049	-0.0002169	0.0000191	0.0000139	-0.0000762	-0.5289299	-0.4002046
791.	15.1850000	0.9127604	0.1862389	-0.0002375	0.0000820	0.0000176	-0.0000756	-0.5477470	-0.3775404
792.	15.1865000	0.9132763	0.1784629	-0.0001738	0.0001327	-0.0000234	-0.0000816	-0.5656713	-0.3539850
793.	15.1880000	0.9136177	0.1706089	-0.0000522	0.0001275	-0.0000328	-0.0000569	-0.5828114	-0.3297346
794.	15.1895000	0.9140088	0.1628081	-0.0000173	0.0001213	-0.0000470	-0.0000442	-0.5989616	-0.3045118
795.	15.1910000	0.9143339	0.1550227	0.0000792	0.0001144	-0.0000717	-0.0000227	-0.6142218	-0.2787253
796.	15.1925000	0.9146557	0.1471804	0.0000531	0.0000783	-0.0000720	-0.0000052	-0.6283533	-0.2523688
797.	15.1940000	0.9147912	0.1393126	0.0001384	0.0001334	-0.0000809	-0.0000093	-0.6415103	-0.2252655
798.	15.1955000	0.9147759	0.1315402	0.0001129	0.0000315	-0.0000747	-0.0000108	-0.6536762	-0.1975965
799.	15.1970000	0.9147624	0.1237610	0.0001818	0.0001097	-0.0000771	-0.0000130	-0.6648926	-0.1694256
800.	15.1985000	0.9147345	0.1160631	0.0001093	0.0001533	-0.0000768	0.0000101	-0.6748764	-0.1408485
801.	15.2000000	0.9146162	0.1083288	0.0001480	0.0000371	-0.0000542	0.0000241	-0.6835114	-0.1115227
802.	15.2015000	0.9143865	0.1005827	0.0000066	0.0000268	-0.0000476	-0.0000017	-0.6912525	-0.0821459
803.	15.2030000	0.9141507	0.0928813	0.0000666	0.0000502	-0.0000334	0.0000017	-0.6978186	-0.0523371
804.	15.2045000	0.9137065	0.0852643	0.0001159	0.0000724	-0.0000516	-0.0000043	-0.7032956	-0.0221931
805.	15.2060000	0.9132690	0.0776616	0.0001079	0.0000925	-0.0000401	-0.0000014	-0.7075573	0.0079742
806.	15.2075000	0.9127520	0.0699552	0.0001807	0.0000095	-0.0000352	-0.0000146	-0.7106553	0.0384710
807.	15.2090000	0.9122459	0.0624444	0.0001769	0.0000147	-0.0000540	0.0000111	-0.7123673	0.0689162
808.	15.2105000	0.9115139	0.0548415	0.0001896	-0.0000176	-0.0000296	0.0000224	-0.7128739	0.0996589
809.	15.2120000	0.9108558	0.0473235	0.0001305	0.0000649	-0.0000352	0.0000389	-0.7122301	0.1303090
810.	15.2135000	0.9100746	0.0398455	0.0001104	-0.0000522	-0.0000201	0.0000047	-0.7102717	0.1608257
811.	15.2150000	0.9093052	0.0323863	0.0000638	-0.0000399	-0.0000599	0.0000312	-0.7072013	0.1913482
812.	15.2165000	0.9084395	0.0249340	0.0000237	-0.0000648	-0.0000511	0.0000249	-0.7029368	0.2216863
813.	15.2180000	0.9074003	0.0175590	0.0000980	-0.0000024	-0.0000437	-0.0000244	-0.6974019	0.2519939
814.	15.2195000	0.9063933	0.0102026	0.0000988	0.0000415	-0.0000420	0.0000063	-0.6905678	0.2816819
815.	15.2210000	0.9053578	0.0028184	0.0000362	-0.0000099	-0.0000208	0.0000269	-0.6827930	0.3113150
816.	15.2225000	0.9042280	-0.0046323	0.0000535	0.0000239	-0.0000321	0.0000015	-0.6736317	0.3404540
817.	15.2240000	0.9030232	-0.0118848	-0.0000291	0.0000339	-0.0000406	0.0000149	-0.6635450	0.3691362
818.	15.2255000	0.9018108	-0.0192420	0.0000972	0.0000404	-0.0000429	0.0000106	-0.6521307	0.3974219
819.	15.2270000	0.9005522	-0.0265432	0.0000430	0.0000393	-0.0000291	-0.0000079	-0.6395996	0.4251961
820.	15.2285000	0.8991880	-0.0337841	0.0000298	-0.0000188	-0.0000205	-0.0000348	-0.6259870	0.4523182
821.	15.2300000	0.8978015	-0.0410938	0.0000585	0.0000006	-0.0000496	-0.0000181	-0.6114201	0.4789334
822.	15.2315000	0.8962935	-0.0483408	0.0000904	-0.0000028	-0.0000145	-0.0000161	-0.5959550	0.5048300
823.	15.2330000	0.8947350	-0.0555607	0.0000543	0.0000458	-0.0000306	0.0000196	-0.5795609	0.5298596
824.	15.2345000	0.8932333	-0.0627529	0.0001027	-0.0000287	-0.0000372	0.0000169	-0.5622602	0.5540995
825.	15.2360000	0.8916529	-0.0699377	-0.0000073	0.0000471	-0.0000522	-0.0000417	-0.5439939	0.5779418
826.	15.2375000	0.8899429	-0.0770803	-0.0000568	0.0000581	-0.0000158	-0.0000091	-0.5249118	0.6007702
827.	15.2390000	0.8881910	-0.0841772	0.0000105	0.0000813	-0.0000346	0.0000134	-0.5050098	0.6228678
828.	15.2405000	0.8863702	-0.0913494	0.0000312	0.0001430	-0.0000272	0.0000131	-0.4844347	0.6438259
829.	15.2420000	0.8843896	-0.0984085	0.0000790	-0.0000268	-0.0000195	0.0000217	-0.4630772	0.6641147
830.	15.2435000	0.8825519	-0.1053998	-0.0000104	0.0000373	0.0000065	0.0000181	-0.4410125	0.6833422
831.	15.2450000	0.8806131	-0.1125137	0.0001017	0.0000199	-0.0000172	0.0000362	-0.4184060	0.7018068

832.	15.2465000	0.8786089	-0.1194845	0.0000481	0.0000395	-0.0000145	-0.0000101	-0.3951575	0.7191444
833.	15.2480000	0.8764598	-0.1264343	0.0000096	-0.0000293	0.0000117	0.0000122	-0.3713778	0.7356523
834.	15.2495000	0.8743809	-0.1335268	0.0000766	0.0000326	-0.0000070	0.0000337	-0.3472208	0.7513137
835.	15.2510000	0.8721111	-0.1404106	0.0000730	0.0000872	0.0000276	0.0000101	-0.3224792	0.7656659
836.	15.2525000	0.8698822	-0.1472986	0.0000262	-0.0000062	0.0000220	0.0000193	-0.2973350	0.7791866
837.	15.2540000	0.8676241	-0.1541747	0.0000151	0.0000284	0.0000051	0.0000123	-0.2717358	0.7917225
838.	15.2555000	0.8652920	-0.1610574	0.0000090	0.0000137	-0.0000217	-0.0000343	-0.2460176	0.8035169
839.	15.2570000	0.8629641	-0.1677943	-0.0000462	0.0000617	-0.0000068	-0.0000093	-0.2199551	0.8139305
840.	15.2585000	0.8604731	-0.1746295	0.0000005	0.0000048	-0.0000072	-0.0000111	-0.1936768	0.8234113
841.	15.2600000	0.8579127	-0.1813152	0.0000088	0.0000442	-0.0000090	-0.0000116	-0.1670586	0.8319146
842.	15.2615000	0.8554076	-0.1880939	0.0000817	0.0000336	0.0000001	0.0000330	-0.1403093	0.8395812
843.	15.2630000	0.8527902	-0.1947024	-0.0000099	0.0000246	-0.0000154	0.0000223	-0.1135310	0.8458697
844.	15.2645000	0.8501877	-0.2014108	-0.0000017	-0.0000749	0.0000217	0.0000208	-0.0866050	0.8512468
845.	15.2660000	0.8475333	-0.2080519	0.0000897	0.0000174	-0.0000160	-0.0000111	-0.0599476	0.8560070
846.	15.2675000	0.8448032	-0.2145970	0.0000613	0.0000005	-0.0000116	0.0000066	-0.0330331	0.8594034
847.	15.2690000	0.8419215	-0.2210762	0.0001601	0.0000338	-0.0000204	-0.0000019	-0.0061807	0.8620607
848.	15.2705000	0.8391047	-0.2277203	0.0000599	0.0000125	-0.0000161	-0.0000017	0.0206009	0.8637423
849.	15.2720000	0.8361946	-0.2341516	0.0000193	0.0000155	-0.0000320	0.0000126	0.0473561	0.8644391
850.	15.2735000	0.8332524	-0.2406382	0.0000962	-0.0001061	0.0000050	0.0000017	0.0737581	0.8642518
851.	15.2750000	0.8302608	-0.2470729	0.0000224	0.0000618	0.0000075	0.0000016	0.1001924	0.8629531
852.	15.2765000	0.8272333	-0.2535151	0.0000280	0.0000927	0.0000101	-0.0000244	0.1261730	0.8611171
853.	15.2780000	0.8241268	-0.2597969	-0.0000595	0.0000232	-0.0000094	0.0000070	0.1521605	0.8583523
854.	15.2795000	0.8209706	-0.2662318	0.0000489	0.0000868	0.0000148	0.0000151	0.1776303	0.8545455
855.	15.2810000	0.8177825	-0.2726352	0.0000023	0.0000388	-0.0000194	-0.0000149	0.2031927	0.8500508
856.	15.2825000	0.8146036	-0.2789429	0.0000407	0.0000737	-0.0000323	-0.0000347	0.2282513	0.8446560
857.	15.2840000	0.8114097	-0.2851512	0.0000453	-0.0000302	0.0000106	-0.0000266	0.2529216	0.8383334
858.	15.2855000	0.8080511	-0.2913410	0.0000865	0.0000443	0.0000015	-0.0000011	0.2773348	0.8313319
859.	15.2870000	0.8047346	-0.2975493	0.0001357	-0.0000525	0.0000072	-0.0000152	0.3012366	0.8236626
860.	15.2885000	0.8012444	-0.3036345	0.0000120	0.0000536	0.0000120	-0.0000082	0.3248388	0.8152318
861.	15.2900000	0.7977843	-0.3096677	0.0000712	0.0000660	0.0000112	-0.0000066	0.3480046	0.8060983
862.	15.2915000	0.7942891	-0.3158177	-0.0000316	-0.0000271	0.0000107	-0.0000041	0.3707175	0.7960789
863.	15.2930000	0.7907467	-0.3218637	0.0000854	-0.0000502	0.0000067	-0.0000004	0.3930001	0.7854004
864.	15.2945000	0.7872148	-0.3278612	0.0000332	-0.0000428	-0.0000049	-0.0000024	0.4147701	0.7744043
865.	15.2960000	0.7836773	-0.3338149	0.0000756	-0.0000232	0.0000377	-0.0000114	0.4360242	0.7626980
866.	15.2975000	0.7797715	-0.3396771	0.0001165	-0.0000441	0.0000107	-0.0000121	0.4568930	0.7501791
867.	15.2990000	0.7761567	-0.3456047	0.0000382	-0.0000547	0.0000113	-0.0000095	0.4773605	0.7373121
868.	15.3005000	0.7723862	-0.3512433	-0.0000638	-0.0001080	0.0000165	-0.0000159	0.4971744	0.7237572
869.	15.3020000	0.7685736	-0.3572563	0.0000901	-0.0001143	0.0000247	-0.0000146	0.5164374	0.7096284
870.	15.3035000	0.7647545	-0.3630133	0.0000894	-0.0000403	0.0000137	-0.0000116	0.5354460	0.6949855
871.	15.3050000	0.7609645	-0.3688753	0.0000074	-0.0000615	0.0000098	-0.0000228	0.5536910	0.6798955
872.	15.3065000	0.7570710	-0.3746432	-0.0000044	-0.0000154	0.0000425	-0.0000338	0.5715482	0.6645141
873.	15.3080000	0.7530724	-0.3800789	0.0000227	-0.0001311	0.0000041	0.0000013	0.5885316	0.6484692
874.	15.3095000	0.7490132	-0.3856975	-0.0000608	0.0000400	0.0000244	-0.0000475	0.6049863	0.6321939
875.	15.3110000	0.7449607	-0.3913474	-0.0001255	0.0000352	0.0000225	-0.0000042	0.6210159	0.6153333
Roșca Cosmina – Mihaela: Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi destinați achiziției și prelucrării parametrilor S cu aplicații în îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea din domeniul microundelor – Teză de doctorat

876.	15.3125000	0.7409967	-0.3969298	-0.0000090	0.0000514	0.0000081	-0.0000071	0.6364012	0.5980673
877.	15.3140000	0.7368990	-0.4024912	-0.0000414	0.0000680	0.0000255	-0.0000261	0.6511205	0.5804443
878.	15.3155000	0.7326943	-0.4079906	-0.0000306	0.0000518	0.0000257	0.0000174	0.6653587	0.5624866
879.	15.3170000	0.7284629	-0.4134005	-0.0000063	0.0000131	-0.0000057	0.0000268	0.6789632	0.5441819
880.	15.3185000	0.7242500	-0.4188345	0.0001038	0.0000025	-0.0000127	-0.0000132	0.6920069	0.5255992
881.	15.3200000	0.7199439	-0.4242218	-0.0000610	0.0000636	-0.0000216	0.0000134	0.7043027	0.5066711
882.	15.3215000	0.7157725	-0.4295928	-0.0000678	0.0000393	0.0000125	0.0000066	0.7161694	0.4875296
883.	15.3230000	0.7113872	-0.4348401	-0.0001219	0.0001862	-0.0000318	0.0000039	0.7272155	0.4683340
884.	15.3245000	0.7069410	-0.4401787	-0.0000999	0.0002118	-0.0000461	0.0000063	0.7377177	0.4486520
885.	15.3260000	0.7025606	-0.4453687	-0.0001462	0.0002188	-0.0000571	0.0000229	0.7476515	0.4289423
886.	15.3275000	0.6980651	-0.4504530	-0.0001657	0.0002186	-0.0000449	0.0000326	0.7570130	0.4088072
887.	15.3290000	0.6936308	-0.4556467	-0.0000237	0.0002422	0.0000006	0.0000162	0.7656492	0.3885394
888.	15.3305000	0.6890692	-0.4606861	0.0000581	0.0001776	0.0000060	0.0000439	0.7736800	0.3679945
889.	15.3320000	0.6844488	-0.4657127	0.0000588	0.0001183	0.0000137	0.0000125	0.7813238	0.3474479
890.	15.3335000	0.6798984	-0.4708276	0.0000840	0.0000307	-0.0000227	-0.0000072	0.7880856	0.3267062
891.	15.3350000	0.6752031	-0.4757552	0.0000261	-0.0000084	-0.0000322	-0.0000009	0.7943990	0.3059010
892.	15.3365000	0.6705626	-0.4805478	0.0000327	0.0000497	-0.0000173	-0.0000171	0.8001400	0.2848354
893.	15.3380000	0.6659558	-0.4854994	0.0000995	0.0000030	0.0000487	-0.0000338	0.8051309	0.2639259
894.	15.3395000	0.6613519	-0.4903721	0.0000857	0.0000516	0.0000433	-0.0000655	0.8097210	0.2428599
895.	15.3410000	0.6565512	-0.4952702	0.0000965	-0.0000785	0.0000349	-0.0000445	0.8135161	0.2215530
896.	15.3425000	0.6517778	-0.5001338	0.0001016	-0.0000941	-0.0000181	-0.0000528	0.8166575	0.2003343
897.	15.3440000	0.6468049	-0.5048458	0.0000444	-0.0000975	0.0000145	-0.0000200	0.8193347	0.1790899
898.	15.3455000	0.6419913	-0.5094897	0.0000011	0.0000091	-0.0000241	-0.0000238	0.8212653	0.1577757
899.	15.3470000	0.6371050	-0.5141563	0.0000922	0.0000501	0.0000079	-0.0000211	0.8226592	0.1366194
900.	15.3485000	0.6322430	-0.5188402	-0.0000084	0.0000366	-0.0000227	-0.0000235	0.8235507	0.1152816
901.	15.3500000	0.6271044	-0.5233210	0.0000270	0.0000233	-0.0000295	-0.0000169	0.8238699	0.0940862
902.	15.3515000	0.6221669	-0.5280156	0.0000972	0.0000509	-0.0000037	0.0000051	0.8236231	0.0727766
903.	15.3530000	0.6171629	-0.5324004	0.0000957	-0.0000643	-0.0000083	-0.0000165	0.8226931	0.0515924
904.	15.3545000	0.6122168	-0.5369211	0.0000685	0.0000041	-0.0000002	0.0000091	0.8211395	0.0304745
905.	15.3560000	0.6070161	-0.5413591	0.0000658	-0.0000564	0.0000187	0.0000102	0.8189865	0.0093585
906.	15.3575000	0.6019633	-0.5457731	0.0000259	0.0000175	-0.0000258	0.0000028	0.8163120	-0.0115873
907.	15.3590000	0.5967782	-0.5500374	-0.0000563	0.0000620	-0.0000064	0.0000270	0.8130637	-0.0324882
908.	15.3605000	0.5915627	-0.5542107	-0.0000580	0.0000527	-0.0000444	0.0000563	0.8094695	-0.0531737
909.	15.3620000	0.5864214	-0.5584469	-0.0000522	0.0001322	-0.0000287	0.0000725	0.8051570	-0.0738433
910.	15.3635000	0.5812373	-0.5627086	-0.0000985	0.0001799	-0.0000258	0.0000880	0.8001969	-0.0943794
911.	15.3650000	0.5759485	-0.5668367	-0.0001763	0.0002157	0.0000001	0.0000848	0.7948834	-0.1147712
912.	15.3665000	0.5707541	-0.5709942	-0.0000299	0.0001956	-0.0000316	0.0000755	0.7887859	-0.1350032
913.	15.3680000	0.5654002	-0.5750861	-0.0000670	0.0001813	-0.0000256	0.0000437	0.7823695	-0.1549468
914.	15.3695000	0.5601336	-0.5790157	0.0000762	0.0002274	0.0000016	0.0000222	0.7753828	-0.1748956
915.	15.3710000	0.5547564	-0.5832561	0.0000018	0.0001268	0.0000206	-0.0000170	0.7678355	-0.1945882
916.	15.3725000	0.5493144	-0.5871305	0.0000271	0.0000902	0.0000232	-0.0000399	0.7596973	-0.2141178
917.	15.3740000	0.5437724	-0.5911044	0.0001841	0.0000282	0.0000356	-0.0000697	0.7508600	-0.2334624
918.	15.3755000	0.5383428	-0.5949568	0.0001137	-0.0000426	-0.0000061	-0.0000349	0.7416677	-0.2523733
919.	15.3770000	0.5328786	-0.5987622	0.0000414	-0.0001769	-0.0000072	-0.0000390	0.7319983	-0.2712016

Roșca Cosmina – Mihaela: Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi destinați achiziției și prelucrării parametrilor S cu aplicații în îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea din domeniul microundelor – Teză de doctorat

920.	15.3785000	0.5273313	-0.6024987	-0.0000599	-0.0001086	0.0000236	-0.0000511	0.7217587	-0.2897139
921.	15.3800000	0.5218205	-0.6062607	0.0000360	-0.0000470	-0.0000002	-0.0000771	0.7109233	-0.3080440
922.	15.3815000	0.5162702	-0.6100022	0.0001081	-0.0001986	-0.0000186	-0.0000610	0.6996179	-0.3259637
923.	15.3830000	0.5106474	-0.6134881	0.0001016	-0.0002041	-0.0000153	-0.0000647	0.6878297	-0.3437096
924.	15.3845000	0.5051241	-0.6173130	0.0001067	-0.0003109	-0.0000184	-0.0000960	0.6755641	-0.3609515
925.	15.3860000	0.4994634	-0.6208578	0.0002189	-0.0002557	-0.0000188	-0.0000797	0.6627945	-0.3780710
926.	15.3875000	0.4938397	-0.6244263	0.0001069	-0.0002684	-0.0000234	-0.0000729	0.6495861	-0.3948450
927.	15.3890000	0.4881751	-0.6279430	-0.0000304	-0.0002402	-0.0000323	-0.0000149	0.6357399	-0.4112800
928.	15.3905000	0.4824392	-0.6314049	0.0000793	-0.0001782	-0.0000022	-0.0000119	0.6214011	-0.4271705
929.	15.3920000	0.4766166	-0.6346757	-0.0000625	-0.0002049	-0.0000173	-0.0000020	0.6066296	-0.4430147
930.	15.3935000	0.4709676	-0.6381519	-0.0000129	-0.0000389	0.0000035	0.0000176	0.5913411	-0.4582087
931.	15.3950000	0.4650325	-0.6412821	-0.0000551	0.0000085	0.0000106	0.0000351	0.5756475	-0.4731233
932.	15.3965000	0.5184330	-0.5940754	0.0000589	-0.0001550	-0.0000455	-0.0000286	0.6231164	-0.3984311
933.	15.3980000	0.4534588	-0.6477256	-0.0000514	0.0001158	-0.0000068	0.0000553	0.5430950	-0.5015393
934.	15.3995000	0.4477134	-0.6510047	-0.0000280	0.0000188	0.0000296	0.0000656	0.5262924	-0.5150757
935.	15.4010000	0.4418542	-0.6540278	-0.0001540	0.0000378	0.0000151	0.0000619	0.5093449	-0.5284988
936.	15.4025000	0.4360637	-0.6572006	0.0000253	0.0001346	0.0000287	0.0000990	0.4915623	-0.5411348
937.	15.4040000	0.4300321	-0.6601008	-0.0000551	0.0001126	0.0000284	0.0000666	0.4732956	-0.5532425
938.	15.4055000	0.4241775	-0.6631069	-0.0001386	0.0002225	0.0000340	0.0000455	0.4547227	-0.5650351
939.	15.4070000	0.4181677	-0.6659783	-0.0001492	0.0003036	0.0000056	0.0000562	0.4357570	-0.5762777
940.	15.4085000	0.4122124	-0.6688225	-0.0001382	0.0003401	0.0000452	0.0000418	0.4163470	-0.5869307
941.	15.4100000	0.4061454	-0.6715733	-0.0000642	0.0003387	0.0000050	0.0000249	0.3967632	-0.5972444
942.	15.4115000	0.4002749	-0.6744967	0.0000710	0.0000727	0.0000006	-0.0000218	0.3767584	-0.6067781
943.	15.4130000	0.3942064	-0.6772534	0.0002210	-0.0000376	-0.0000233	-0.0000507	0.3564431	-0.6159949
944.	15.4145000	0.3881852	-0.6799738	0.0002905	-0.0001306	-0.0000490	-0.0000580	0.3358536	-0.6244025
945.	15.4160000	0.3821676	-0.6825999	0.0000891	-0.0002185	-0.0000096	-0.0000069	0.3147987	-0.6323367
946.	15.4175000	0.3761175	-0.6851703	0.0000240	-0.0002146	-0.0000279	-0.0000153	0.2934601	-0.6396437
947.	15.4190000	0.3700477	-0.6877707	-0.0000069	-0.0000618	-0.0000011	0.0000005	0.2718247	-0.6464488
948.	15.4205000	0.3639506	-0.6902368	0.0000093	-0.0000666	-0.0000136	-0.0000224	0.2499508	-0.6524978
949.	15.4220000	0.3577736	-0.6926520	0.0000465	-0.0001052	-0.0000154	-0.0000258	0.2279374	-0.6580335
950.	15.4235000	0.3516219	-0.6949946	0.0000309	-0.0001463	-0.0000134	-0.0000119	0.2056591	-0.6629997
951.	15.4250000	0.3454690	-0.6973772	-0.0000223	-0.0000727	-0.0000114	-0.0000168	0.1830828	-0.6670268
952.	15.4265000	0.3393111	-0.6997943	-0.0000301	-0.0001289	-0.0000131	0.0000128	0.1602229	-0.6707042
953.	15.4280000	0.3332271	-0.7019573	-0.0000240	-0.0000670	0.0000001	-0.0000047	0.1373207	-0.6736430
954.	15.4295000	0.3270380	-0.7042192	-0.0000676	-0.0000982	-0.0000376	-0.0000332	0.1141319	-0.6758081
955.	15.4310000	0.3208709	-0.7063053	0.0000334	-0.0000520	-0.0000225	0.0000118	0.0908203	-0.6772391
956.	15.4325000	0.3147844	-0.7085374	0.0000009	-0.0001035	-0.0000217	-0.0000359	0.0675173	-0.6782639
957.	15.4340000	0.3084878	-0.7104953	-0.0001258	-0.0000898	-0.0000072	-0.0000217	0.0438997	-0.6782233
958.	15.4355000	0.3022892	-0.7125267	0.0000114	-0.0000898	-0.0000066	-0.0000257	0.0204895	-0.6778067
959.	15.4370000	0.2960839	-0.7144678	0.0000021	-0.0001294	0.0000077	-0.0000218	-0.0032489	-0.6765151
960.	15.4385000	0.2898494	-0.7163554	-0.0000033	-0.0001528	-0.0000044	-0.0000038	-0.0269806	-0.6743987
961.	15.4400000	0.2835401	-0.7182291	-0.0000679	-0.0001344	-0.0000084	-0.0000121	-0.0507887	-0.6716174
962.	15.4415000	0.2772207	-0.7200192	-0.0000702	-0.0001348	-0.0000249	0.0000010	-0.0746215	-0.6681359
963.	15.4430000	0.2710263	-0.7217734	0.0000269	-0.0001672	0.0000048	0.0000151	-0.0982561	-0.6639267

Roșca Cosmina – Mihaela: Contribuții privind dezvoltarea unor algoritmi destinați achiziției și prelucrării parametrilor S cu aplicații în îmbunătățirea performanțelor analizoarelor vectoriale de rețea din domeniul microundelor – Teză de doctorat

964.	15.4445000	0.2647055	-0.7236562	-0.0000217	-0.0001700	-0.0000015	-0.0000187	-0.1219801	-0.6586875
965.	15.4460000	0.2583421	-0.7252293	-0.0000686	-0.0000394	-0.0000098	-0.0000072	-0.1455101	-0.6528923
966.	15.4475000	0.2519441	-0.7267507	-0.0000941	-0.0001609	0.0000091	-0.0000052	-0.1691456	-0.6461865
967.	15.4490000	0.2456570	-0.7284690	-0.0000673	-0.0000095	0.0000145	-0.0000011	-0.1924966	-0.6389265
968.	15.4505000	0.2392315	-0.7301612	-0.0000681	-0.0000047	0.0000278	-0.0000119	-0.2156978	-0.6306064
969.	15.4520000	0.2328979	-0.7315700	-0.0000975	0.0000679	0.0000407	0.0000047	-0.2387460	-0.6217666
970.	15.4535000	0.2265498	-0.7329169	-0.0000780	0.0001417	0.0000722	-0.0000381	-0.2615909	-0.6118102
971.	15.4550000	0.2202030	-0.7342323	-0.0000293	0.0001039	0.0000432	-0.0000194	-0.2841685	-0.6014113
972.	15.4565000	0.2137668	-0.7356741	-0.0000368	0.0001980	0.0000437	0.0000175	-0.3066313	-0.5900857
973.	15.4580000	0.2073919	-0.7370009	0.0000599	0.0002165	0.0000828	0.0000085	-0.3287891	-0.5779663
974.	15.4595000	0.2010117	-0.7382547	0.0001405	0.0002049	0.0001013	-0.0000321	-0.3507279	-0.5649391
975.	15.4610000	0.1945731	-0.7393565	0.0002180	0.0002180	0.0000730	-0.0000511	-0.3721962	-0.5512115
976.	15.4625000	0.1882177	-0.7407114	0.0000970	0.0003955	0.0001059	-0.0000188	-0.3933012	-0.5368288
977.	15.4640000	0.1817390	-0.7416986	0.0000122	0.0004213	0.0000742	0.0000020	-0.4139961	-0.5216663
978.	15.4655000	0.1753507	-0.7428823	0.0000395	0.0004838	0.0000962	-0.0000283	-0.4343182	-0.5057794
979.	15.4670000	0.1688522	-0.7438078	0.0000428	0.0006222	0.0000787	0.0000080	-0.4542153	-0.4891069
980.	15.4685000	0.1623030	-0.7447081	0.0000696	0.0004937	0.0000338	-0.0000299	-0.4734619	-0.4717499
981.	15.4700000	0.1559158	-0.7456830	0.0001066	0.0003754	-0.0000044	0.0000182	-0.4922138	-0.4537479
982.	15.4715000	0.1495072	-0.7465741	0.0001769	0.0002749	-0.0000634	0.0000226	-0.5103849	-0.4350770
983.	15.4730000	0.1430632	-0.7474215	0.0001485	0.0000846	-0.0001070	0.0000159	-0.5279663	-0.4155211
984.	15.4745000	0.1365077	-0.7481632	0.0000521	-0.0000227	-0.0000661	0.0000236	-0.5449119	-0.3954558
985.	15.4760000	0.1301297	-0.7489610	0.0000099	-0.0001421	-0.0000756	0.0000480	-0.5613095	-0.3744848
986.	15.4775000	0.1235406	-0.7495727	-0.0000463	-0.0002208	-0.0000783	0.0000534	-0.5768892	-0.3531753
987.	15.4790000	0.1171627	-0.7502485	-0.0001337	-0.0001009	-0.0000660	0.0000419	-0.5918746	-0.3312462
988.	15.4805000	0.1107366	-0.7509921	-0.0001030	-0.0001367	-0.0000399	0.0000382	-0.6060915	-0.3087851
989.	15.4820000	0.1042249	-0.7513700	-0.0001865	-0.0000945	-0.0000240	0.0000598	-0.6195722	-0.2856349
990.	15.4835000	0.0977784	-0.7518318	-0.0000827	-0.0000449	-0.0000195	0.0000538	-0.6322634	-0.2618689
991.	15.4850000	0.0913190	-0.7524079	0.0000220	-0.0000845	-0.0000242	0.0000242	-0.6442558	-0.2377938
992.	15.4865000	0.0847700	-0.7528400	-0.0000011	-0.0000992	0.0000242	0.0000165	-0.6553872	-0.2131581
993.	15.4880000	0.0782477	-0.7531365	0.0000049	0.0000027	-0.0000092	0.0000094	-0.6656839	-0.1881451
994.	15.4895000	0.0718499	-0.7535153	0.0000295	-0.0000214	-0.0000082	0.0000193	-0.6750343	-0.1625425
995.	15.4910000	0.0654432	-0.7536733	0.0000829	-0.0000812	-0.0000154	0.0000502	-0.6835827	-0.1366479
996.	15.4925000	0.0588474	-0.7540236	-0.0001165	-0.0001428	-0.0000201	0.0000346	-0.6910966	-0.1104500
997.	15.4940000	0.0524405	-0.7541286	0.0000275	-0.0001869	-0.0000427	0.0000220	-0.6978801	-0.0838129
998.	15.4955000	0.0459385	-0.7542983	0.0000017	-0.0001878	-0.0000290	0.0000668	-0.7035889	-0.0570739
999.	15.4970000	0.0394894	-0.7542336	-0.0000316	-0.0002500	0.0000049	0.0000309	-0.7085438	-0.0300627
1000.	15.4985000	0.0329649	-0.7543459	-0.0000865	-0.0002067	0.0000316	0.0000412	-0.7124391	-0.0028997
1001.	15.5000000	0.0263655	-0.7539397	0.0000771	-0.0002642	0.0000113	0.0000175	-0.7152448	0.0245226