



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava

Facultatea de Inginerie
Electrică și Știința
Calculatoarelor

TEZĂ DE DOCTORAT

DOMENIUL: INGINERIE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII
ȘI TEHNOLOGII INFORMAȚIONALE

Contribuții la dezvoltarea și controlul rețelelor de antene fazate pentru comunicații satelitare

REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. univ. dr. Mihai DIMIAN

DOCTORAND:

Ion-Cezar ADOMNIȚEI

SUCEAVA, 2024



UNIUNEA EUROPEANĂ



Instituția Organizatoare de Studii Universitare de Doctorat
Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava

Școala doctorală de științe aplicate și ingineriești

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman
2014 - 2020

Contribuții la dezvoltarea și controlul rețelelor de antene fazate pentru comunicații satelitare

Doctorand

Ion-Cezar ADOMNIȚEI

Conducător de doctorat

Prof. univ. dr. Mihai DIMIAN

Această lucrare a beneficiat de sprijin financiar parțial prin proiectul
„Dezvoltare prin educație antreprenorială și cercetare inovativă
doctorală și postdoctorală - DECIDE”

Contract nr.: 45649/20.06.2019 POCU/380/6/13 - Cod SMIS 2014+: 125031

Suceava
2024



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava



INSTITUTUL DE
ECONOMIE NAȚIONALĂ



MULȚUMIRI

Doresc să îmi exprim profunda mea recunoștință și sincerele mulțumiri coordonatorului meu științific, domnului Profesor universitar dr. Mihai DIMIAN, pentru îndrumarea atentă, supravegherea, sprijinul logistic și susținerea morală pe parcursul activităților de cercetare și elaborare a prezentei teze de doctorat .

Sincere mulțumiri adresez membrilor comisiei de îndrumare, Profesor universitar dr.ing. Laurențiu-Dan MILICI, Șef lucrări dr. ing. Marius PRELIPCEANU și Șef lucrări dr. ing. Alexandru LAVRIC pentru efortul depus în analiza tezei de doctorat și recomandările oferite, care au contribuit la îmbunătățirea calității acesteia.

Mulțumesc dr. ing. Cezar-Eduard LEȘANU și dr.ing. Adrian DONE pentru colaborarea strânsă, suportul tehnic, sfaturile constructive și sprijinul moral acordat pe tot parcursul cercetării efectuate pentru realizarea acestei teze. De asemenea, doresc să îmi exprim aprecierea față de Conf. univ. dr. ing. Eugen COCA și ing. Lucian SPETCU pentru colaborarea dumnealor în anumite activități de cercetare realizate în cadrul tezei.

Mulțumesc colegilor din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava pentru spiritul comunicativ, sfaturile utile și încurajările în demersul activităților de cercetare specifice domeniului abordat în această teză.

Îmi exprim recunoștința față de familia mea pentru susținerea morală și încurajările atât de necesare în unele momente mai dificile din toată perioada studiilor universitare de doctorat.

De asemenea, doresc să aduc mulțumiri pentru sprijinul financiar și resursele oferite de Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava prin intermediul proiectelor:

1. Proiect PNIII, „Excelență în cercetare avansată, leadership în inovare și brevetare pentru dezvoltarea universității și regiunii” (EXCALIBUR), Programul 1 - Dezvoltarea sistemului național de cercetare-dezvoltare, Subprogramul 1.2 - Performanță instituțională - proiect de finanțare a excelenței în CDI, Contract de finanțare nr. 18PFE din 16.10.2018, contract nr. 18PFE/16.10.2018. Perioada 03.2019 – 12.2020, ID 392.
2. Proiect POCU, „Dezvoltare prin educație antreprenorială și cercetare inovativă doctorală și postdoctorală”, (DECIDE), Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman 2014-2020, contract de finanțare: 45649/20.06.2019, Apel nr. POCU/380/6/13 - “Sprijin pentru doctoranzi și cercetători postdoctorat” - cod proiect SMIS 2014+: 125031, seria a II-a, perioada de implementare a proiectului: 21 iunie 2019 – 20 aprilie 2023.
3. Proiect FDI, „Proiect de susținere a excelenței în domeniul cercetării interdisciplinare la USV”, finanțat de Consiliul Național pentru Finanțarea Învățământului Superior din România, CNFIS, cod proiect: CNFIS-FDI-2023-F-0579.

CUPRINS

LISTA DE ABREVIERI.....	ix
LISTA DE FIGURI.....	xi
LISTA DE TABELE.....	xii
INTRODUCERE	1
CAPITOLUL I ANTENE ȘI REȚELE DE ANTENE FAZATE	5
I.1. Parametrii specifici ai antenelor	5
I.2. Introducere în rețele de antene fazate.....	6
I.3. Analiza unor antene utilizabile în rețele de antene fazate	10
I.4. Concluzii.....	12
CAPITOLUL II SIMULAREA DIAGRAMELOR DE RADIAȚIE PENTRU REȚELE DE ANTENE FAZATE	13
II.1. Analiza rețelelor de antene fazate liniare uniforme	14
II.2. Analiza rețelelor fazate planare uniforme.....	17
II.3. Analiza rețelei de antene fazate circulare uniforme cu 8 elemente	19
II.4. Concluzii	20
CAPITOLUL III REȚEA DE ANTENE FAZATE CU 2 ELEMENTE $3\lambda/4$	21
III.1. Analiza rețelei de antene cu 2 elemente $3\lambda/4$ nedefazate	21
III.2. Realizarea practică a rețelei de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.....	23
III.3. Analiza efectului defazajelor între semnalele de alimentare ale elementelor rețelei de antene asupra caracteristicilor de directivitate.....	27
III.4. Concluzii	31
CAPITOLUL IV REȚEA DE ANTENE FAZATE CU 4 ELEMENTE PENTRU COMUNICAȚII SATELITARE LEO.....	33
IV.1. Realizarea practică a rețelei planare de antene fazate cu 4 elemente pe plan de masă.....	33
IV.2. Analiza experimentală a diagramelor de radiație ale rețelei propuse.....	37
IV.3. Concluzii.....	44
CAPITOLUL V CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PRINCIPALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE	45
BIBLIOGRAFIE.....	53

LISTA DE ABREVIERI

AM	Amplitude Modulation (Modulație în amplitudine)
AUT	Array Under Test (Rețea de antene supusă testării)
CDMA	Code Division Multiple Access (Acces multiplu prin diviziune de cod)
CSI	Channel State Information (informații despre starea canalului)
CW	Continous Wave (Undă nemodulată)
DAC	Digital to Analog Converter (Convertor digital – analogic)
DAQ	Data Aquisition Interface (Interfață pentru achiziție de date)
dB	Decibeli
dBi	Decibeli relativ la antena izotropică
DoA	Direction-of-Arrival (direcție de sosire)
DSP	Digital Signal Processing (Procesarea digitală a semnalelor)
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial (Televiziune digitală terestră)
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (Estimarea parametrilor de semnal prin tehnica de invarianță rotațională)
F/B	Front to Back ratio (Raportul față – spate)
FDMA	Frequency Division Multiple Access (Acces multiplu cu diviziune în frecvență)
FET	Field Effect Tranzistor
FM	Frequency Modulation (Modulație în frecvență)
FNBW	First-Null Beam Width (deschiderea unghiulară dintre primele nuluri adiacente lobului principal)
FSLBW	First Side Lobe Beam Width (deschiderea unghiulară a celui mai mare lob lateral)
GEO	Geostationary Earth Orbit (Orbita Geostaționară a Pământului)
GND	Ground (Împământare, masă)
GPS	Global Positioning System (Sistem de poziționare globală)
GSM	Global System for Mobile Communications (Sistem global pentru comunicații mobile)
HFSS	High Frequency Structure Simulator (Simulator de structură de înaltă frecvență)
HPBW	Half-Power Beamwidth (deschiderea unghiulară a lobului corespunzător jumătății din puterea radiată)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institutul Inginerilor Electricieni și Electroniști)
ILSP-CMA	Iterative Least Squares Projection Based Constant Modulus Algorithm - ILSP-CMA (algoritmul iterativ al modulului constant bazat pe proiecția celor mai mici pătrate)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Științific și Medical)
LEO	Low Earth Orbit (Orbita joasă a Pământului)
LoRAN	Long Range Navigation (Sistem de radionavigație pentru distanțe mari)
LMR	Land Mobile Radio (Sistemul radio al serviciului mobil terestru)
LSCMA	Least Square Constant Modulus Algorithm (algoritmul modulului constant al celor mai mici pătrate)
MEMS	Microelectromechanical systems (Sisteme microelectromecanice)

MEO	Medium Earth Orbit (Orbita Medie a Pământului)
MIMO	Multiple-input and Multiple-output (Ieșiri și intrări multiple)
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuits (Circuite monolitice pentru microunde)
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification (Clasificarea semnalelor multiple)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PWM	Pulse Width Modulation (Modularea lățimii impulsului)
ROSA	Romanian Space Agency (Agenția Spațială Română)
RTL-SDR	Realtek Software Defined Radio SATCOMM Satellite Communications (Comunicații satelitare)
SDI	Serial Data Input (Intrare serială de date)
SDMA	Space Division Multiple Acces (Acces multiplu cu diviziune spațială)
SFIR	Spatial Filtering for Interference Reduction (Filtrare spațială pentru reducerea interferențelor)
SLL	Side Lobe Level (nivelul lobilor laterali, exprimat în dB)
SNIR	Signal-to-interference-plus-noise ratio (Raportul semnal-zgomot plus interferență)
SNoI	Signal Not of Interest (semnal neinteresant, nedorit)
SNR	Signal - to - Noise Ratio (Raporul semnal – zgomot)
SoI	Signal of Interest (semnal de interes)
SWR	Standing Wave Ratio (raport de unde staționare)
TCXO	Thermo Compensated Quartz Crystal Oscillator (Oscilator cu cristal de cuarț, termocompensat)
TDMA	Time Division Multiple Acces (Acces multiplu prin diviziune în timp)
VGA	Variable Gain Amplifier (amplificator cu câștig variabil)
VNA	Vector Network Analyzer (Analizor vectorial de rețea)
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Raportul de unde staționare în tensiune)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access (Protocol pentru acces fix sau mobil la Internet)
WLAN	Wireless Local-Area Network (Rețea locală fără fir)

LISTA DE FIGURI

Figura I-1 Sistem de antene cu lobi comutabili. Ilustrarea modului de direcționare limitat al lobilor și elementele constitutive esențiale (prelucrare după [35]).	7
Figura I-2 Sistem de antene adaptive. Ilustrarea modului de direcționare al lobilor și elementele constitutive esențiale (prelucrare după [35]).	7
Figura II-1 Reprezentarea în planul xOy a unei rețele de antene fazate liniare uniforme cu 2 elemente.	14
Figura II-2 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) pentru $\varphi_0 = 0^\circ, 30^\circ$ și 90° pentru o rețea de antene fazate liniare uniforme.	14
Figura II-3 Caracteristica de directivitate tridimensională a rețelei de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.	15
Figura II-4 Rețea de antene liniară uniformă cu 4 elemente monopol în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, proiectată cu MMANA-GAL.	15
Figura II-5 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) corespunzătoare unghiurilor de orientare de $0^\circ, 45^\circ$ și 90° pentru o rețea liniară uniformă cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.	16
Figura II-6 Caracteristica de directivitate tridimensională a rețelei de antene liniare uniforme cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.	16
Figura II-7 HPBW (a) și câștigul (b) pentru $\varphi_0 = 0^\circ$, funcție de numărul de elemente al rețelelor de antene liniare uniforme în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.	17
Figura II-8 Rețea planară uniformă cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, simulată cu MMANA-GAL.	17
Figura II-9 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) corespunzătoare unghiurilor de orientare $0^\circ, 45^\circ$ și 90° pentru rețeaua de antene cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.	18
Figura II-10 Caracteristica de directivitate a rețelei de antene planare uniforme cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.	18
Figura II-11 Comparație între lățimile lobilor specifici rețelelor de antene planare uniforme cu 4, 9 respectiv 16 elemente radiante în configurație $3/4$ pe plan de masă pentru unghiul de orientare în planul azimutal de 0° .	19
Figura II-12 HPBW (a) și câștigul (b) pentru $\varphi_0 = 0^\circ$, funcție de numărul de elemente al rețelelor de antene planare uniforme în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.	19
Figura III-1 Rețea de antene cu 2 elemente $3/\lambda 4$ pe plan de masă, pregătită pentru măsurători.	22
Figura III-2 Configurație pentru evaluarea diagramei de radiație a rețelei de antene în mediul exterior.	22
Figura III-3 Comparație între câștigul simulat și câștigul măsurat și normalizat al rețelei pentru unghiurile de elevație de 30° respectiv 45° , precum și pentru cele patru unghiuri în plan orizontal asociate fiecărei din cele 2 elevații.	23
Figura III-4 Vedere de deasupra planului de masă, adaptat la sistemul mecanic al echipamentului "LabVolt". Ca elemente radiante au fost utilizate antene telescopice.	24
Figura III-5 Rețeaua de antene fazate pregătită pentru măsurarea caracteristicii de directivitate. Vedere de pe suprafața planului de masă, opusă celei pe care sunt fixate elementele.	24
Figura III-6 Modulul de comandă pentru defazoarele cu AD8340. Se pot observa cablul-panglică pentru programarea defazoarelor (a). Configurație pentru testări preliminare ale modulului și defazoarelor (b).	25

Figura III-7 Ilustrarea schematică a modalității de comandă a unui modulator vectorial AD8340. În stânga se poate observa schema simplificată a porțiunii de defazare din circuitul AD8340 (prelucrare după [77]).	26
Figura III-8 Ilustrarea modului de comandă a două defazoare. Datele seriale (SDI) și semnalul de ceas (SCLK) sunt furnizate pe aceeași magistrală, iar defazorul PSi în care sunt introduse datele este selectat la tranziția sus - jos a semnalului CSi ($i = 1, 2$).	26
Figura III-9 Diagrama logică simplificată a funcționării software-ului de comandă a unui defazor. În cazul utilizării mai multor defazoare în cadrul rețelelor de antene, fiecare se programează urmând această diagramă.	27
Figura III-10 Testarea diverselor poziții ale antenei de recepție Yagi-Uda relative la rețeaua de antene testată, în cadrul măsurătorilor caracteristicilor de directivitate.	28
Figura III-11 Caracteristicile de directivitate simulate (a - h) și măsurate (i - p) ale rețelei de antene cu două elemente defazate în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru diferite defazaje dintre semnalele de alimentare ale elementelor.	31
Figura IV-1 Rețeaua de antene pătratică cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, care reprezintă partea radiantă a rețelei de antene fazate.	33
Figura IV-2 Configurația utilizată pentru măsurarea parametrilor electrici ai rețelei de antene pătratice cu patru elemente (partea radiantă a rețelei de antene fazate) în timpul procesului de reglare fină a lungimilor elementelor pentru frecvența de rezonanță a rețelei de antene de aproximativ 436,5 MHz.	34
Figura IV-3 Rezultatele măsurătorii VSWR după acordarea fină a rețelei de antene propuse la frecvența de rezonanță de aproximativ 436,5 MHz.	35
Figura IV-4 Partea hardware a rețelei de antene fazate. Componentele pasive și cele electronice au fost fixate pe planul de masă, în partea opusă celei care conține elementele radiante.	36
Figura IV-5 Imagine mărită a modului de control al orientării lobului principal de radiație al rețelei de antene fazate propuse.	36
Figura IV-6 Configurația de laborator pentru măsurarea diagramelor de radiație ale rețelei de antene propuse. Raportorul a fost folosit pentru fixarea antenei Yagi-Uda la aproximativ 42° elevație față de centrul rețelei.	37
Figura IV-7. Configurația de măsurare instalată în camera semi-anecoică a laboratorului de compatibilitate electromagnetică din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava.	38
Figura IV-8 Diagramele de radiație simulate (stânga) și măsurate (dreapta) ale rețelei de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.	41
Figura IV-9 Reprezentare schematică a unui sistem de recepție a sateliților LEO, în care s-a integrat rețeaua de antene fazate.	44

LISTA DE TABELE

Tabelul II-1 Parametrii obținuți prin simularea rețelelor de antene cu 2 elemente $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopoli repliați.	13
Tabelul II-2 Parametrii obținuți prin simulare asupra rețelelor de antene cu 4 elemente radiante în configurație $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopol repliate (Hairpin)	13
Tabelul III-1 Nivelurile semnalelor furnizate de RTL-SDR și prelucrate de SDRSharp (exprimate în dBFS) în urma recepției semnalului emis de rețeaua de antene (a) și valorile (dB) rezultate după normalizarea la 0 dB (b).	22
Tabelul IV-1 Valorile HPBW și F/B rezultate din diagramele de radiație simulate, respectiv măsurate, corespunzătoare diferitelor unghiuri de orientare în planul azimutal, ale lobului principal al rețelei propuse.	42

INTRODUCERE

Spre deosebire de o antenă individuală, care odată proiectată pentru o aplicație specifică prezintă o directivitate fixă, caracteristica de directivitate a rețelei de antene se poate controla, utilizând diverse tehnici [1]. Mai mult decât atât, circuitele care interconectează antenele pot conține componente cu anumiți parametri, variabili în timp, astfel încât cu o rețea de antene poate fi generată o diagramă de radiație modificabilă în timp. În cazul în care sursele de excitație ale elementelor rețelei sunt menținute fixe în spațiu dar faza semnalelor generate de acestea este controlată electronic, fasciculul de unde emis sau recepționat de sistem poate fi orientat foarte rapid fără necesitatea mișcării antenelor inteligente [2]. Astfel de rețele de antene sunt denumite în mod obișnuit „rețele de antene fazate”, iar în cazul în care sunt integrate și elemente de control inteligent se denumesc de rețele de antene inteligente [3], [4], [5]. În telecomunicații, utilizarea unor asemenea rețele de antene a avut un succes semnificativ datorită capacității acestora de a permite orientarea controlată a maximului radiației generate sau recepționate, spre o direcție dorită. Totodată, se pot orienta minimele radiației generate înspre direcții de proveniență a unor perturbații, în scopul de a îmbunătăți raportul semnal-zgomot (SNR – Signal-to-Noise Ratio) la recepție. De asemenea, aceste rețele de antene au aplicații și în localizare și radiodetectie [1], [5], [6]. Implementarea rețelelor de antene fazate a crescut cu mult eficiența radiotelescoapelor utilizate în radioastronomie [7]. Flexibilitatea de scanare a acestora este utilizată în mod profitabil în RADAR pentru a obține performanțe sporite de detectare și estimare a parametrilor pentru un anumit nivel de putere. Comunicațiile satelitare și mobile moderne integrează ca elemente de bază rețele de antene fazate [8].

Domeniul comunicațiilor satelitare, de interes pentru aplicațiile cercetărilor și dezvoltărilor experimentale din această teză, joacă un rol esențial în telecomunicațiile globale, cu o piață estimată a atinge 190 de miliarde de dolari până în 2031 [9]. În particular, constelațiile satelitare de orbită joasă (LEO – Low earth Orbit) aduc câteva avantaje distincte care pot compensa dezavantajele comunicațiilor ce utilizează sateliți de orbită medie (MEO – Medium Earth Orbit) sau geostaționari (GEO – Geostationary Earth Orbit) [10], cum ar fi: latența redusă, acoperire globală îmbunătățită, flexibilitate, scalabilitate, imunitate superioară la interferențe și altele. În plus, cerințele pentru rate de transfer de date mai mari și o acoperire globală mai rapidă și eficientă au convins câteva din marile companii să investească în dezvoltarea constelațiilor de sateliți LEO, oferind astfel clienților servicii rapide și sigure de comunicații, internet de mare viteză (inclusiv în zone rurale sau izolate), monitorizarea terestră de la distanță, etc. Companii ca Amazon (prin proiectul Kuiper [11]), OneWeb (Oneweb Network Access Associates Limited - Londra [12]), SpaceX (prin constelația Starlink [13]), China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC) [14] (prin constelația Hongyan), precum și alte mari companii au investit semnificativ în dezvoltarea și lansarea de sateliți LEO. Benzile de frecvență utilizate de constelațiile LEO încep de la VHF (foarte înaltă frecvență: între 30 MHz și 300 MHz) și UHF (ultra înaltă frecvență: între 300 MHz și 3GHz), continuând cu banda Ku (12 - 18 GHz), banda Ka (26,5-40 GHz) și banda V (40-75 GHz). Alegerea acestor benzi depinde de tehnologiile și obiectivele specifice fiecărei constelații LEO.

Banda UHF între 435-438 MHz oferă caracteristici și avantaje care o fac potrivită pentru anumite aplicații și servicii [15], [16]. Printre acestea, comunicațiile cu sateliții CubeSat [17] (dimensiune specifică și standard de construcție pentru sateliți de mici dimensiuni), picosateliți [18] și alți sateliți mici permit servicii de monitorizare a mediului, recepția de imagini, recepția de date de la senzori amplasați pe satelit sau date colectate de rețele de senzori amplasați pe Pământ, care transmit datele către satelit într-o anumită bandă de frecvență. Pentru retransmiterea datelor de către satelit spre Pământ se utilizează inclusiv banda (435 – 438) MHz. Toate aceste date sunt utile în scopuri de cercetare.

În România, Institutul de Științe Spațiale (ISS) a lansat, împreună cu Universitatea din București și cu Universitatea Politehnică din București, primul satelit românesc în anul 2012, numit Goliat, din categoria CubeSat. Din păcate, acesta a transmis foarte scurt timp după lansare, fiind recepționat în SUA, nu și în România. La Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava (USV), în acel moment, funcționa singurul receptor online WebSDR din România care avea capacitatea de recepție în banda de 435 MHz și compensarea efectului Doppler, receptor care a fost pus la dispoziția realizatorilor, pentru monitorizarea permanentă a benzii de frecvență respective. În anul 2022, Centrul Național de Tehnologii Spațiale din cadrul Universității Tehnice a Moldovei a lansat primul satelit moldovenesc, numit Tumnanosat, din categoria CubeSat. Acesta a transmis date telemetrice doar în ziua lansării. O parte din testele necesare pentru calificarea pentru lansare au fost efectuate în România, la ISS București.

În prezent, pentru recepția automată permanentă a sateliților LEO există o serie de rețele globale de radioreceptoare interconectate via Internet, care facilitează accesul constructorilor acestor sateliți, la datele telemetrice și experimentale. Dintre acestea merită de menționat proiectul SatNOGS (SDR-based Satellite Networked Open Ground Station), lansat inițial în cadrul NASA SpaceApps Challenge în 2014 și devenit ulterior un proiect al Fundației Spațiului Liber [19], [20]. Acesta a fost conceput ca un proiect participativ open-source, în cadrul căruia s-a ajuns la implementarea a mai mult de 200 de stații de sol pentru comunicații satelitare. De asemenea, TinyGS [21] este o altă rețea open-source de stații de sol distribuite pe plan mondial pentru recepția sateliților LEO, inclusiv a celor ce utilizează protocolul LoRA (Long Range) pentru transmisia semnalelor [22]. Ambele proiecte oferă platforme software open-source pentru a recepționa date de la sateliți. Câteva mii de sateliți din categoria CubeSat au fost lansați până în prezent, iar alții urmează a fi lansați în viitorul apropiat. Informații despre starea acestora se pot găsi accesând cea mai mare bază de date care conține informații despre nanosateliți, incluzând aproximativ 4100 sateliți de tip CubeSat și nanoSat [23].

Pentru recepția semnalelor transmise de sateliții LEO în banda de frecvență 435-438 MHz sunt utilizate mai multe tipuri de antene, inclusiv de tip Yagi-Uda, Helix, patch. Dintre acestea, antenele Yagi-Uda [24] sunt deseori preferate datorită directivității și câștigului superioare, cu mențiunea că directivitatea este fixă, stabilită prin proiectare. Pentru a asigura o acoperire radio extinsă, esențială pentru urmărirea sateliților LEO și îmbunătățirea calității recepției acestora, reorientarea diagramei de radiație s-a realizat prin reorientarea fizică a antenelor cu ajutorul unor sisteme mecanice, precum rotoarele de antenă. Totuși, aceste sisteme mecanice au dezavantajul uzurii rapide și necesită activități frecvente de întreținere. Pentru a elimina aceste neajunsuri, dezvoltarea rețelelor de antene făcute pentru stații de sol asociate comunicațiilor satelitare LEO este un subiect de mare actualitate, fiind explorate și testate diverse concepte și versiuni de rețele de antene făcute. Spre exemplu, în cadrul proiectului SatNOGS amintit anterior, unul dintre principalele obiective viitoare este înlocuirea antenelor bazate pe rotoare cu rețele de antene făcute cu 4 elemente helix (elicooidale, având polarizare circulară) pentru rețelele de stații de sol folosite la recepția sateliților LEO. O altă abordare îi aparține lui Pieter Ibelings [25], care a optat pentru utilizarea liniilor de întârziere pentru realizarea defazajelor în cadrul diferitelor tipuri de rețele de antene făcute pe care le-a realizat și testat, folosind tipuri de elemente precum antene Turnstile și Patch cu polarizare circulară. Această soluție are dezavantajul unei rezoluții unghiulare reduse și o complexitate crescută a rețelelor de linii de întârziere, chiar dacă necesarul de putere de calcul pentru controlul acestora este relativ scăzut. Un alt exemplu este oferit de Proiectul KrakenSDR [26], în care Mark Jessop abordează noile tehnologii bazate pe receptoare SDR coerente pentru controlul directivității rețelelor de antene. Această abordare oferă o rezoluție unghiulară ridicată și posibilitatea urmării simultane a mai multor sateliți, dar necesită puteri mai mari de procesare și o complexitate ridicată a întregului sistem, ceea ce conduce și la apariția de latențe semnificative ale semnalelor.

Pentru a îmbunătăți performanțele comunicațiilor satelitare LEO este importantă și alegerea adecvată a antenelor de recepție sau emisie, sub aspectul caracteristicii de directivitate. Sateliții LEO orbitează la distanțe cuprinse în intervalul de aproximativ (150 - 2000) km față de Pământ, iar rotația completă în jurul Pământului durează în jur de 90 minute. Din cauza vitezelor orbitale mari, estimată la aproximativ 7,5 km/s, intervalul de timp în care satelitul LEO este vizibil direct pentru un observator terestru fix (stație de sol cu operator uman sau automată) este de aproximativ 15 minute. La elevații mari ($70^\circ - 90^\circ$) numărul de treceri ale sateliților LEO este mic, la fel și durata acestor treceri, iar efectele Doppler sunt resimțite mult mai puternic datorită vitezelor orbitale maxime atinse în parcursul unei orbite. La elevații joase, între aproximativ 0° și 25° , durata trecerii sateliților LEO este relativ mare, dar și distanțele dintre aceștia și observatorul fix sunt mari, conducând la denaturări ale semnalului radio provocate de atenuare, interferențe și reflexii. Intervalul unghiurilor de elevație medie oferă un echilibru între o bună vizibilitate radio a acestor sateliți și distanța lor deasupra orizontului, iar sateliții LEO se află în zona elevațiilor medii aproximativ 38% din durata de trecere deasupra orizontului [27]. Drept urmare, majoritatea stațiilor terestre folosite în comunicațiile satelitare LEO utilizează antene cu caracteristici de directivitate favorabile pentru unghiuri de elevație medie.

O altă provocare în dezvoltarea rețelelor de antene făzate pentru comunicații satelitare LEO este variația polarizării semnalelor transmise de sateliții LEO, cauzate, spre exemplu, de rotația satelitului în jurul axei proprii în timpul deplasării pe orbită. Aceasta a condus la utilizarea antenelor verticale sau a celor având polarizare circulară. Antenele verticale pot asigura o recepție continuă, chiar dacă variațiile polarizării pot provoca modificări ale calității recepției.

În contextul celor prezentate mai sus, această lucrare își propune să aducă noi contribuții în dezvoltarea și controlul rețelelor de antene făzate, prin implementarea elementelor configurate la trei sferturi de lungime de undă ($3\lambda/4$) pe plan de masă în cadrul rețelelor, și să exploreze potențialul acestei abordări pentru comunicațiile satelitare LEO. Deși există o multitudine de tipuri de antene ce pot fi integrate în rețele, elementul $3\lambda/4$ fixat pe un plan de masă (plasă metalică sau suprafață metalică solidă, din aluminiu sau din alt metal) prezintă câteva caracteristici distinctive [28]-[31], cum ar fi stabilitatea impedanței la valoarea de aproximativ 50 ohmi, caracteristică de directivitate în planul vertical favorabilă pentru intervalul unghiurilor de elevație medie, câștig superior față de cel al altor antene uzuale (de exemplu: $\lambda/4$ și $\lambda/2$). De asemenea, procedurile de fixare pe planul de masă și acordare la o anumită frecvență de rezonanță sunt mai simple decât în cazul unor antene cu un câștig comparabil, dar mai complexe ca structură (Yagi-Uda, turnstile, Moxon și altele). Din aceste motive a fost propusă integrarea elementelor $3\lambda/4$ în rețelele proiectate și analizate în cadrul tezei. Prin adoptarea unei abordări sistematice, această lucrare este structurată în cinci capitole, după cum urmează:

Capitolul I prezintă o introducere în domeniul antenelor și rețelelor de antene ca elemente constitutive esențiale în cadrul rețelelor de antene făzate. Se evidențiază principiile de funcționare, parametrii specifici și proprietăți care derivă din aceștia. Sunt sintetizate elemente teoretice fundamentale referitoare la caracteristicile de directivitate în câmp îndepărtat ale rețelelor de antene și apoi prezentate câteva categorii reprezentative de rețele, împreună cu elemente specifice fiecăreia. În continuarea capitolului se abordează domeniul rețelelor de antene făzate, începând cu definirea conceptului și a scopului principal, prezentarea principalelor categorii și a elementelor constitutive ale acestora, pe baza referințelor din literatura de specialitate. Sunt evidențiate metode și algoritmi utilizați frecvent în modelarea caracteristicii de directivitate și se prezintă tehnicile uzuale folosite pentru direcționarea lobilor de radiație ale rețelelor de antene făzate. Este prezentată o analiză a unor antene individuale studiate în cercetări anterioare în scopul identificării elementelor potrivite pentru implementarea în rețele de antene cu aplicații în comunicații satelitare LEO. Sunt analizate și evidențiate avantajele utilizării planului de masă în domeniul antenelor și rețelelor de antene.

Capitolul II începe cu o analiză preliminară a rezultatelor simulărilor asupra rețelelor de antene nedefazate cu elemente radiante verticale de tip monopol, în configurațiile $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopol repliat, fixate pe plan de masă. Scopul acestei analize a constat în identificarea configurației optime pentru implementare în rețele de antene fazate cu aplicabilitate în domeniul comunicațiilor satelitare LEO, stabilind astfel direcția continuării cercetării asupra rețelelor utilizând configurația identificată. Pe baza rezultatelor obținute, cercetarea a continuat cu o analiză a rezultatelor simulărilor caracteristicilor de directivitate bidimensionale și tridimensionale pentru rețelele de antene fazate liniare, planare și circulare, cu elemente radiante $3\lambda/4$ pe plan de masă, corespunzătoare diferitelor unghiuri de orientare ale lobilor principali de radiație. Dintre cele trei categorii de rețele de antene fazate analizate se subliniază importanța rețelelor planare uniforme, în contextul comunicațiilor satelitare LEO.

Capitolul III marchează tranziția către analiza experimentală a rețelelor de antene fazate, validând concluziile teoretice și cele derivate prin experimente simulate. Urmând demersul sistematic, cercetarea a început cu analiza unei rețele de antene cu două elemente $3\lambda/4$ nedefazate, fixate pe plan de masă. Sunt detaliate etapele proiectării și realizării practice ale rețelei. Analiza efectelor cuplajului mutual dintre elementele acesteia, atât prin simulări cât și prin măsurători, a condus la implementarea unei metode care simplifică procesul de acordare a rețelei pe frecvența de rezonanță dorită. Cercetarea a continuat cu evaluarea experimentală în mediul exterior a caracteristicii de directivitate a rețelei cu elemente nedefazate, utilizând un RTL-SDR (Software Defined Radio), ceea ce a permis validarea predicției teoretice referitoare la caracteristica de directivitate favorabilă pentru intervalul unghiurilor de elevație medie ale rețelei cu elemente $3\lambda/4$, estimând și câștigul în planul azimutal și vertical. Urmare a acestor validări experimentale, cercetarea experimentală a continuat cu analiza unei rețele de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, de această dată introducând defazaje progresive între elementele rețelei și utilizând un plan metalic consistent, confecționat din aluminiu. Se prezintă etapele parcurse în proiectarea și realizarea practică a rețelei de antene propriu-zise, urmate de proiectarea și implementarea elementelor esențiale în funcționarea rețelei, inclusiv ale unui modul de comandă a defazoarelor de radiofrecvență și ale software-ului asociat. Sunt analizate rezultatele testării acestor elemente folosind metode specifice și se propune o metodă pentru reducerea tensiunii diferențiale dintre două defazoare. La finalul capitolului se prezintă o analiză a efectelor defazajelor asupra formei diagramelor de radiație ale rețelei și se compară rezultatele experimentale cu cele obținute din simulările numerice.

Capitolul IV reflectă rezultatul integrării experienței teoretice și practice acumulate până la acest stadiu al cercetării descrise în teză, concentrându-se pe proiectarea și implementarea unei rețele planare de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, adaptată pentru modul de recepție, în contextul comunicațiilor satelitare LEO. Sunt prezentate detaliat fazele proiectării și părțile componente ale rețelei. În secțiunea finală a capitolului se demonstrează funcționalitatea sistemului prin prezentarea rezultatelor experimentale obținute în urma măsurătorilor în două medii de laborator distincte din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava, respectiv într-un laborator de compatibilitate electromagnetică acreditat RENAR, dotat cu o camera semi-anechoică și infrastructura de măsurare și testare specifică, și într-un mediu de laborator cu condiții obișnuite de funcționare pentru prototipul propus. O analiză comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulări numerice încheie acest capitol și evidențiază calitatea rezultatelor obținute.

În **Capitolul V** al tezei sunt prezentate concluziile generale ale tezei, contribuțiile personale principale teoretice și experimentale și procesul de diseminare a rezultatelor obținute în cadrul programului doctoral, prin lucrări publicate în reviste și volume de conferință indexate în baze de date internaționale, precum și direcțiile viitoare de dezvoltare a cercetării. În final, sunt prezentate lista de lucrări publicate și lista referințelor bibliografice utilizate.

CAPITOLUL I ANTENE ȘI REȚELE DE ANTENE FAZATE

Diagrama de radiație a unei rețele de antene are la bază produsul dintre o componentă a configurației acesteia numită factor de rețea și o componenta a diagramei unui element radiant individual din cadrul rețelei, motiv pentru care această primă secțiune este dedicată prezentării unor noțiuni de bază ale antenelor individuale.

I.1. Parametrii specifici ai antenelor

Directivitatea. Conform standardelor IEEE și a Comisiei Electrotehnice Internațională (IEC): „directivitatea unei antene este definită ca raportul dintre intensitatea radiației într-o direcție dată de la antenă și intensitatea radiației mediată, în toate direcțiile”.

Caracteristica de directivitate este reprezentarea grafică a proprietăților radiante ale unei antene în funcție de direcția (poziția) în raport cu aceasta. Pentru acest parametru important al antenelor unii autori preferă denumirea de *diagramă de radiație* sau chiar *model de radiație*.

Lobii diagramei de radiație sunt porțiuni ale diagramei și se definesc prin comparația cu maximul existent în acea diagramă, care corespunde așa numitului lob principal. **Lobul principal** (Lobul major) este cel corespunzător maximului de putere radiată. **Lobii secundari** sunt oricare dintre lobii diagramei, exceptând cel principal.

Deschiderea lobului la jumătate din putere (HPBW - Half-Power Beamwidth). În termeni de magnitudine a intensității câmpului electric sau magnetic, HPBW este determinat de punctele corespunzătoare la 0,707 din valoarea maximului intensității. Exprimat în termeni de putere, se aleg punctele corespunzătoare la 0,5 din valoarea maximă. Exprimat în dB, corespondența punctelor va fi la -3 dB relativ la valoarea maximă, considerată 0 dB.

Impedanța antenei este reprezentată de impedanța prezentă la terminalele acesteia. Prin urmare, pentru o orice tip de antenă trebuie definite terminale adecvate.

Câștigul antenei este o mărime utilă care descrie performanța acesteia într-o direcție de interes și este definit ca raportul dintre intensitatea radiației în direcția de interes și intensitatea care ar fi obținută dacă puterea acceptată de antenă ar fi radiată izotrop.

Eficiența antenei este o mărime utilizată pentru a lua în considerare pierderile la terminalele de intrare și cele provenite din construcția antenei. Printre cauzele care determină ca eficiența să nu fie de 100% menționăm: reflexii (cauzate de neadaptări între linia de transmisie și antenă, inclusiv neadaptări de impedanțe), pierderi I^2R (inclusiv prin efect Joule - în conductori și în dielectrici) și factori ce provin din imperfecțiuni constructive [32].

Raportul de unde staționare (relativ la tensiune) (VSWR - Voltage Standing Wave Ratio) este un parametru des folosit în caracterizarea unei antene ca sistem complet, incluzând alte elemente, cum ar fi: linii de transmisie, divizoare de semnal, etc. Se folosește pentru determinarea adaptărilor de impedanță dintre antenă și celelalte elemente.

Frecvența de rezonanță (rezonanța antenei) se referă la frecvența semnalului cu care antena este alimentată (la antenele de emisie), respectiv a undei pe care o recepționează (la antenele de recepție), pentru care antena are o eficiență maximă.

Lățimea de bandă poate fi considerată gama de frecvențe ce include ambele benzi laterale ale unei frecvențe centrale unde caracteristicile antenei (VSWR, impedanța de intrare, directivitatea, diagrama de radiație și altele) se încadrează în valori acceptabile relativ la valorile aceluiași mărimi măsurate la frecvența centrală de rezonanță a antenei.

Polarizarea antenei într-o anumită direcție este definită ca „polarizarea unei radiate sau transmise de antenă”. De regulă, tipul de polarizare este corespunzător direcției în care antena are maximul de câștig.

Pentru determinarea caracteristicii de directivitate (modelului de radiație) o antenă poate fi utilizată în modul emisie sau în modul recepție. Deseori este mai convenabil și practic folosirea antenei în modul recepție. Datorită proprietății de reciprocitate pentru caracteristicile de directivitate ale unei antene, modelul de radiație este identic cu cel corespunzător folosirii aceleiași antene în modul transmisie.

I.2. Introducere în rețele de antene fazate

Introducerea în mod controlat, fie static, fie dinamic, a unor defazaje între semnalele de alimentare ale elementelor rețelei, în scopul modificării directivității sau modelului de radiație în funcție de aplicații de interes, face diferența între o rețea de antene și o rețea de antene fazate. În multe aplicații este necesară proiectarea antenelor cu caracteristici directive și câștiguri foarte mari, pentru a răspunde cerințelor comunicațiilor la distanță lungă. Aceasta este posibil prin metoda clasică de mărire a dimensiunii electrice a elementelor individuale ale antenelor, sau prin constituirea unui ansamblu de elemente radiante într-o anumită configurație electrică și topologie. Noua antenă rezultată, multielement, este denumită *rețea de antene*, *arie de antene* sau *sistem de antene*. Pentru o directivitate foarte bună este necesar ca interferența dintre câmpurile produse de elementele rețelei să fie constructivă în direcțiile dorite și distructivă în direcții nedorite. Reciprocitatea caracteristicii de directivitate menționată în cazul antenelor individuale este valabilă și pentru rețelele de antene. Așa cum a fost menționat în introducerea capitolului, caracteristica de directivitate (diagrama de radiație) a unei rețele de antene poate fi exprimată ca produsul dintre modelul de radiație vectorial al unui element și un factor scalar specific rețelei, numit factor de rețea.

În funcție de topologie (aranjamentul geometric și modul în care elementele sunt interconectate), rețelele de antene pot fi clasificate în: rețele liniare (elementele sunt dispuse de-a lungul unei linii drepte), planare (elementele sunt plasate pe o suprafață plană), circulare (caz particular al rețelelor planare, în care elementele sunt situate pe circumferința unui cerc) și conformale, în care elementele urmează conturul unei anumite suprafețe.

În stadiul actual de dezvoltare, rețelele de antene fazate presupun combinarea rețelelor de antene cu sisteme electronice specifice controlate de software în care sunt implementați algoritmi de procesare a semnalului util [33], [34]. În contextul comunicațiilor satelitare LEO sunt utilizate deseori antenele Yagi-Uda datorită performanțelor bune în ce privește câștigul și directivitatea oferite. În schimb, odată proiectată și implementată, antena Yagi oferă o caracteristică de directivitate fixă. O soluție adoptată pe scară largă pentru orientarea lobului principal sub unghiul dorit o constituie implementarea unor sisteme mecanice cunoscute sub denumirea generică de rotoare de antenă. Dezavantajele acestora constau în uzura rapidă, deteriorarea cauzată de condițiile de mediu și necesitatea întreținerii frecvente. Utilizarea rețelelor de antene fazate rezolvă aceste probleme legate de uzura mecanică [3], [4], reușind totodată să producă un maxim detașat al diagramei de radiație în zona spațială în care se urmărește recepția sau emisia unui semnal util (SoI) și producerea unui minim (nul) al diagramei de radiație în zona din spațiu în care există semnale perturbatoare (SNoI).

Există două categorii principale de rețele de antene fazate, ce vor fi prezentate în continuare.

Rețelele de antene fazate cu fascicul comutabil (lobi comutabili) conțin un număr finit de modele de radiație predefinite sau strategii de combinare (Figura I-1). În componența unui asemenea sistem sunt incluse etaje defazoare de semnal, fiecare realizând un defazaj fixat

(prestat). Prin defazarea controlată a semnalelor ce alimentează fiecare element se poate modifica modelul de radiație a rețelei de antene. După cum se observă în Figura I-1 sistemul poate realiza un număr limitat de diagrame de radiație din care, prin intermediul unui algoritm implementat în software-ul de comandă și control se selectează diagrama cea mai apropiată de cerințele de comunicație ale utilizatorului.

Rețelele de antene fazate adaptive includ un număr, teoretic infinit de modele (pe bază de scenarii), care sunt ajustate în timp real în funcție de schimbările spațiale ale SoI sau SNoI. Figura I-2 ilustrează o reprezentare schematică a modului de control al orientării lobului principal al diagramei de radiație în cadrul unei rețele de antene fazate adaptive, care poate acoperi practic orice direcție de interes.

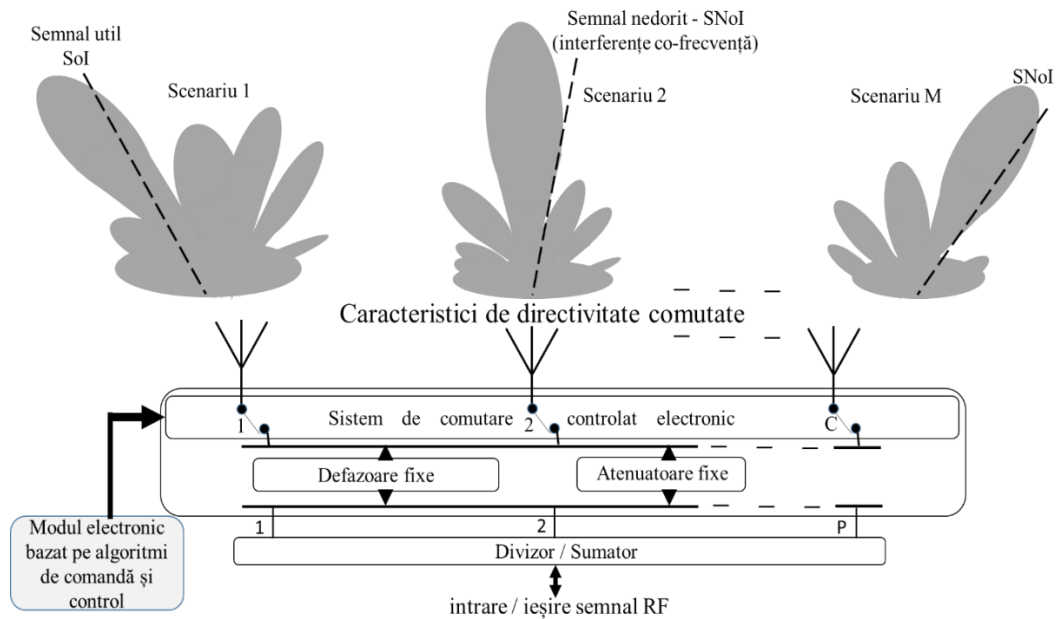


Figura I-1 Sistem de antene cu lobi comutabili. Ilustrarea modului de direcționare limitat al lobilor și elementele constitutive esențiale (prelucrare după [35]).

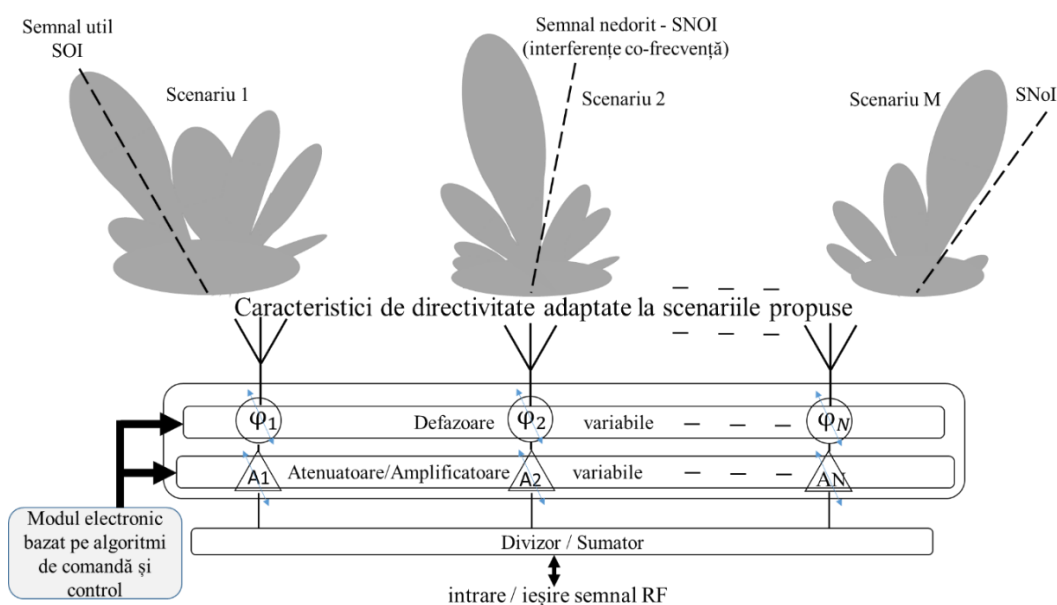


Figura I-2 Sistem de antene adaptive. Ilustrarea modului de direcționare al lobilor și elementele constitutive esențiale (prelucrare după [35]).

Una din metodele utilizate frecvent pentru depistarea semnalelor SoI și SNoI în acest tip de sisteme este bazată pe estimarea direcției de sosire (DoA). Într-un astfel de sistem, fiecare defazor, comandat și controlat electronic, se află în legătură cu câte un element radiant.

Câteva elemente constitutive ale rețelelor de antene fazate, precum și metode pentru formarea și direcționarea lobilor de radiație, sunt prezentate în continuare.

Defazoarele de radiofrecvență. În funcție de sfera de aplicabilitate este necesar a fi alese defazoarele potrivite pentru a se evita erori mari ce pot apărea din cauza unor neadaptări ale unor parametri specifici domeniului radiofrecvenței (de exemplu, neadaptarea de impedanță). Defazoarele pot conține elemente pasive (precum linii de întârziere, ghiduri de undă din ferită, sisteme microelectromecanice (MEMS) distribuite) sau elemente active (diode PIN, tranzistori sau microcipuri specializate, cum ar fi defazoarele bazate pe modulatori vectoriali integrate).

Atenuatoarele și amplificatoarele de radiofrecvență cu câștig controlat electronic (VGA) se folosesc, de obicei, împreună cu circuite defazoare, pentru o eficiență mai mare a formării lobilor (fasciculelor). Există tipuri de VGA ce pot fi comandate digital, astfel încât să fie compatibile cu partea logică de comandă și control a sistemului de antene fazate.

Elemente software: Pentru îmbunătățirea unor parametri de funcționare ai rețelei de antene fazate, printre care raportul semnal/zgomot, câștigul, domeniul de frecvențe, în software-ul modulelor de comandă și control integrate în rețelele de antene fazate au fost implementați algoritmi matematici specifici care au rol esențial în procesarea digitală a semnalelor (DSP).

Modelarea diagramei de radiație a unei rețele de antene presupune orientarea lobilor conform cerințelor impuse de scopul vizat în aplicații, pe baza fenomenului de interferență a undelor electromagnetice. Majoritatea metodelor folosite pot fi încadrate în două categorii principale:

- Formarea lobilor diagramei de radiație (**Beamforming**)
- Direcționarea lobului principal al diagramei de radiație (**Beam steering**)

Așa cum reiese din termenul original din limba engleză, “**beamforming**” (se mai utilizează și în forma “beam-forming”) se referă la tehnica de formare a lobilor (fasciculelor) într-un model de radiație al unei rețele de antene fazate, prin care energia unei electromagnetice este concentrată către zone de interes. Prin modificarea defazajelor, amplitudinilor sau a ambilor parametri ai semnalelor ce alimentează elementele radiante se poate modifica modelul de radiație al rețelei de antene fazate în funcție de aplicația dorită.

Termenul “**beam steering**”, împrumutat din limba engleză, se referă la schimbarea direcției lobului principal al unui model de radiație, spre o zonă de interes într-o anumită aplicație practică [2], [36]. Într-o rețea de antene fazate întârzierile semnalelor sunt esențiale pentru direcționarea fasciculelor și pot fi emulate prin defazaje, metodă mai cunoscută în practică și utilizată cu succes în multe implementări [37].

Estimarea direcției de sosire (Direction of arrival - DOA) reprezintă una din metodele uzuale de direcționare precisă a lobilor de radiație, aceasta fiind posibilă prin procesarea digitală a semnalelor emise sau recepționate de rețeaua de antene fazate. Algoritmii DOA sunt concepuți pentru a determina direcțiile tuturor semnalelor pe baza întârzierilor (diferențelor temporale relative la o referință). Dintre **metodele utilizate în estimarea direcției de sosire**, cele mai frecvent utilizate sunt: metode convenționale (de exemplu, metoda clasică de formare a fasciculului sau metoda Fourier [38]), metode subspațiale (metoda MUSIC [39] și metoda ESPRIT [40]), metode integrate (de exemplu *algoritmul iterativ al modulului constant bazat pe proiecția celor mai mici pătrate* (Iterative Least Squares Projection Based Constant Modulus Algorithm - ILSP-CMA și versiuni mai recente [41]), metoda probabilității maxime (ML) și metode adaptive de formare a lobilor. Din multitudinea de tehnici utilizate pentru formarea

fasciculului rețelei de antene, două tehnici au fost considerate optime, oferind un compromis bun între eficiență și putere de calcul necesară: algoritmul *minimumului erorii medii pătratice* (MMSE - Minimum Mean Square Error), bazat pe proprietățile unor filtre ideale numite *filtre Wiener* [42], [43] și algoritmul *cele mai mici medii pătratice* (LMS - Least Mean Square).

În continuare, sunt prezentate aplicații ale rețelelor de antene fazate.

În **domeniul RADAR** (Radio Detection And Ranging - *detectarea prin radio și determinarea distanței*), rețelele de antene fazate RADAR (Phased-array RADAR) [44], [45] au fost utilizate inițial în domeniul militar (în Germania anul 1944 în sistemul de detecție rapidă numit MAMMUT), pentru detectarea țintelor și distanței până la acestea. Utilizarea rețelelor a fost apoi extinsă în domeniul controlului traficului aerian, în echipamente radar SAR (Synthetic Aperture Radar) și în alte domenii. În stadiul actual se testează echipamentele MIMO-SAR (Multiple Input - Multiple Output - SAR).

Aplicațiile clasice ale rețelelor de antene fazate în comunicațiile radio au inclus transmisia și recepția direcțională a undelor radio, transmisia sectorială în comunicațiile prin satelit, folosind tehnica numită *sectorizare*, transmisiile radio și TV (Difuzarea), rețele radio locale (WLAN – Wireless Local Area Network), rețele de acces wireless în bandă largă (BWA - Broadband Wireless Access networks) [46], [47], [48] și altele. În domeniul **comunicațiilor mobile** aceste rețele au contribuit la extinderea razei de acțiune pentru comunicații, prin câștigul superior al sistemelor adaptive, capabile de a extinde raza de acțiune a unei „celule” și totodată mărirea numărului de utilizatori, comparativ cu posibilitățile oferite de antenele omnidirecționale sau sectoriale. **Sistemele cu intrări și ieșiri multiple (MIMO - Multiple Input-Multiple Output)**, conforme cu standardul IEEE 802.11n utilizează rețele de antene fazate complexe atât la recepție cât și la emisie. MIMO este o aplicație în continuă dezvoltare, bazată pe cercetări recente din domeniul DSP (Digital Signal Processing) și este capabil de procesarea informațiilor spațiale, ce include și codificarea acestora. **Găsirea direcției (Direction Finding)** este o aplicație actuală a rețelelor de antene fazate, ce își găsește utilitatea în domenii diverse, inclusiv în îmbunătățirea serviciilor de urgență. În **industria aerospațială**, implementarea în domeniul aerospațial a sistemelor bazate pe rețele de antene fazate poate îmbunătăți calitatea comunicației prin capacitatea de modelare a caracteristicii de directivitate, compensând efectele vibrațiilor aero-mecanice care pot deplasa elementele rețelei [49], [50].

În continuare sunt abordate dezavantajele rețelelor de antene fazate, ce constituie totodată provocări necesare a fi abordate în dezvoltări ulterioare.

În urma unor studii s-a observat o creștere a costului acestor sisteme, nu numai sub aspectul hardware ci și al consumului de energie. Se caută soluții pentru reducerea costurilor asociate cu rețelele de antene fazate complexe, printre care una ar putea fi reducerea numărului de lanțuri de receptoare utilizate în cadrul acestor rețele de antene [51]. Tehnicile SDMA și cele de minimizare a efectelor interferențelor pot fi utilizate individual sau în diferite combinații, în funcție de natura unui anumit sistem, dar beneficiile maxime oferite de ambele abordări nu pot fi atinse simultan. Optimizarea sistemului pentru a reduce interferența poate limita extinderea intervalului SDMA, deoarece energia va fi radiată în toate direcțiile și celulele din apropiere care operează pe aceeași frecvență vor interfera. Însă, dacă un sistem realizează reducerea interferențelor, va avea un factor redus de reutilizare a frecvenței, astfel că tehnica SDMA nu va fi implementată cu eficacitate [52]. Dimensiunile sistemelor de antene inteligente ar putea constitui o problemă în viitor. În domeniul comunicațiilor mobile sunt necesare stații de bază cu dimensiuni din ce în ce mai mari, pentru ca utilizarea acestor rețele de antene să fie eficientă.

În continuare sunt prezentate câteva direcții și tendințe în dezvoltarea rețelelor de antene fazate.

Utilizarea antenelor fazate în tehnologiile 6G, după cum a estimat Concernul „Samsung”, „ar urma să aibă loc, cel mai devreme în anul 2028, iar comercializarea produselor acestei inovații, în jurul anului 2030” [53]. În viziunea Concernului „Samsung”, în viitor va fi necesară **utilizarea frecvențelor de ordinul terahertz**. Antenele fazate complexe (inteligente) de dimensiuni extrem de mici, denumite „senzori”, vor fi încorporate într-o nouă structură de rețele complet transformată colaborând cu tehnologiile Realității Augmentate [53]. **Comunicațiile cu rate foarte mari de transmisie de date** vor fi satisfăcute de sistemele MIMO-Multiple Input Multiple Output îmbunătățite, în componența cărora se vor afla sisteme de antene inteligente. Aceste cerințe vor avea un impact imediat asupra: utilizării mai eficiente a spectrului de frecvențe, scăderii costului pentru realizarea rețelelor radio de generație nouă, calității serviciilor oferite de respectivele rețele, sistemelor celulare cu mobilitate largă și nu în ultimul rând asupra comunicațiilor satelitare.

I.3. Analiza unor antene utilizabile în rețele de antene fazate

Dintre numeroasele tipuri de elemente radiante utilizate în rețelele de antene, cele mai multe sunt antene filare, antene slot, sau combinații ale acestora. Pentru utilizarea în domeniul de frecvențe mari (GHz), multe rețele de antene au fost construite folosind dipoli de circuit imprimat sau antene patch în tehnologie microstrip [54]. Antenele utilizate în rețelele de antene pot fi clasificate după mai multe criterii, printre care [55]:

- antene de bandă largă sau de bandă îngustă, după banda de frecvență în care operează;
- antene direcționale sau omnidirecționale, după caracteristicile de directivitate;
- antene cu polarizare liniară, circulară sau eliptică, după tipul de polarizare. Polarizările liniare și circulare sunt cazuri particulare ale polarizării eliptice;
- după gama frecvențelor de lucru [55], antenele pot fi dedicate domeniilor de „extrem de joasă frecvență” ($3 \div 30$ Hz), super joasă frecvență ($30 \div 300$ Hz), ultra joasă frecvență ($300 \text{ Hz} \div 3$ KHz), foarte joasă frecvență ($3 \div 30$ KHz), joasă frecvență ($30 \div 300$ KHz), medie frecvență ($0,3 \div 3$ MHz), înaltă frecvență ($3 \div 30$ MHz), foarte înaltă frecvență ($30 \div 300$ MHz), ultra înaltă frecvență ($0,3 \div 3$ GHz), super înaltă frecvență ($3 \div 30$ GHz) și extrem de înaltă frecvență ($30 \div 300$ GHz).

Cercetări recente au necesitat studiul unor tipuri de antene individuale cu aplicabilitate în domeniul detecției meteorilor [56] și comunicațiilor satelitare/spațiale [57]. **Antena „Moxon”** este una din antenele studiate în [56], denumirea acesteia provenind de la numele creatorului (Les Moxon). Această antenă este direcțională, fiind echivalentă cu o antenă Yagi-Uda cu două elemente. Caracteristica sa de directivitate dezvăluie o lățime mare a lobului principal și un raport față-spate foarte bun. Măsurătorile efectuate asupra **antenei verticale în configurație de trei sferturi de lungime de undă ($3\lambda/4$) și polarizor parazit, circular** [56] au indicat un VSWR mai mic de 1,2:1 pe întreaga bandă destinată sateliților, între 435 și 438 MHz. Deși performantă, această antenă are dezavantaje legate de gradul ridicat de complexitate constructivă și a reglajelor asupra impedanței și VSWR [27], [57], [58]. **Antena omnidirecțională cu impedanță complex conjugată** [59] a fost propusă ca alternativă la antena de tip turnichet (în engleză: turnstile) de transmisie a radiobalizelor, folosită în domeniul studiului meteorilor utilizând tehnici radio [56]. Antena prezintă performanțe similare cu antena turnichet. Cu toate avantajele oferite sub aspectul impedanței, caracteristicii de directivitate și polarizării, antena a realizat un câștig maxim în planul vertical pentru unghiul de 90° , în detrimentul câștigului la unghiuri de elevație medie, potrivite pentru comunicații satelitare LEO. **Antenele verticale monopoli** [60] (se mai utilizează denumirea „antene monopoli verticale”), prin definiție, sunt alimentate la un capăt. Acestea au atras atenția în ceea ce privește posibilitatea implementării în rețele de antene în vederea cercetării asupra acestora,

datorită simplității sistemului de alimentare și posibilității realizării practice cu respectarea mai precisă a parametrilor dimensionali și ai celor electrice. Simulările efectuate în cadrul cercetărilor anterioare asupra diferitelor configurații de elemente radiante individuale verticale alimentate la bază [56] au oferit o analiză comparativă între rezultatele obținute cu ajutorul software-ului de proiectare și analiză a antenelor MMANA-GAL [61]. Rezultatele simulărilor pentru configurațiile de elemente: $\lambda/4$, $\lambda/2$, $5\lambda/8$, $3\lambda/4$ și λ . au indicat că elementul $3\lambda/4$ prezintă cea mai favorabilă caracteristică de directivitate în planul vertical pentru elevații medii, potrivită pentru comunicații satelitare LEO.

Avantaje și dezavantaje ale antenelor monopol verticale analizate. În cercetările actuale din domeniul rețelelor de antene fazate este necesară utilizarea elementelor radiante cu impedanțe caracteristice apropiate de 50 ohmi, aceasta fiind specifică majorității elementelor electronice hardware, dar și componentelor pasive utilizate în prezent în cadrul acestor rețele. Elementele de tip monopol în configurație $\lambda/4$ oferă impedanțe cu mult sub 50 ohmi. Din acest motiv necesită circuite adaptoare de impedanță pentru a se realiza un VSWR cât mai bun. Dintre cele cinci configurații de monopoluri verticale analizate, elementul configurat la $3\lambda/4$ prezintă impedanța cea mai apropiată de 50 ohmi. Concluziile analizei asupra antenelor monopol studiate în cercetări anterioare pot fi rezumate astfel:

- Caracteristicile de directivitate ale antenelor verticale $3\lambda/4$ și λ arată câștiguri superioare (\approx de două ori) la elevații medii, fapt de interes pentru comunicații satelitare.
- Chiar și la elevații joase, câștigul antenei $3\lambda/4$ este superior antenelor $\lambda/4$ și $\lambda/2$.
- Se păstrează caracteristicile omnidirecționale în plan orizontal, în condițiile de mai sus.

Antenele monopol repliate. Un caz particular al antenelor monopol asupra cărora nu s-a insistat foarte mult, dar care poate oferi caracteristici de interes în anumite aplicații, este monopolul repliat (cunoscut, în engleză, sub denumirea *hairpin*). Rezultate anterioare [62]-[65] au arătat câteva avantaje ale acestui tip de antenă, printre care merită menționate: consumul mai redus de curent de la sursa semnalului de radiofrecvență și lățimea de bandă mai mare decât a unui singur monopol de aceeași dimensiune; creșterea lungimea de rezonanță a antenei prin plierea acesteia, fără a crește înălțimea fizică a antenei (aspect util pentru aplicații în care înălțimea antenei este restricționată). Printre dezavantaje menționăm nepotrivirea impedanței dintre sursă și antenă, fapt ce generează o cantitate semnificativă de reflexie a puterii radiate [56], [62]; drept urmare, este necesară o potrivire adecvată a impedanței.

Problematika planului de masă. În cazul general al antenelor pe plan de masă (în engleză: *ground plane*) repartiția undelor staționare nu admite decât un nod de intensitate a curentului la vârful antenei, corepunzător unui ventru de tensiune. În cazul particular al configurațiilor multipli impari de $\lambda/4$ repartiția undelor staționare admite un ventru de intensitate a curentului la punctul conectat la pământ, care corespunde unui potențial zero, respectiv unui nod de tensiune. În teorie aceste cazuri se studiază, de obicei, făcând apel la teoria imaginilor, care presupune că antena pe plan de masă este echivalentă cu ansamblul format din antenă și imaginea ei în oglindă, față de sol [66], [67]. Dintre avantajele oferite de utilizarea planului de masă pentru antene, menționăm următoarele: din punct de vedere mecanic, planul de masă (prin definiție, metalic) reprezintă un stabiliment fix și robust pentru antene și rețelele de antene, ceea ce conferă fiabilitate sistemului și stabilitatea parametrilor de acordare (impedanța, frecvența de rezonanță); utilizarea planului de masă determină atenuarea semnificativă a curenților de mod comun; plasarea elementelor radiante ale rețelelor de antene pe un plan de masă suficient de mare conduce la reducerea semnificativă a pierderilor de energie radiantă odată cu creșterea eficienței rețelelor [68], [69], [70].

I.4. Concluzii

În prima parte din Capitolul I au fost explorate și sintetizate aspecte teoretice esențiale din domeniul antenelor și rețelelor de antene fazate, incluzând conceptul, categoriile principale și componentele esențiale în funcționarea acestora. Au fost descrise categoriile principale de rețele de antene și caracteristicile de directivitate derivate din teoria rețelelor de antene. Domeniul rețelelor de antene fazate constituie un subiect de studiu de actualitate și potențial deosebit de dezvoltare în viitor. Au fost prezentate pe scurt unele metode, tehnici și algoritmi folosiți frecvent în formarea și direcționarea lobilor de radiație ale rețelelor. Capitolul include și principalele avantaje și dezavantaje ale rețelelor de antene fazate, precum și câteva direcții de dezvoltare. În sfera comunicațiilor satelitare LEO, rețelele de antene fazate sunt utile pentru optimizarea recepției datelor de la sateliți, datorită capacității lor de a permite modificarea directivității în mod controlat, în scopul urmăririi sateliților. În partea a doua a capitolului I s-au analizat diferite tipuri de antene uzuale în vederea alegerii celei mai potrivite configurații pentru a fi implementate ca elemente radiante în cadrul rețelelor de antene ce vor face obiectul cercetărilor ulterioare în cadrul acestei teze de doctorat. Au fost vizate întrunirea următoarelor caracteristici: construcție și alimentare cât mai simple, caracteristică de directivitate favorabilă pentru unghiuri de elevații medii (pentru a fi cât mai eficiente în comunicațiile satelitare LEO), stabilitatea cât mai bună a impedanței la o valoare apropiată de 50 ohmi, caracteristică de directivitate omnidirecțională în plan azimutal (ca element individual) și o caracteristică de directivitate cât mai curată, cu un număr redus de lobi secundari. Prin compararea avantajelor și dezavantajelor elementelor analizate, s-a ajuns la concluzia că cele mai potrivite configurații de elemente radiante care se apropie de caracteristicile vizate sunt monopoliurile verticale. Ținând cont și de avantajele oferite de utilizarea planului de masă, monopoliurile verticale fixate pe plan de masă vor fi utilizați în continuare pentru cercetarea și dezvoltarea rețelelor de antene fazate destinate comunicațiilor satelitare LEO, începând cu simulări asupra acestora.

CAPITOLUL II SIMULAREA DIAGRAMELOR DE RADIAȚIE PENTRU REȚELE DE ANTENE FAZATE

În urma concluziilor din Capitolul I, în această secțiune se propune analiza rețelelor de antene ce conțin elemente radiante de tip monopol în configurațiile $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopoli repliați, fixate pe plan de masă. Scopul analizei este de a selecta configurația cea mai potrivită pentru continuarea cercetării asupra rețelelor de antene la nivelul determinărilor experimentale. În simulări s-a utilizat software-ul MMANA-GAL de proiectare și analiză a antenelor. Distanța dintre elemente s-a ales $\lambda/2$ pentru evitarea efectelor nedorite ale cuplajelor mutuale dintre elementele radiante ale rețelelor și minimizarea lobilor secundari. Rețelele au fost proiectate pentru frecvența de rezonanță de 434 MHz. Rezultatele analizei rețelelor de antene nefazate au fost centralizate în Tabelul II-1 și Tabelul II-2. Pe baza acestor date se poate concluziona că rețelele cu elemente de $3\lambda/4$ se disting prin stabilitatea impedanței (cu valoarea cea mai apropiată de 50 ohmi), valoarea SWR apropiată de cea ideală (1.0) și câștigul maxim obținut în zona elevațiilor medii. Aceste caracteristici indică un potențial adecvat pentru utilizarea rețelelor cu elemente de $3\lambda/4$ în comunicații satelitare LEO. În consecință, secțiunea următoare se va concentra pe analiza rețelelor de antene fazate cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.

Tabelul II-1 Parametrii obținuți prin simularea rețelelor de antene cu 2 elemente $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopoli repliați.

Configurația	Impedanța complexă Z (Ohm)	SWR	Deschiderea unghiulară la jumătate din putere HPBW		Câștigul maxim (dBi) relativ la 0 dB	Elevația la câștig maxim
			Planul azimutal	Planul elevației		
2 x $\lambda/4$	31,879 - j0,077	1,57	60°	40°	8,2	11,2°
2 x $3\lambda/4$	54,545 - j0,077	1,09	80°	33°	9,65	46,3°
Hairpin (2 x $\lambda/4$)	118,417 - j0,189	2,37	60°	43°	7,88	11,8°

Tabelul II-2 Parametrii obținuți prin simulare asupra rețelelor de antene cu 4 elemente radiante în configurație $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopol repliate (Hairpin)

Configurația	Impedanța complexă Z (Ohm)	SWR	Deschiderea unghiulară la jumătate din putere HPBW		Câștigul maxim (dBi) relativ la 0 dB	Elevația la câștig maxim
			Planul azimutal	Planul vertical		
4 x $\lambda/4$	11,288 - j0,109	4,43	360°	33,5°	6,19	55,6°
4 x $3\lambda/4$	52,441 - j0,043	1,05	360°	28,5°	8,35	58,9°
Hairpin (4 x $\lambda/4$)	56,393 + j0,686	1,13	360°	99,5°	6,24	62°

În continuare prezentăm caracteristicilor de directivitate bidimensionale și tridimensionale rezultate în urma simulărilor efectuate pentru rețelele de antene fazate liniare, planare și circulare cu elemente radiante $3\lambda/4$ pe plan de masă, corespunzătoare diferitelor unghiuri de orientare ale lobilor principali de radiație. Parametrii setați în MMANA-GAL referitori la planul de masă, frecvența de rezonanță și distanțarea dintre elemente sunt cei prezentați în paragraful anterior. Simulările diferitelor configurații de rețele, pentru unghiuri de orientare în intervalul (0° - 360°), au evidențiat o simetrie a caracteristicilor de directivitate ale rețelelor în cele patru cadrane, fapt ce face suficientă prezentarea caracteristicilor pentru intervalul de unghiuri între 0° și 90°.

II.1. Analiza rețelelor de antene fazate liniare uniforme

Rețea de antene fazate cu 2 elemente

În **Error! Reference source not found.** este prezentată rețeaua cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, proiectată cu MMANA-GAL, considerând elementul 2 ca referință. După aplicarea defazajelor semnalelor celor două elemente pentru a orienta lobul principal la unghiul φ_0 [3] au rezultat caracteristicile de directivitate prezentate în Figura II-2 pentru unghiurile de orientare φ_0 de 0° , 30° și 90° . În Figura II-3 este ilustrată caracteristica tridimensională.

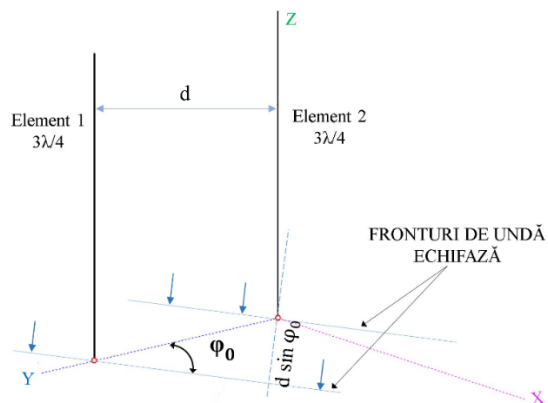


Figura II-1 Reprezentarea în planul xOy a unei rețele de antene fazate liniare uniforme cu 2 elemente.

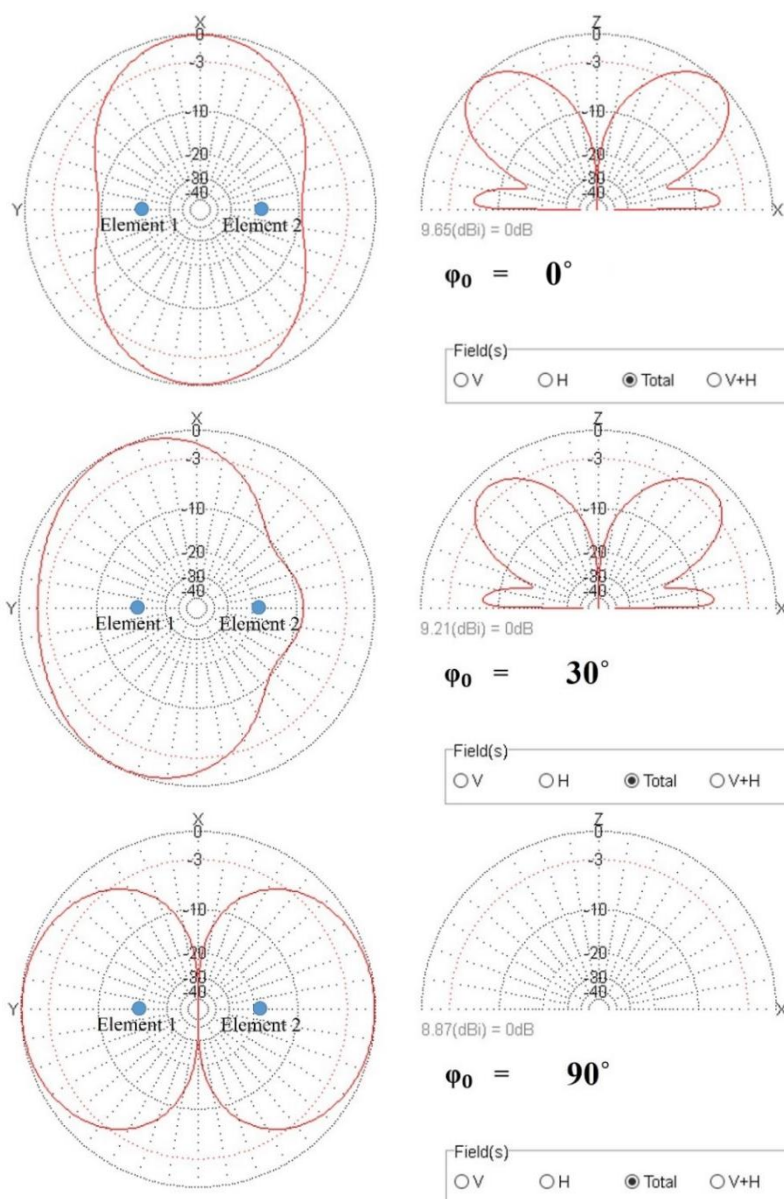


Figura II-2 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) pentru $\varphi_0 = 0^\circ$, 30° și 90° pentru o rețea de antene fazate liniare uniforme.

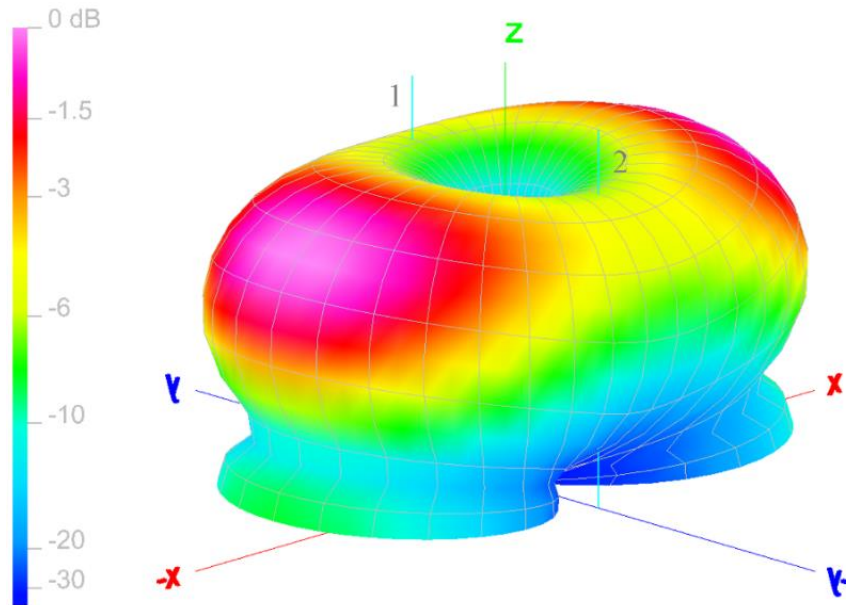


Figura II-3 Caracteristica de directivitate tridimensională a rețelei de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.

Rețea de antene fazate liniară uniformă cu 4 elemente

În Figura II-4 se poate observa arhitectura rețelei de antene uniforme cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, proiectată cu MMANA-GAL. Elementele sunt dispuse de-a lungul axei Oy. Considerând rețeaua în modul emisie și respectând ecuațiile din [3] adaptate pentru rețele planare uniforme, valorile defazajelor obținute au fost introduse în MMANA-GAL, defazajul introdus elementului cu numărul 4 fiind 0° iar defazajele celorlalte elemente fiind negative.

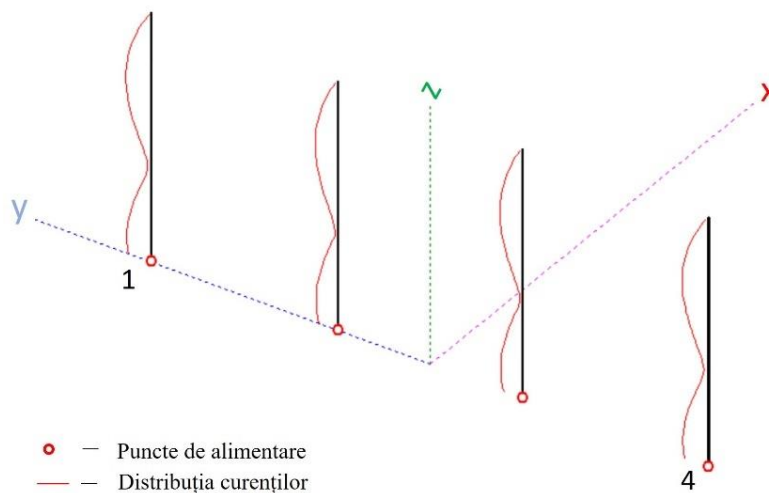


Figura II-4 Rețea de antene liniară uniformă cu 4 elemente monopoli în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, proiectată cu MMANA-GAL.

Figura II-5 arată caracteristicile de directivitate ale rețelei cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă în planul azimutal și secțiunile acestora în planul vertical xOz, pentru orientările la 0° , 45° și 90° . Simetria lobilor principali se păstrează relativ la axele de coordonate. Rețeaua liniară uniformă cu 4 elemente radiante are capacitate de scanare cu rezoluție mai bună în planul azimutal. În Figura II-6 este ilustrată caracteristica tridimensională a rețelei, pentru $\varphi_0 = 0^\circ$.

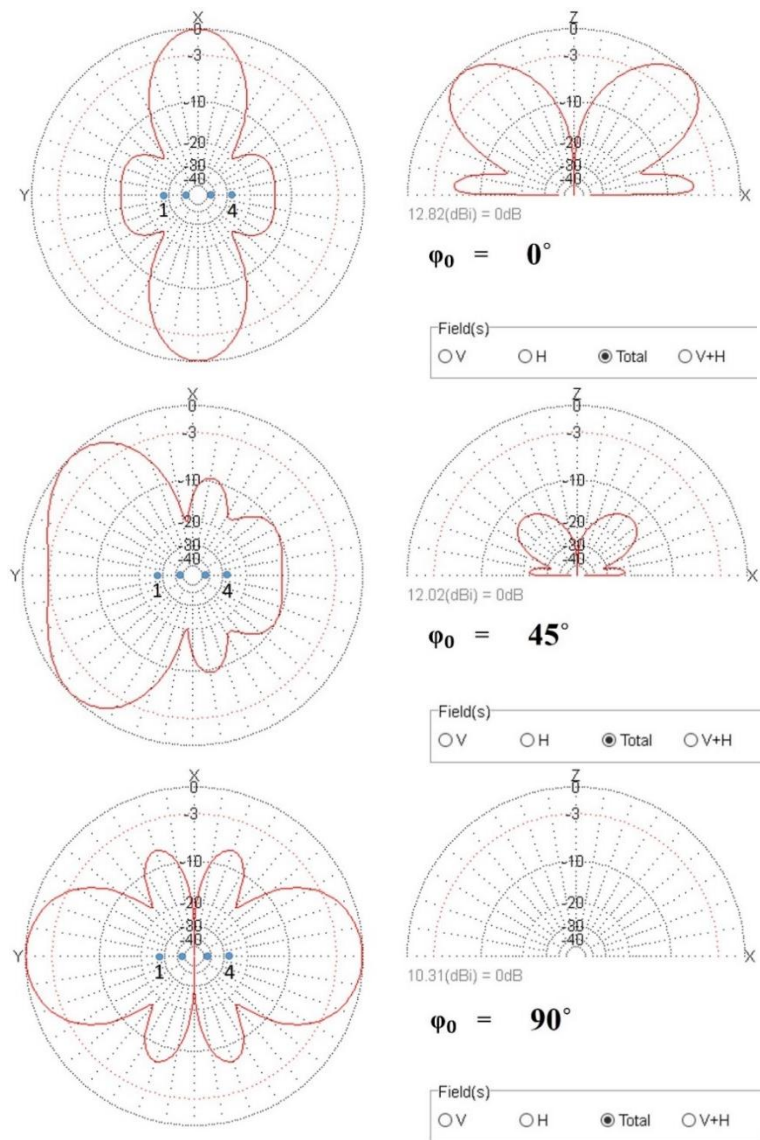


Figura II-5 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) corespunzătoare unghiurilor de orientare de 0° , 45° și 90° pentru o rețea liniară uniformă cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.

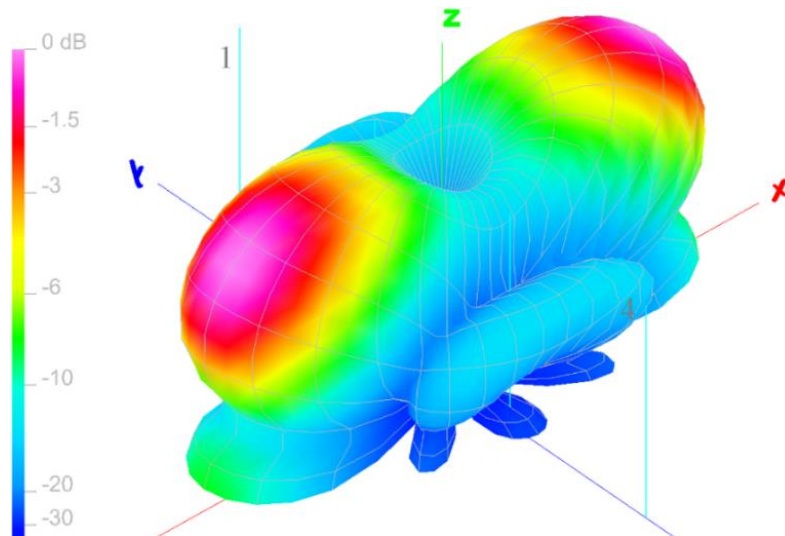
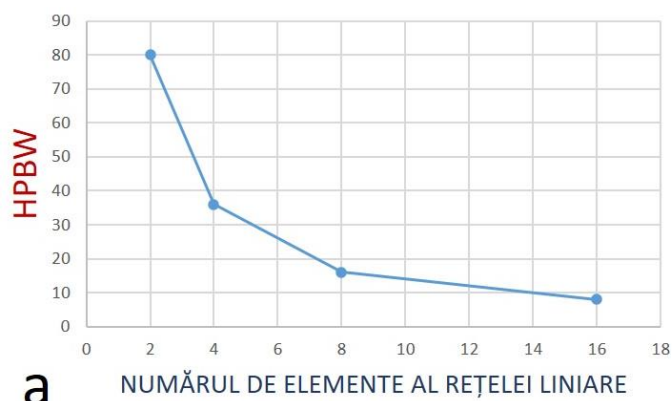


Figura II-6 Caracteristica de directivitate tridimensională a rețelei de antene liniare uniforme cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.

În mod similar, au fost simulate rețelele liniare cu 8 și 16 elemente. Concluziile privind variația HPBW și a câștigului în raport cu numărul de elemente sunt rezumate în graficul și tabelul din Figura II-7.



NUMĂR DE ELEMENTE AL REȚELEI LINIARE UNIFORME	CÂȘTIG (dBi)
2	9,65
4	12,82
8	15,98
16	19,08

Figura II-7 HPBW (a) și câștigul (b) pentru $\varphi_0 = 0^\circ$, funcție de numărul de elemente al rețelelor de antene liniare uniforme în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.

II.2. Analiza rețelelor fazate planare uniforme

Analiza rețelei de antene planare uniforme cu 4 elemente defazate

În Figura II-8 este ilustrată rețeaua planară uniformă cu 4 elemente $3\lambda/4$. În mod similar rețelei cu 2 elemente simulată în secțiunea anterioară, proprietățile de simetrie ale rețelei planare uniforme au determinat limitarea prezentării simulărilor la unghiurile de orientare de 0° , 45° și 90° , corespunzător cadranelui 2 al sistemului de coordonate. După introducerea în MMANA-GAL a valorilor defazajelor pentru cele trei unghiuri de orientare s-au obținut rezultatele din Figura II-9.

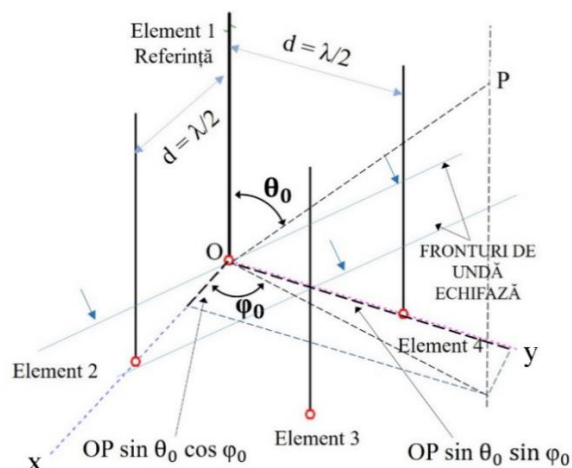


Figura II-8 Rețea planară uniformă cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, simulată cu MMANA-GAL.

Similar cu Secțiunea II.1., reprezentările în planul azimutal sunt obținute în planul orizontal ce conține maximul de pe întreaga caracteristică de directivitate (în acest caz la o elevație de 42° de grade), iar reprezentările în planul vertical rezultă din intersectarea planului orizontal cu planul vertical ce conține axa x. Simulările au demonstrat că, în cazul în care rețeaua de antene se rotește în jurul centrului sistemului de coordonate cu un unghi egal ca valoare, dar de semn opus celui de orientare a lobului, lobi principalii pentru orice unghi de orientare se poziționează de-a lungul axei Ox. Astfel se relevă faptul că formele și câștigurile maxime ale lobilor sunt sensibil aceleași pentru orice unghi de orientare. Valoarea câștigului maxim este apropiată de 11,5 dBi pentru majoritatea unghiurilor de orientare și corespunde unghiului de elevație de $\sim 42^\circ$, care se situează în intervalul unghiurilor de elevație medie, fapt datorat specificului configurației $3\lambda/4$ pe plan de masă. În cazul rețelei planare cu 4 elemente, capacitatea de scanare se extinde în tot intervalul între 0° și 360° , dată fiind prezența unui singur lob principal. Se constată o scădere a HPBW la $\sim 80^\circ$ față de rețeaua cu 2 elemente, pentru toate unghiurile de orientare. În Figura II-10 este prezentată caracteristica de directivitate tridimensională a rețelei de antene planare uniforme cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.

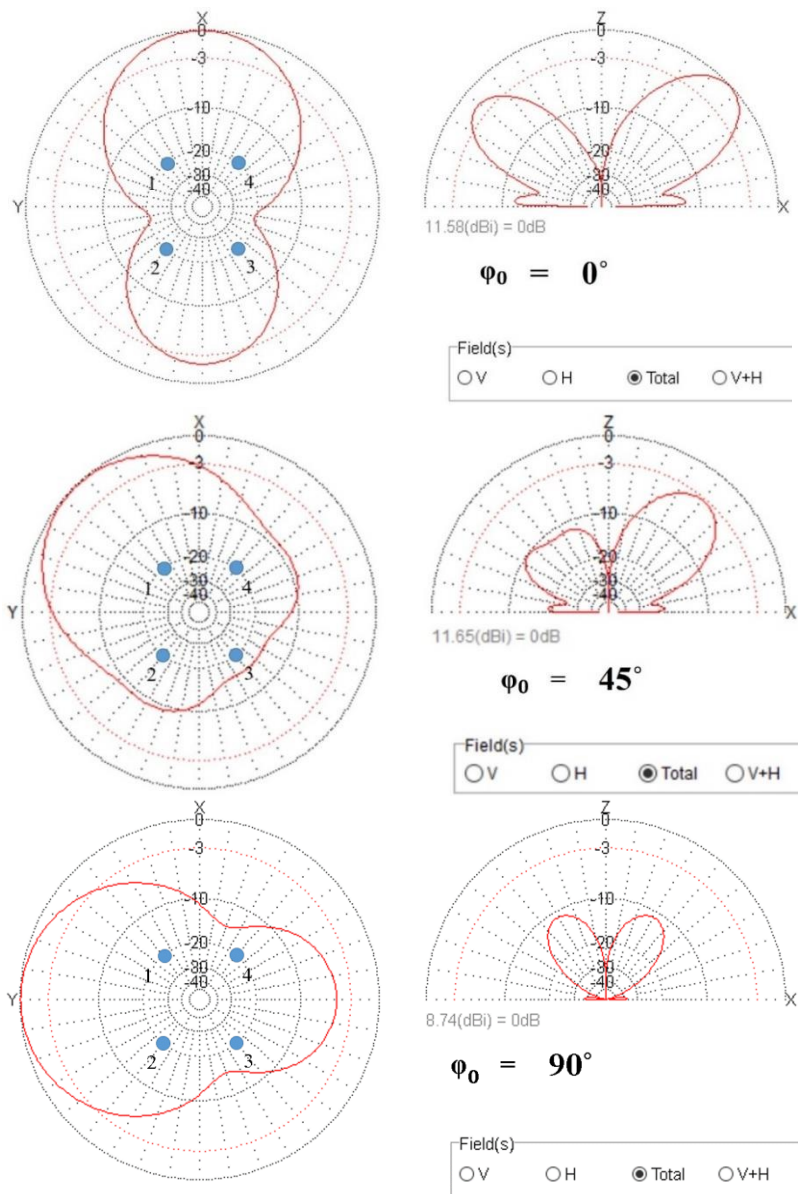


Figura II-9 Caracteristicile de directivitate în planul azimutal xOy (stânga) și în secțiunile după planul xOz ale diagramelor tridimensionale (dreapta) corespunzătoare unghiurilor de orientare 0° , 45° și 90° pentru rețeaua de antene cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.

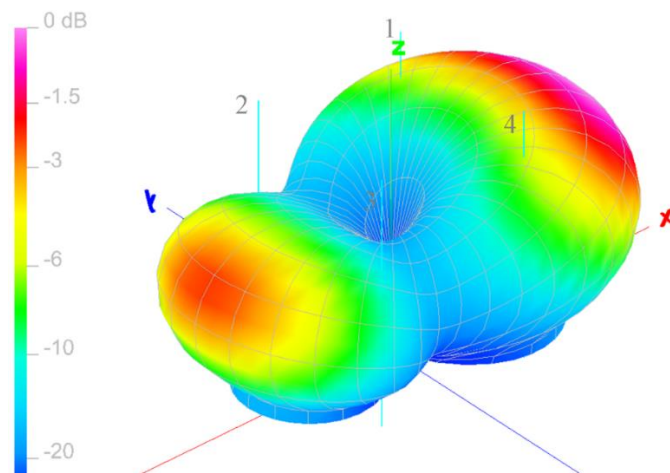


Figura II-10 Caracteristica de directivitate a rețelei de antene planare uniforme cu 4 elemente în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru unghiul de orientare $\varphi_0 = 0^\circ$.

Simulările au continuat pentru rețelele planare uniforme cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, cu 9 și 16 elemente. Și în cazul acestor rețele s-a observat tendința de scădere a HPBW, însoțită de o creștere a câștigului, păstrându-se unicitatea lobului principal pentru majoritatea unghiurilor de orientare în planul azimutal. Pentru a oferi o imagine de ansamblu asupra comportamentului rețelelor planare uniforme, diagramele acestora pentru unghiul de orientare de 0° în planul azimutal au fost suprapuse și prezentate în Figura II-11. În Figura II-12 sunt ilustrate variațiile HPBW (a) și câștigului (b) în funcție de numărul de elemente ale rețelelor analizate în această secțiune a tezei. Graficul din Figura II-12 (a) arată că scăderea lățimii lobilor principali nu este la fel de abruptă ca în cazul rețelelor de antene liniare uniforme, pentru rețeaua planară cu 16 elemente HPBW ajungând la aproximativ 32° în planul azimutal. Figura II-12 (b) indică creșterea câștigului acestor rețele cu aproximativ 2,5 dB la fiecare unitate de creștere a gradului matricei rețelei pătrate, de la 2×2 la 4×4 elemente.

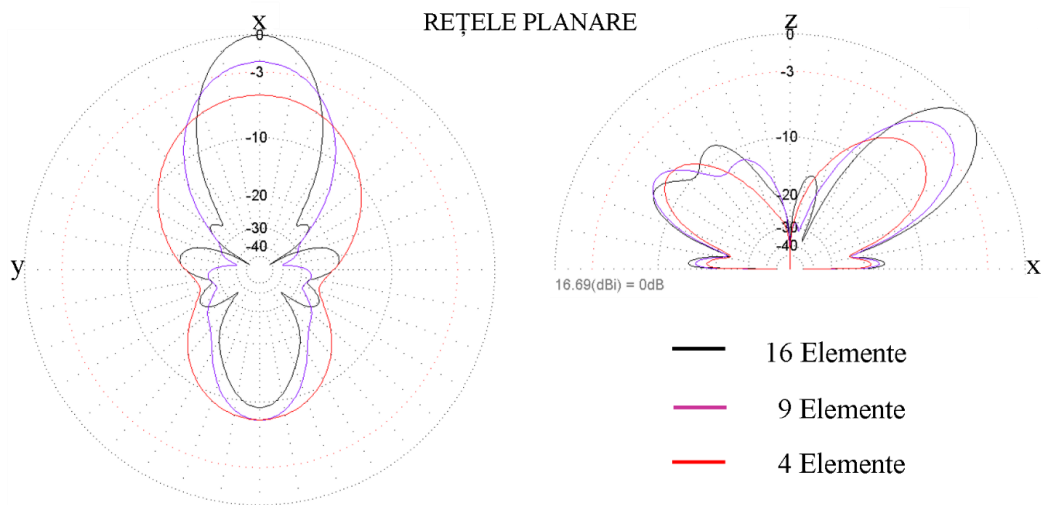


Figura II-11 Comparație între lățimile lobilor specifici rețelelor de antene planare uniforme cu 4, 9 respectiv 16 elemente radiante în configurație $3/4$ pe plan de masă pentru unghiul de orientare în planul azimutal de 0° .

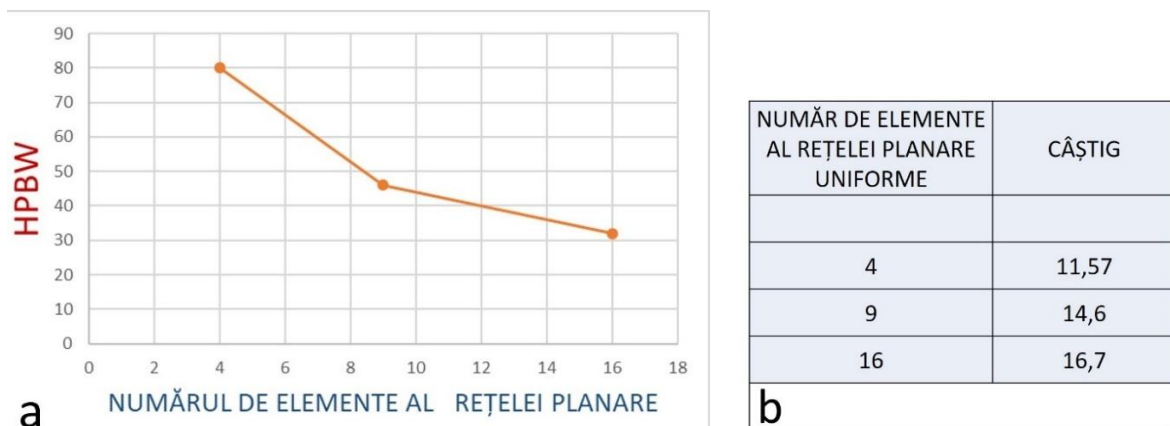


Figura II-12 HPBW (a) și câștigul (b) pentru $\varphi_0 = 0^\circ$, funcție de numărul de elemente al rețelelor de antene planare uniforme în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă.

II.3. Analiza rețelei de antene fazate circulare uniforme cu 8 elemente

În urma simulărilor rețelelor circulare cu 8 elemente, realizate conform unei proceduri similare cu cea utilizată pentru rețelele liniare și planare s-a constatat că acest tip de rețea se caracterizează prin prezența mai multor lobi în planul vertical. Un aspect mai puțin încurajator al simulărilor acestei rețele este că unghiul de elevație necesar pentru a obține o scanare

eficientă, având un raport față-spate de aproximativ 3 dB, este semnificativ mai mare (aproximativ 72°) decât limita superioară a elevațiilor medii vizate. În plus, apariția a patru lobi semnificativi în planul vertical, împreună cu nurile adiacente, sugerează că această topologie de rețea cu elemente dispuse în configurație $3\lambda/4$ pe planul de masă nu este compatibilă cu aplicațiile în comunicațiile satelitare LEO, din perspectiva acestei lucrări.

II.4. Concluzii

Analiza rețelelor uniforme de antene cu 2 elemente și a rețelelor planare uniforme cu 4 elemente radiante în trei configurații diferite: $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopol repliat, bazată pe simulările cu ajutorul software-ului de proiectare și analiză a antenelor MMANA-GAL a avut ca scop principal identificarea celei mai potrivite configurații de elemente radiante pentru implementarea în cadrul rețelelor de antene ce vor face obiectul cercetărilor ulterioare în cadrul acestei teze, la nivel experimental, în condițiile tehnice și a infrastructurii disponibile. Pe baza rezultatelor prezente în Tabelul II-1 și Tabelul II-2 se poate deduce: dintre cele 3 configurații analizate, rețeaua ce conține elemente în configurație $3\lambda/4$ se distinge prin caracteristica de directivitate în planul vertical cea mai favorabilă pentru unghiuri de elevații medii (aproximativ între 27° și 70°), prin aceasta fiind cea mai adecvată în ceea ce privește aplicabilitatea practică în domeniul comunicațiilor satelitare LEO. Preferința pentru intervalul mediu al elevațiilor este confirmat și în [57], [30]. Valorile SWR și stabilitatea impedanței în raport cu numărul de elemente sunt favorabile elementelor $3\lambda/4$. În planul vertical, HPBW al rețelelor cu elemente $3\lambda/4$ nedefazate este cel mai mic, pentru rețeaua cu 4 elemente ajungând la valoarea de $28,5^\circ$. Această caracteristică poate fi avantajoasă în comunicațiile satelitare LEO, deoarece permite o focalizare mai precisă a semnalului în direcția dorită, spre un satelit LEO la un moment dat. Datorită avantajelor rețelelor cu elemente $3\lambda/4$, cercetarea din acest capitol a continuat cu analiza rețelelor de antene fazate cu elemente $3\lambda/4$ poziționate pe plan de masă. Prezența lobilor simetrici în planul vertical cât și în cel azimutal, pentru toate rețelele liniare uniforme cu elemente în configurație $3\lambda/4$ limitează opțiunea de alegere a unei astfel de rețele pentru utilizarea în comunicații satelitare LEO. Analiza rețelelor de antene fazate planare uniforme cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă a evidențiat caracteristicile acestora, care vor fi discutate în continuare. Pentru majoritatea unghiurilor de orientare azimutală rețelele planare oferă un singur lob principal, iar numărul de lobi secundari este semnificativ mai redus în comparație cu cel al rețelelor liniare. Datorită câștigului maxim oferit la o elevație de aproximativ 42° (elevație medie), acest tip de rețea reprezintă un subiect de interes pentru cercetările viitoare în domeniu, fiind potrivită pentru aplicații în comunicații satelitare LEO. În schimb, rețeaua circulară cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă nu este potrivită pentru aplicații în comunicațiile satelitare LEO, depășind domeniul de interes al acestei lucrări. În încheierea acestui capitol dedicat simulărilor pentru rețelele de antene nedefazate și pentru cele fazate cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, s-a evidențiat importanța acestei configurații în contextul comunicațiilor satelitare LEO. În următoarele capitole ale acestei teze, se vor continua cercetările asupra rețelelor cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, la nivel experimental, punând accentul pe evoluția stabilității parametrilor și pe comportamentul radiant al acestora.

CAPITOLUL III REȚEA DE ANTENE FAZATE CU 2 ELEMENTE $3\lambda/4$

În acest capitol este prezentată o abordare sistematică a rețelelor de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, cu o primă parte dedicată cazului nedefazat și o a doua parte dedicată rețelelor fazate. Se are în vedere proiectarea, implementarea practică și analiza experimentală a acestor rețele, precum și analiza comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulări numerice.

III.1. Analiza rețelei de antene cu 2 elemente $3\lambda/4$ nedefazate

Rețeaua de antene a fost proiectată și dezvoltată pentru frecvența de 434 MHz, apropiată de banda (435-438) MHz alocată comunicațiilor satelitare în orbită joasă a Pământului (LEO) și destinată mai multor aplicații. Înainte de a începe realizarea practică a rețelei de antene, s-au efectuat simulări utilizând software-ul de analiză a antenei MMANA-GAL. Setările din MMANA-GAL corespund cazului în care elementele sunt din cupru cu diametrul de 1,5 mm. Pentru o bună aproximare a planului de masă din sită metalică s-a ales permitivitatea electrică relativă $\epsilon_r = 100$, conductivitate $\sigma = 10000$ mS/m și înălțimea planului de masă față de sol 0 m.

În vederea realizării practice a unei rețele de antene cu 2 elemente $3\lambda/4$ a fost confecționat un plan din material plat, rigid și izolator electric, cu o lungime de 80 cm (mai mare de 4 sferturi de lungimi de undă) și o lățime de aproximativ 75 cm, pe care s-a fixat o plasă metalică cu ochiuri pătrate cu o latură de 1,2 cm. Cele două elemente ale rețelei au fost confecționate din conductor de cupru masiv cu diametrul de 1,5 mm și au fost ajustate la o lungime de aproximativ 51 cm ($\approx 3\lambda/4$). Pentru a fi posibilă fixarea pe planul din plasă metalică (Fe Zn), elementele au fost plasate pe cablaje imprimate (PCB) de tip FR 4 cu dimensiuni de aproximativ 5 x 4 cm, prin cositorire pe o „insulă” practică pe cablaj, cu dimensiunea cât mai mică posibil (aproximativ 6 mm în diametru) și cât mai depărtată de restul cablajului de Cu (care va fi conectat electric la masă - GND), pentru a minimiza capacitățile parazite [31].

Pentru testarea rețelei a fost folosit un emițător de tip TCXO (Thermo Compensated Quartz Crystal Oscillator) care a emis pe frecvența de 433,915 MHz. Din acest motiv, frecvența de rezonanță la care a fost acordată rețeaua a fost apropiată de 433,92 MHz. În Figura III-1 este prezentată o parte din configurația experimentală, inclusiv rețeaua de antene, care a fost pregătită pentru modul de emisie. Pentru cuplarea electrică a celor două elemente a fost folosit un divizor de radiofrecvență (splitter) fabricat de „Minicircuits”, de tip ZFSC-2-5-S [74].

Deși rezultatele măsurătorilor descrise până acum au fost în concordanță bună cu cele ale simulărilor, a fost necesară caracterizarea comportamentului radiant al rețelei, în scopul evaluării caracteristicii de directivitate a acesteia. Măsurătorile au avut loc în mediul exterior. Configurația utilizată în aceste măsurători este reprezentată schematic în Figura III-2. Splitter-ul a divizat semnalul de radiofrecvență în două componente identice. Pentru partea de recepție, pentru măsurarea puterii semnalului emis de rețea, s-a constituit o configurație formată dintr-o antenă dipol (în modul de recepție) acordată la frecvența emițătorului (aprox. 434 MHz), un RTL - SDR (Realtek - Software-Defined Radio) ca receptor digital, un computer și un software dedicat pentru SDR. În scopul evaluării caracteristicii de directivitate, nivelurile semnalelor furnizate de RTL-SDR au fost înregistrate în patru direcții ale rețelei în plan azimutal pentru unghiurile de 0° , 90° , 180° și 270° și pentru două unghiuri de elevație, de 30° și 45° . Antena de recepție a fost amplasată la o înălțime de aproximativ 5 m, iar unghiul de elevație a fost calculat după relația: $\alpha = \arctan(h/L)$, unde $h \approx 5$ [m] și L este distanța de la platforma receptorului la AUT (Array Under Test), distanța care a fost măsurată și exprimată în [m] (pentru $L = 5$ m $\Rightarrow \alpha \approx 45^\circ$ și pentru $L \approx 8,6$ m $\Rightarrow \alpha \approx 30^\circ$). SWR pentru antena de recepție a fost 1,15.

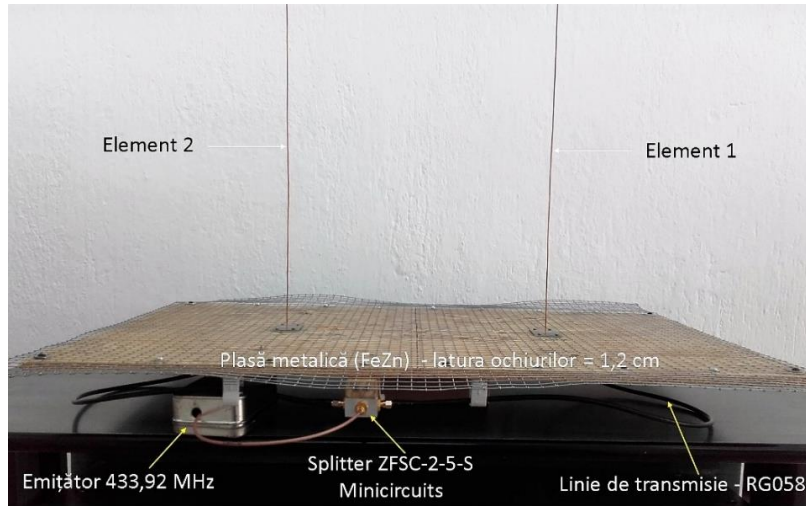


Figura III-1 Rețea de antene cu 2 elemente $3/\lambda 4$ pe plan de masă, pregătită pentru măsurători.

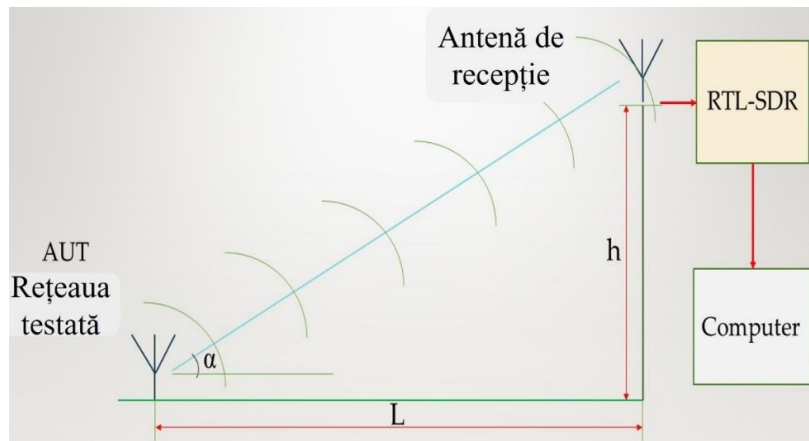


Figura III-2 Configurație pentru evaluarea diagramei de radiație a rețelei de antene în mediul exterior.

După mai mult de 30 de valori citite pentru fiecare poziție a rețelei, valorile medii ale puterii, conform datelor furnizate de RTL-SDR care au fost afișate pe monitorul computerului, s-au notat în Tabelul III-1.

Tabelul III-1 Nivelurile semnalelor furnizate de RTL-SDR și prelucrate de SDRSharp (exprimate în dBFS) în urma recepției semnalului emis de rețeaua de antene (a) și valorile (dB) rezultate după normalizarea la 0 dB (b).

Semnal SDR înainte de normalizare				G_{30}		G_{45}	
Azimut	0°	-31,6 (dBFS)	0°	-14,7 (dB)	0°	-7,8 (dB)	
	90°	-16,9 (dBFS)	90°	0 (dB)	90°	0 (dB)	
	180°	-31,7 (dBFS)	180°	-14,8 (dB)	180°	-8,2 (dB)	
	270°	-16,9 (dBFS)	270°	0 (dB)	270°	-0,5 (dB)	
$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 45^\circ$	
a	Elevație		b	Elevație			

Prelucrarea datelor furnizate de RTL-SDR a fost necesară pentru a compara datele din simulări cu cele furnizate în urma măsurătorilor reale și a constata în normalizarea valorilor furnizate. Câștigul maxim a fost normalizat la 0 dB prin calcularea diferenței dintre valorile maxime și minime din Tabelul III-1 (a) pentru cele două unghiuri de elevație. Prin această procedură s-au obținut valorile relative exprimate în dB (Tabelul III-1 (b)) notate cu G_{30} și G_{45} corespunzătoare elevațiilor de 30° respectiv 45° , astfel fiind posibilă comparația cu rezultatele simulărilor, exprimate de asemenea, în dB. Deoarece s-a ținut cont de valorile obținute pentru cele două unghiuri de elevație în urma a două măsurători independente, normalizarea a fost efectuată în raport cu fiecare dintre cele două unghiuri. Figura III-3 este relevantă pentru demonstrarea concordanței dintre rezultatele simulărilor și cele experimentale.

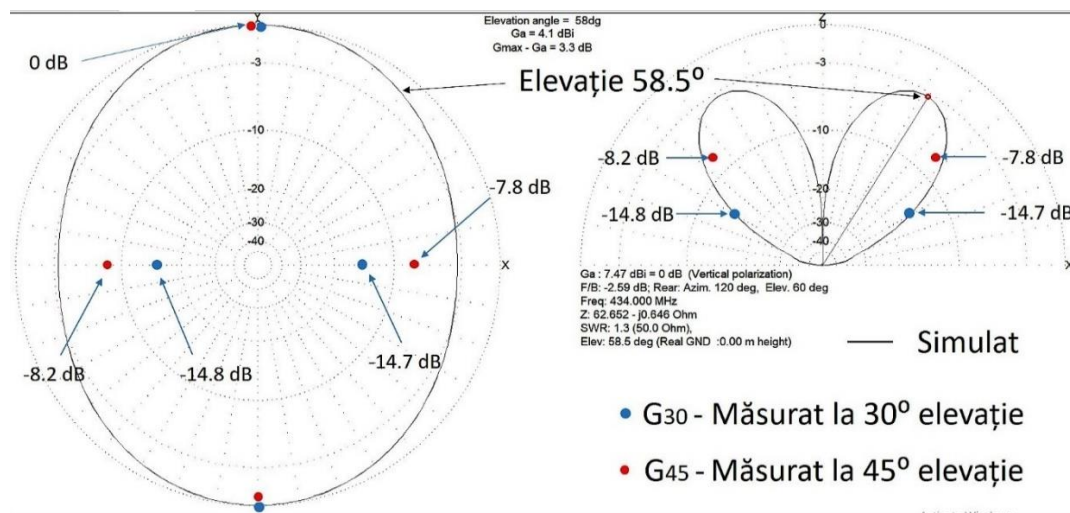


Figura III-3 Comparație între câștigul simulat și câștigul măsurat și normalizat al rețelei pentru unghiurile de elevație de 30° respectiv 45° , precum și pentru cele patru unghiuri în plan orizontal asociate fiecărei din cele 2 elevații.

III.2. Realizarea practică a rețelei de antene fazate cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă

Validarea experimentală a unor aspecte teoretice specifice rețelei cu elemente $3\lambda/4$ realizată în secțiunea anterioară, incluzând stabilitatea impedanței și câștigul măsurat la unghiuri ce se încadrează în intervalul de elevații medii, a determinat extinderea cercetării în domeniul rețelelor de antene fazate. Această secțiune prezintă aspecte legate de proiectarea, realizarea practică și rezultatele obținute pe parcursul testelor și determinărilor experimentale asupra unei rețele de antene fazate cu două elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă. Se prezintă etapele realizării practice și descrierea elementelor esențiale în funcționarea rețelei, respectiv a unui modul de comandă a defazoarelor de radiofrecvență și a software-ului aferent dezvoltat în cadrul acestor cercetări. Acordarea pe frecvența de rezonanță de 915 MHz a fost conformă cu frecvența standard a generatorului de radiofrecvență inclus în echipamentul de măsură de laborator „Lab-Volt” specializat pentru determinarea caracteristicilor de directivitate ale rețelei de antene fazate. La finalul capitolului este prezentată o analiză a efectelor introducerii defazajelor asupra modificării formelor diagramelor de radiație ale rețelei realizate și concordanța rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulări [76]. Rețeaua a fost proiectată pentru modul de emisie. Standul de testare include un generator RF, un poziționar de antenă și un sistem de recepție, achiziție și procesare a datelor recepționate. Software-ul LVDAM-ANT oferă un set de instrumente folosit pentru a controla rotirea antenei și achiziția datelor, precum și afișarea caracteristicilor măsurate în planul azimutal.

Figura III-4 oferă o vedere a rețelei de antene văzută de deasupra planului de masă, evidențiind cele 2 elemente radiante $3\lambda/4$. În cadrul experimentelor s-a introdus utilizarea elementelor constituite din antene telescopice, ambele fixate pe structuri de conector SMA (produse de Amphenol) prin cositorire și prelucrate pentru obținerea a două elemente sensibil identice.

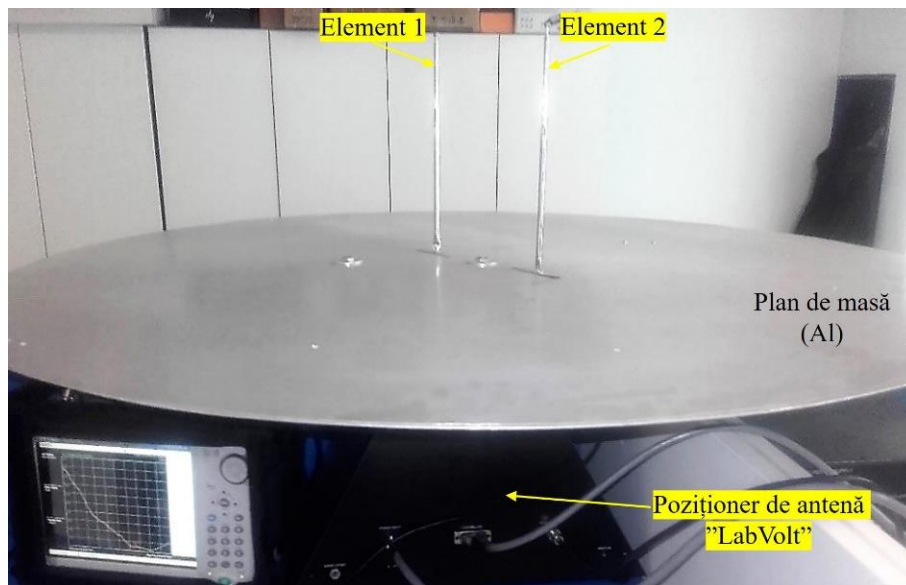


Figura III-4 Vedere de deasupra planului de masă, adaptat la sistemul mecanic al echipamentului "LabVolt". Ca elemente radiante au fost utilizate antene telescopice.

Pentru măsurătorile parametrilor electrici ale rețelei a fost utilizat un VNA - Anritsu MS8212E. Rezultatele au indicat un VSWR bun, mai mic de 1,1 la frecvența de 915 MHz, iar impedanța sistemului a fost apropiată de 50 ohmi la această frecvență. Prin designul sistemului realizat, a fost posibilă dispunerea celorlalte componente ale rețelei dedesubtul planului, astfel reducându-se interacțiunile între elementele radiante, cele hardware și alți factori perturbatori din mediul de măsurare de laborator. Figura III-5 prezintă zona de dedesubtul planului de masă al rețelei de antene, unde se poate observa configurația completă a rețelei de antene fazate, pregătită pentru măsurătorile caracteristicilor de directivitate.

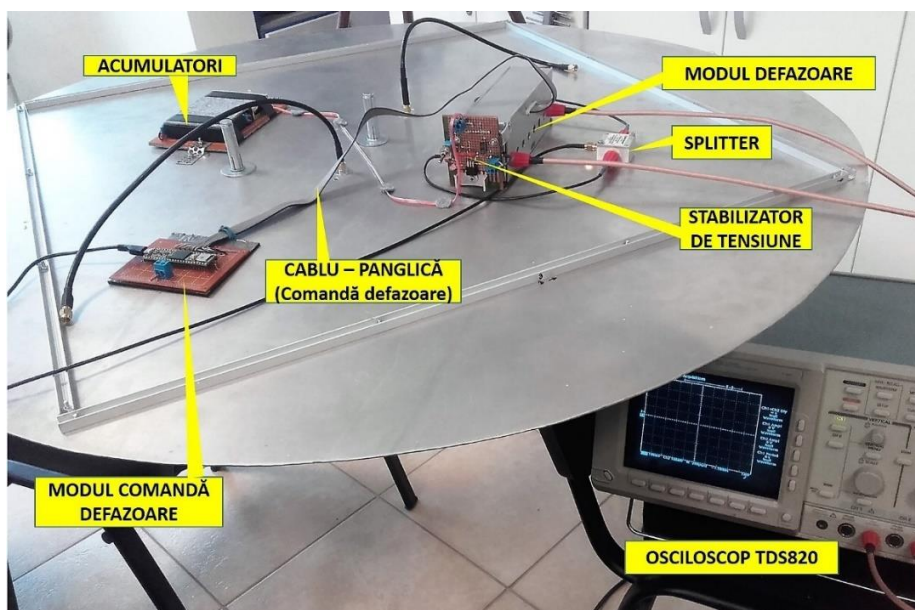


Figura III-5 Rețeaua de antene fazate pregătită pentru măsurarea caracteristicii de directivitate. Vedere de pe suprafața planului de masă, opusă celei pe care sunt fixate elementele.

În continuare vom descrie sintetic elementele constitutive și modul de funcționare al acestora în cadrul sistemului cu două elemente, ilustrat în Figura III-5. Modulele defazoare de radiofrecvență s-au bazat pe modulatorul vectorial integrat AD8340 [77] produs de „Analog Devices”. Aceste defazoare au fost implicate și în cercetări anterioare privind rețelele de antene liniare [2] și pot defaza semnalele aplicate la intrările lor în intervalul ($0^\circ - 360^\circ$). Modulul defazor prezentat în Figura III-5 conține două defazoare de radiofrecvență independente, încorporate într-o carcasă ecranată electromagnetic, fiecare din acestea alimentând câte un element al rețelei de antene fazate. Programarea defazoarelor s-a făcut după asigurarea conexiunii între modulul de comandă și conectorul modulului defazor, prin intermediul unui cablu-panglică. Pentru realizarea modulului de comandă a defazoarelor a fost utilizată platforma Teensy 3.6, bazată pe microprocesorul ARM Cortex-M4 modernizat pe 32 de biți, cu o frecvență de ceas de 180 MHz, cu posibilitatea de overclock până la 240 MHz. Figura III-6 (a) prezintă acest modul. Aplicația software pentru programarea acestuia a fost dezvoltată în cadrul acestei teze și testată pentru verificarea corectitudinii funcționării. Figura III-6 (b) prezintă o porțiune mărită din Figura III-5 cu focalizare asupra modulului și a defazoarelor. În continuare vor fi descrise pe scurt modul de funcționare a modulului de comandă a defazoarelor, precum și software-ul de comandă asociat dezvoltat ca parte integrantă a cercetării realizate în cadrul acestei lucrări. Reprezentarea schematică simplificată din Figura III-7 ilustrează modalitatea de comandă a unui defazor bazat pe modulatorul vectorial AD8340. În stânga figurii (încadrarea cu linie întreruptă) se poate observa schema simplificată a porțiunii de defazare conținută în interiorul unui circuit AD8340. Tensiunile necesare modulatorului sunt realizate de convertorul digital-analogic DAC8554 produs de „Texas Instruments” pentru „Burr-Brown”. Circuitul integrat DAC8554 conține patru convertoare digital-analogice (DAC) independente, fiecare cu o rezoluție de 16 biți (65536 trepte de variație de tensiune pentru fiecare DAC) [78]. În Figura III-7 semnalul **SDI** (Serial Data Input) reprezintă datele seriale ce sunt transferate către convertoarele DAC8554. Fiecare convertor necesită 24 biți de informație, din care 8 biți sunt folosiți pentru programarea modului de lucru, iar 16 biți reprezintă informația binară căreia îi corespunde o valoare analogică.

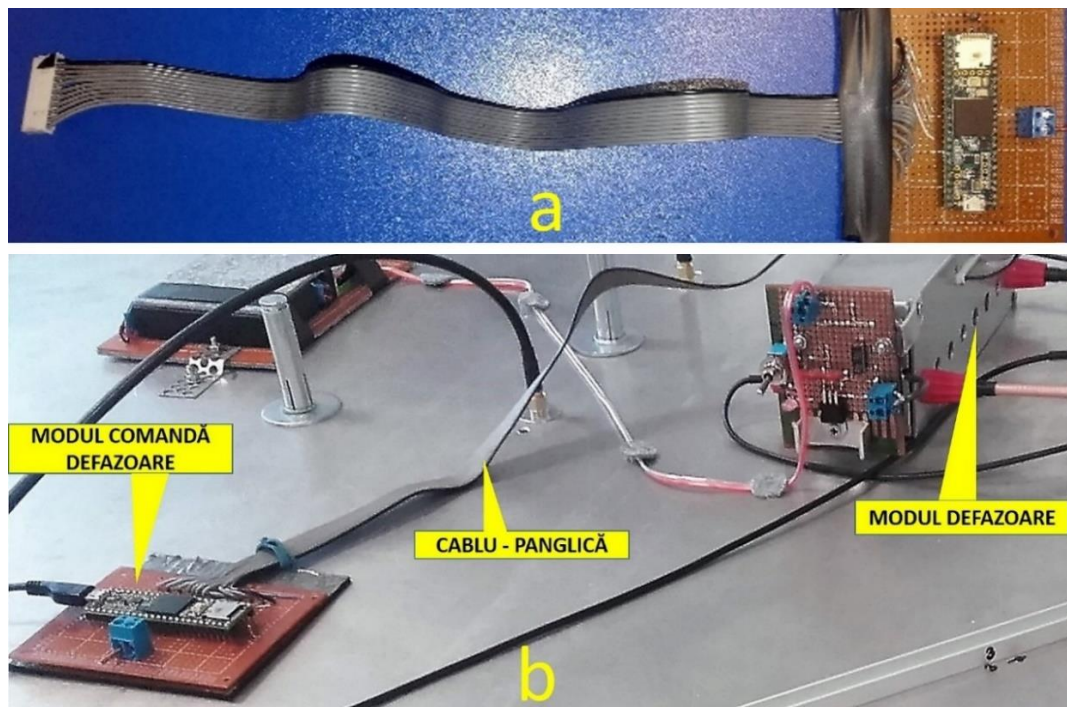


Figura III-6 Modulul de comandă pentru defazoarele cu AD8340. Se pot observa cablul-panglică pentru programarea defazoarelor (a). Configurație pentru testări preliminare ale modulului și defazoarelor (b).

Semnalul SCLK (Serial Clock) reprezintă semnalul de ceas, generat de către procesorul modului de comandă, și sincronizează funcționarea modului cu cea a convertoarelor. Semnalul CS (Chip Select) inițiază înregistrarea datelor în fiecare din cei patru regiștri aferenți DAC-urilor, la fiecare tranziție sus – jos, totodată selectând un anumit defazor. Pentru a realiza un anumit defazaj, circuitul AD8340 necesită două tensiuni diferențiale analogice, defazajul realizat de un defazor fiind o funcție de aceste două tensiuni. Astfel, fiecare din cele patru DAC-uri trebuie programat pentru a genera cele patru componente ale acestor tensiuni diferențiale. Aceste convertoare au fost notate de producător cu DAC A, DAC B, DAC C și DAC D, fiecare având o rezoluție de 16 biți. Prin configurarea hardware a modului de comandă a defazoarelor, datele seriale (SDI) și semnalul de ceas (SCLK) sunt furnizate pe aceeași magistrală. Figura III-8 prezintă schema modului de comandă a celor două defazoare.

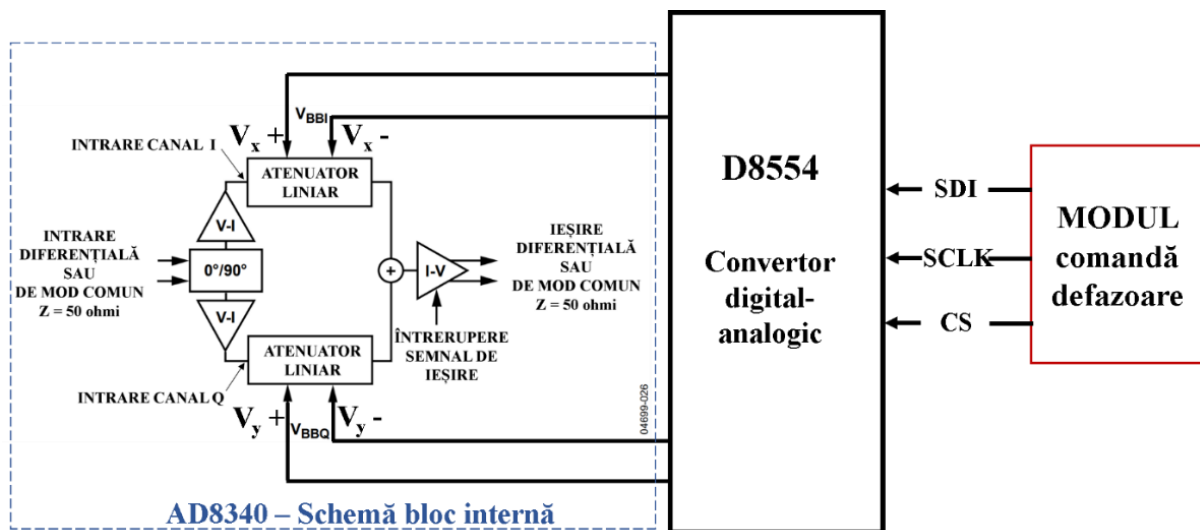


Figura III-7 Ilustrarea schematică a modalității de comandă a unui modulator vectorial AD8340. În stânga se poate observa schema simplificată a porțiunii de defazare din circuitul AD8340 (prelucrare după [77]).

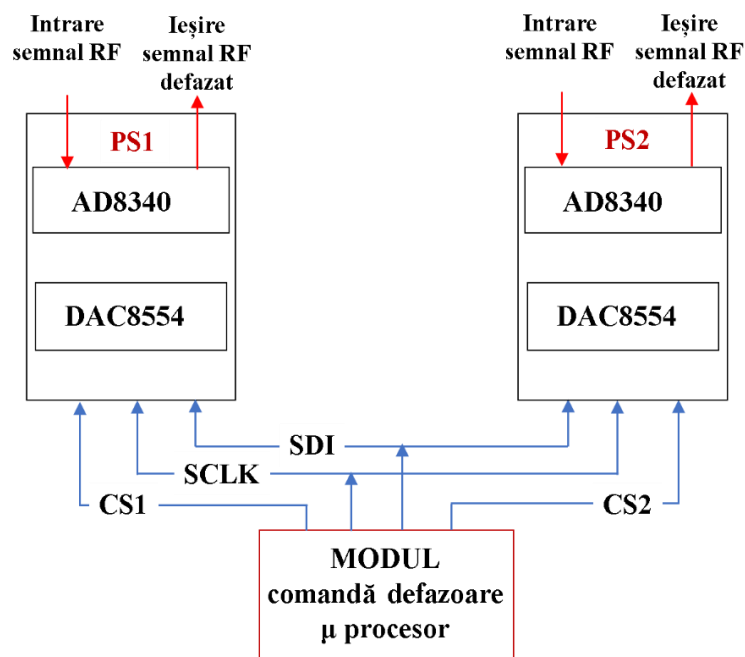


Figura III-8 Ilustrarea modului de comandă a două defazoare. Datele seriale (SDI) și semnalul de ceas (SCLK) sunt furnizate pe aceeași magistrală, iar defazorul PS_i în care sunt introduse datele este selectat la tranziția sus - jos a semnalului CS_i ($i = 1, 2$).

Prin intermediul software-ului de comandă, cele patru componente ale tensiunilor de comandă diferențiale, notate cu V_{y-} , V_{y+} , V_{x-} și V_{x+} , sunt convertite în numere binare, pentru fiecare defazor în parte, urmând a fi transmise în mod serial (prin interfața USB) de la sistemul de calcul la modulul de comandă a defazoarelor. Modulul de comandă înscrie valorile corespunzătoare în cele patru DAC-uri. Ca sistem de calcul se poate utiliza un PC, SBC (Single Board Computer), un RaspberryPi sau alt tip de sistem, ceea ce oferă flexibilitate în implementarea practică a sistemului. Aceeași procedură a fost aplicată pentru fiecare defazor care va alimenta în mod individual fiecare element al rețelei de antene fazate. După conversia digital - analogică, tensiunile diferențiale obținute au fost utilizate pentru comanda circuitului AD8340 pentru a genera defazajul semnalului RF. Software-ul de programare a microplatformei Teensy 3.6 a fost scris în versiunea de limbaj Arduino IDE adaptată, numită Teensyduino. În Figura III-9 este ilustrată diagrama logică simplificată a funcționării software-ului pentru comanda unui defazor. Pentru a comanda mai multe defazatoare în scopul implementării în rețele de antene fazate cu mai multe elemente, fiecare defazor este programat urmând aceeași schemă logică.

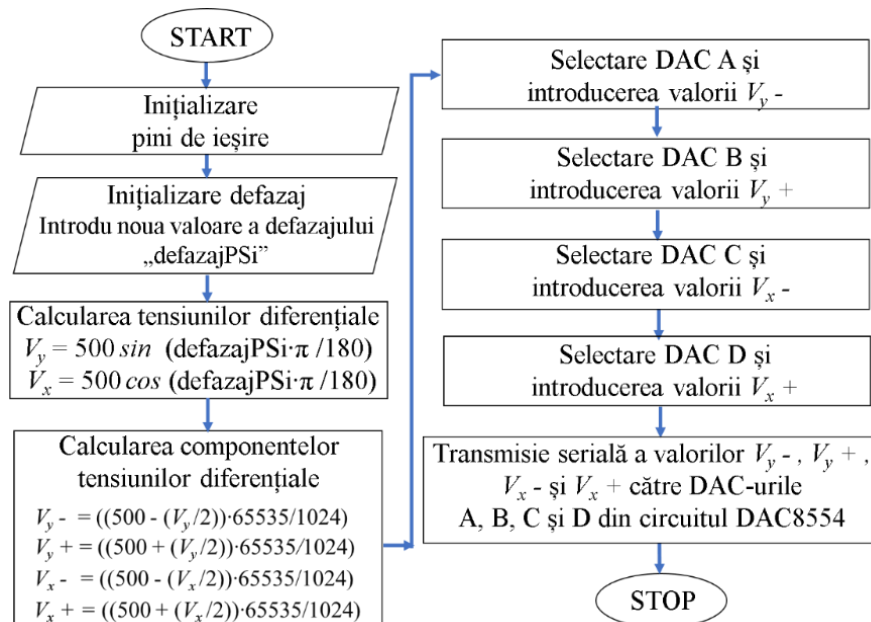


Figura III-9 Diagrama logică simplificată a funcționării software-ului de comandă a unui defazor. În cazul utilizării mai multor defazoare în cadrul rețelelor de antene, fiecare se programează urmând această diagramă.

III.3. Analiza efectului defazajelor între semnalele de alimentare ale elementelor rețelei de antene asupra caracteristicilor de directivitate

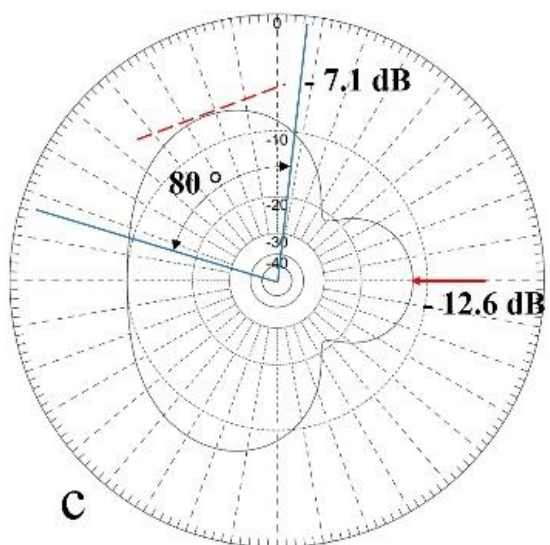
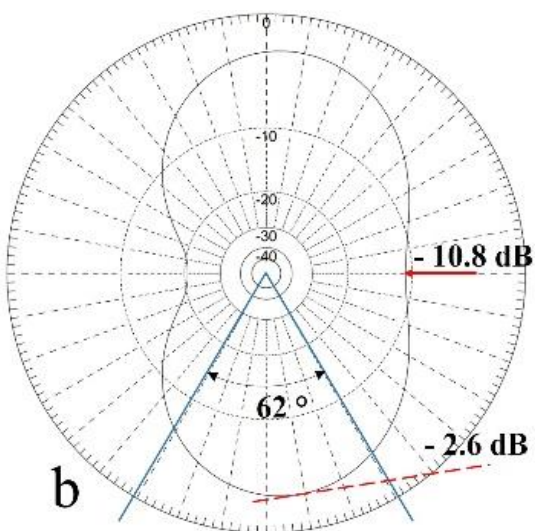
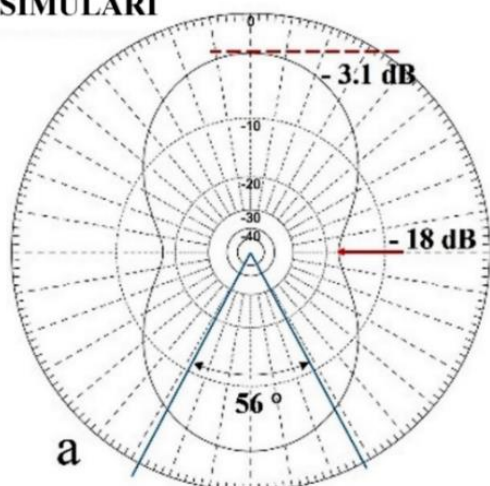
Rețeaua de antene propusă (AUT) a fost pregătită pentru modul de emisie. Pentru obținerea unei caracteristici de directivitate, poziționerul sistemului „LabVolt” a efectuat o rotație completă de la 0° la 360° în sensul acelor de ceasornic, împreună cu rețeaua, în jurul centrului planului de masă. O imagine a rețelei surprinsă în timpul măsurătorilor este prezentată în Figura III-10. Semnalele emise de rețeaua testată au fost recepționate de antena Yagi-Uda din componența echipamentului „LabVolt”, apoi amplificate și procesate în continuare de interfața de achiziție a datelor (DAQ), inclusă în acest echipament și trimise către un computer. Prin intermediul software-ului specializat al sistemului de măsurare (LVDAM-ANT), nivelul semnalului primit la intervale unghiulare fixe a fost înregistrat și procesat astfel încât să fie afișate caracteristicile de directivitate.



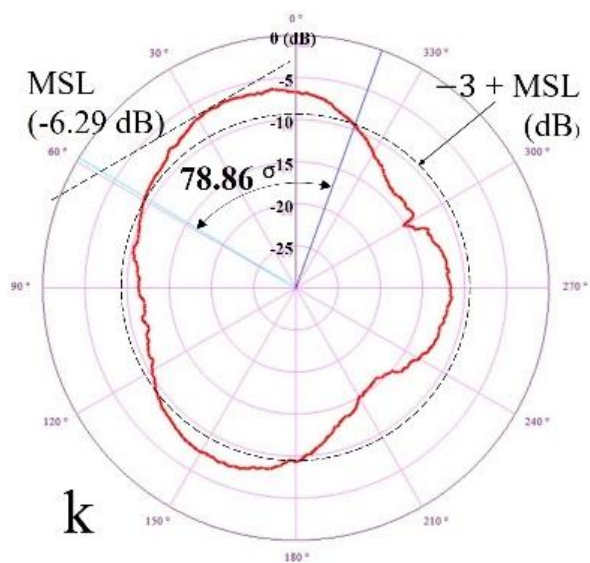
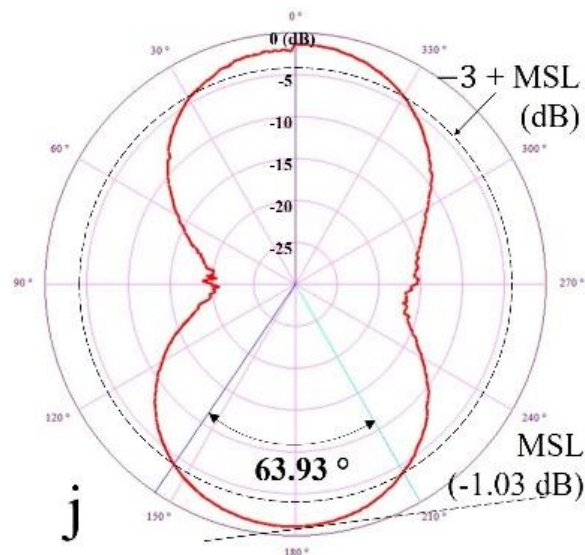
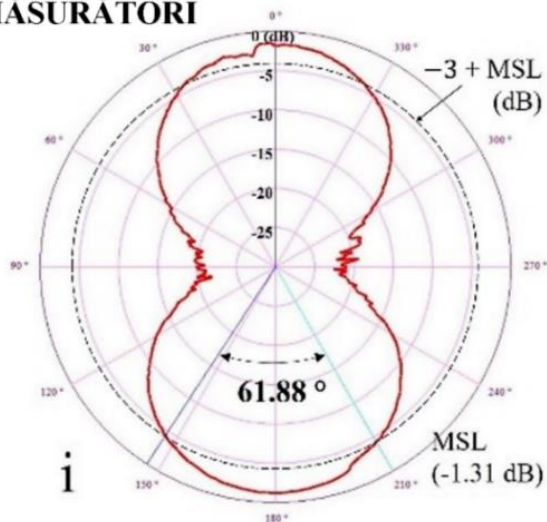
Figura III-10 Testarea diverselor poziții ale antenei de recepție Yagi-Uda relative la rețeaua de antene testată, în cadrul măsurătorilor caracteristicilor de directivitate.

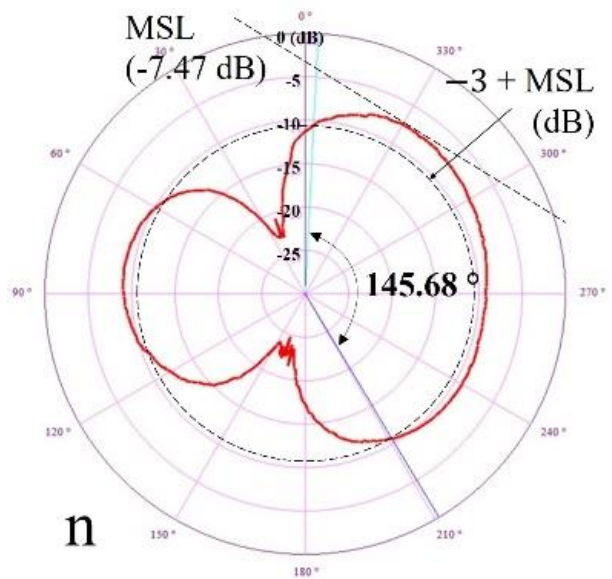
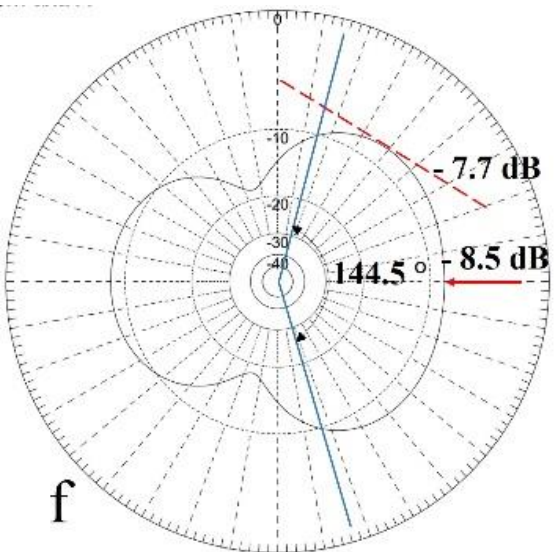
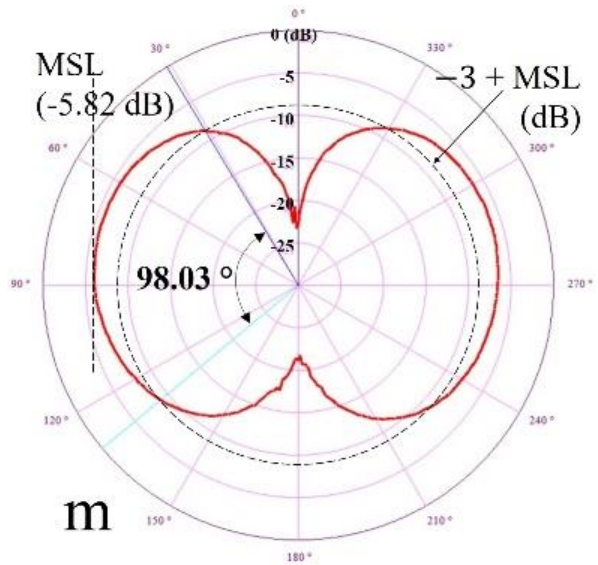
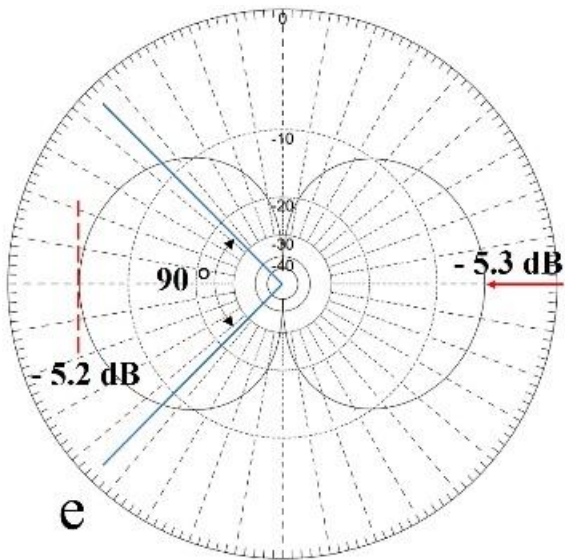
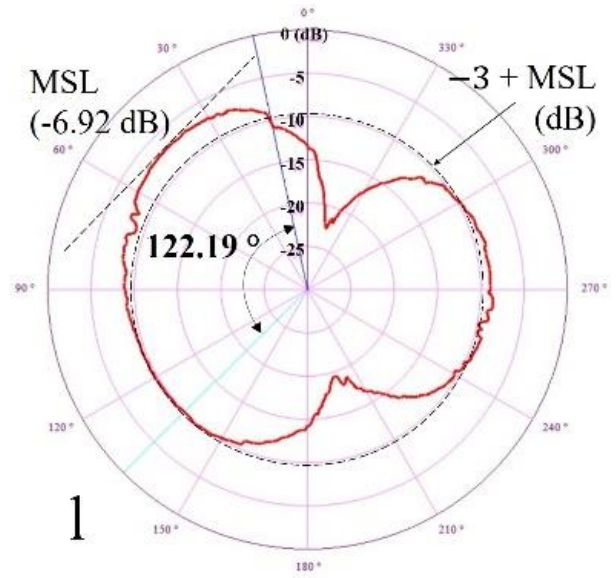
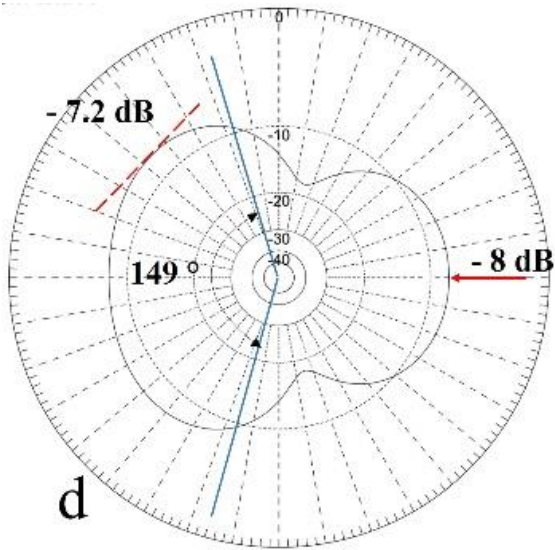
De asemenea, au fost validate rezultatele experimentale prin compararea lor cu cele obținute din simulări. Totodată a fost verificată corectitudinea funcționării modulului de comandă și a software-ului aferent dezvoltat. Figura III-11 (i-p) prezintă rezultatele măsurătorilor obținute și corespund defazajelor de 0° (i), 60° (j), 120° (k), 150° (l), 180° (m), 210° (n), 240° (o) și 270° (p) între semnalele de alimentare ale elementelor. Validitatea acestora a fost verificată prin comparația cu rezultatele simulărilor, prezentate în Figura III-11 (a-h). Rezultatele simulărilor și măsurătorilor, corespunzătoare aceluiași defazaj, sunt plasate în imagini adiacente. Accentul a fost pus pe evidențierea formelor lobilor principali în funcție de unghiurile de defazare, în concordanță cu rezultatele simulărilor corespunzătoare. Valorile amplitudinilor măsurate (exprimate în dB) sunt relative la puterea semnalului emis de rețea, în timp ce în simulare acestea sunt relative la radiatorul izotrop. Prin alegerea poziției antenei de recepție Yagi-Uda și a puterii semnalului emis de generatorul de semnal RF, s-a efectuat calibrarea configurației experimentale astfel încât nivelul maxim al semnalului să fie de 0 dB, corespunzând la defazajul de 0 grade, în acest caz. Diagramele de radiație rezultate corespund planului azimutal (planul H). Valorile MSL (Maximum Signal Level) au fost furnizate de echipamentul LabVolt și se referă la valoarea maximă a amplitudinii semnalului, relativă la întreaga caracteristică în planul azimutal, indiferent de defazajele introduse, păstrând constant unghiul de elevație. Pentru a evalua deschiderea lobilor principali corespunzători jumătății din putere (HPBW - Half Power Beamwidth), diagramele au fost completate cu un cerc auxiliar corespunzător valorii de -3 dB, valoare care prin adunarea cu valoarea MSL (de asemenea negative), a relevat HPBW a lobilor principali. Aceste valori (exprimate în grade) sunt prezentate în Figura III-11. Se poate observa că există o concordanță suficient de bună între rezultatele simulărilor și cele experimentale.

SIMULĂRI



MĂSURĂTORI





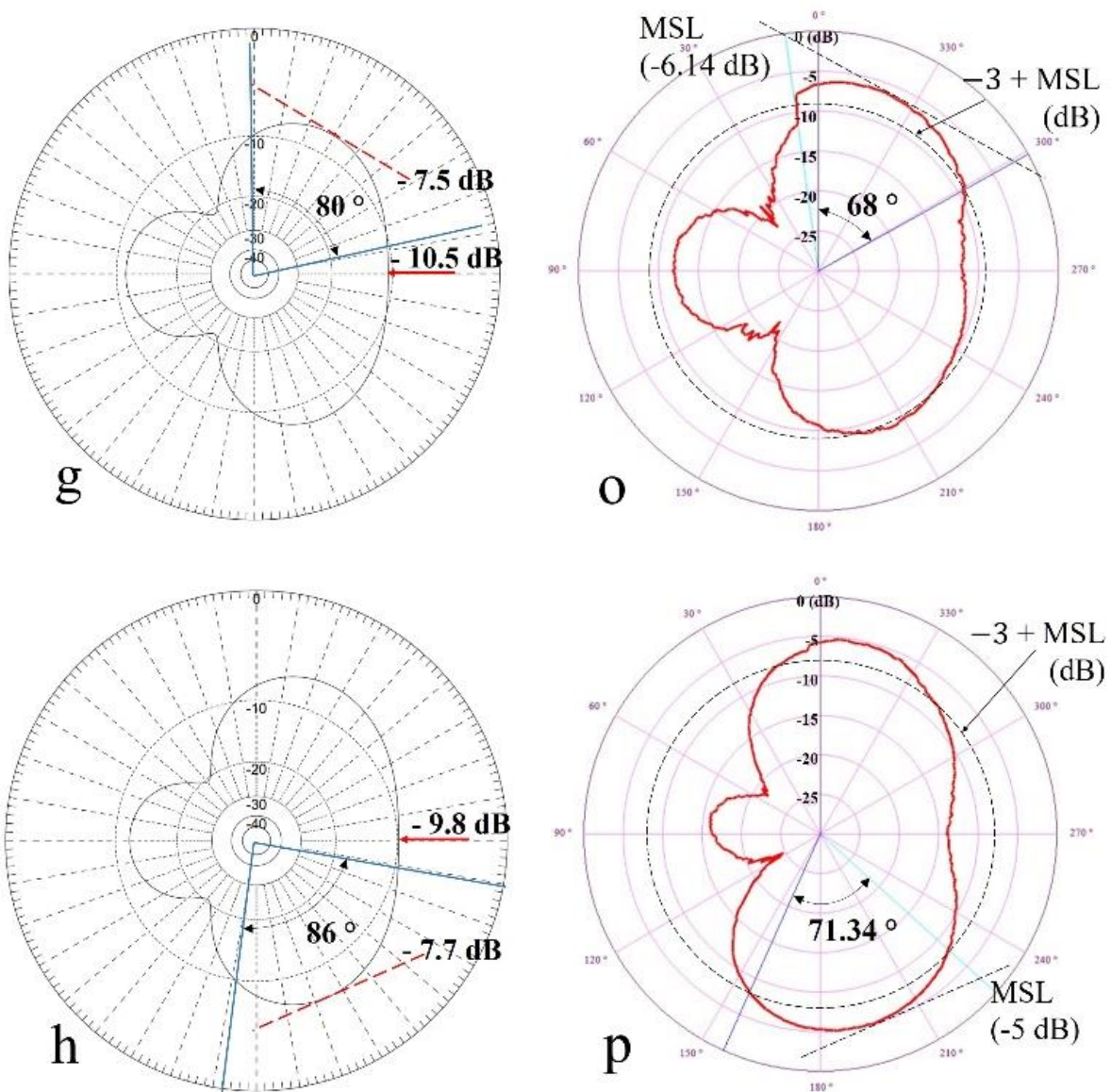


Figura III-11 Caracteristicile de directivitate simulate (a - h) și măsurate (i - p) ale rețelei de antene cu două elemente defazate în configurație $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru diferite defazaje dintre semnalele de alimentare ale elementelor.

III.4. Concluzii

Configurația atipică de $3\lambda/4$ (multiplu impar al lui $\lambda/4$) s-a dovedit a fi avantajoasă acolo unde se dorește obținerea unui câștig superior la unghiuri de elevații medii. Conform rezultatelor simulărilor obținute în Secțiunea III.1. din acest capitol și determinărilor experimentale pentru elementul $3\lambda/4$, se poate concluziona că pe un plan de masă metalic și suficient de larg, elementul în configurație $3\lambda/4$ depășește în câștig configurația larg utilizată a antenei $\lambda/4$ la unghiuri de elevație medie. În această lucrare s-a validat experimental câștigul obținut din simulările asupra elementului $3\lambda/4$. Rezultatele încurajatoare au determinat continuarea studiilor asupra rețelelor de antene cu 2 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, cu introducerea defazajelor între elemente.

Pentru realizarea rețelei de antene fazate cu două elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă a cărei proiectare și realizare practică a fost descrisă în detaliu în Secțiunea III.2. a acestui capitol, au

fost proiectate și realizate practic un modul de comandă a defazoarelor și a software-ului specific pentru comanda acestuia, în vederea programării defazajelor necesare rețelei.

S-au efectuat simulări ale caracteristicii de directivitate ale rețelei, introducând defazaje prestabilite între semnalele de alimentare ale elementelor, fără a calcula valorile defazajelor pentru unghiuri specifice de orientare a lobului principal de radiație. Ceea ce s-a urmărit în experimentele descrise în această secțiune a tezei a fost verificarea concordanței între simulările efectuate și măsurătorile reale în ceea ce privește efectele defazajelor asupra caracteristicilor de directivitate. Conformitatea între rezultatele simulate și cele măsurate au atestat corectitudinea funcționării modulului de comandă și a software-ului dezvoltat.

Amenajarea configurației de testare a rețelei de antene fazate prezentate a condus la o bună acuratețe a măsurătorilor caracteristicilor de directivitate în mediu de interior, prin minimizarea influențelor mediului și a hardware-ului auxiliar.

Versatilitatea planului de masă în cadrul rețelei oferă prin design posibilitatea extinderii cercetării asupra rețelelor de antene fazate multi-element, precum și studiul comportamentului acestora la frecvențe mai mari. A fost evidențiată eficiența metodei variației defazajelor dintre semnalele de alimentare ale elementelor rețelei în modelarea caracteristicii de directivitate.

Cercetările întreprinse au arătat posibilitatea realizării beamforming-ului în rețeaua de antene dezvoltată, dacă s-ar folosi defazaje controlate. Alegerea variantei planului de masă a condus la obținerea unor caracteristici de directivitate pure, fără lobi secundari, măbind și eficiența rețelei prin minimizarea pierderilor de radiație. Facilitățile oferite de designul setup-ului incluzând planul de masă, oferă și posibilitatea de testare a rețelelor cu elemente în diverse alte configurații.

Rezultatele bune obținute au furnizat o bază solidă pentru explorarea ulterioară a domeniului, determinând continuarea cercetărilor asupra unei rețele de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ cu directivitate controlată electronic prin orientarea lobului principal la unghiul dorit în planul azimutal, cu intenția de a fi implementată în sisteme de recepție satelitară LEO.

CAPITOLUL IV REȚEA DE ANTENE FAZATE CU 4 ELEMENTE PENTRU COMUNICAȚII SATELITARE LEO

Acest capitol se concentrează asupra proiectării și realizării practice a unei rețele planare de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, adaptată pentru modul de recepție. Prin designul sistemului și caracteristicile elementelor $3\lambda/4$, a modului de implementare a acestora și a celorlalte componente hardware utilizate pentru o funcționare adecvată, rețeaua de antene fazate propusă în acest capitol oferă un potențial semnificativ în completarea sistemelor de recepție a sateliților LEO, contribuind la creșterea acoperirii comunicațiilor. Sistemul propus [83] reprezintă un prototip realizat și testat în mediu academic. Comparații între rezultatele diverselor măsurători și cele obținute din simulări pentru câmp îndepărtat asupra rețelei propuse au validat funcționalitatea conceptului și au deschis perspective promițătoare pentru dezvoltări ulterioare.

IV.1. Realizarea practică a rețelei planare de antene fazate cu 4 elemente pe plan de masă

Figura IV-1 ilustrează rețeaua de antene propusă proiectată cu MMANA-GAL, configurată în topologie pătratică, în care cele 4 elemente $3\lambda/4$ au fost plasate la distanța de $\lambda/2$. Deoarece în realizarea practică a rețelei planul de masă este din aluminiu, pentru acesta au fost introduși parametrii: $\epsilon_r = 500$ și $\sigma = 100000$ mS/m. Ca frecvență centrală de acordare s-a ales mijlocul benzii de frecvențe (435 - 438) MHz, respectiv 436,5 MHz. Din cauza efectelor cuplajului mutual dintre elementele rețelei, s-a concluzionat că fiecare dintre elemente trebuie acordat la rezonanța de aproximativ 406 MHz iar în implementarea practică lungimile inițiale ale acestora vor fi apropiate de 54,31 cm.

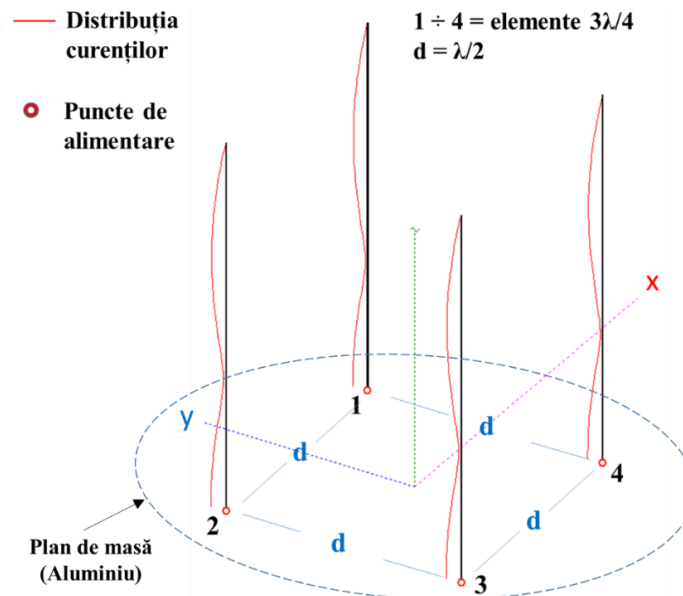


Figura IV-1 Rețeaua de antene pătratică cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, care reprezintă partea radiantă a rețelei de antene fazate.

În abordarea sistematică a realizării practice a rețelei de antene fazate, etapele parcurse au fost atent planificate și au constat în parcurgerea unor pași esențiali pentru funcționarea adecvată a întregului sistem. Pentru minimizarea reflexiilor semnalului în întreg sistemul de antene fazate s-a urmărit obținerea unui SWR cât mai apropiat de 1.0 (valoarea ideală). De asemenea, s-au

verificat impedanțele fiecărui element pe planul de masă, continuând apoi cu verificarea stabilității impedanței a întregii rețele, după fixarea celor 4 elemente pe acest plan. Este necesar ca valorile acestor impedanțe să fie de 50 ohmi pentru o adaptare corectă la impedanțele celorlalte componente hardware ale sistemului, care au aceeași impedanță caracteristică.

Structura rețelei de antene fazate include: partea radiantă, planul de masă și partea hardware.

Partea radiantă. Ca elemente verticale monopole ale rețelei, ce constituie partea radiantă a sistemului de antene fazate, au fost alese antene telescopice identice, deoarece oferă avantajul simplificării proceselor de acordare pe frecvențele de rezonanță dorite. La punctele de alimentare ale acestora s-au fixat prin cositorire conectori SMA (producător Amphenol), rezultând patru elemente aproape identice. În prima fază a realizării practice fiecare din elemente a fost fixat pe planul de masă și acordat individual la frecvența de aproximativ 406 MHz, ca urmare a celor arătate mai sus. În Figura IV-2 se poate vedea rețeaua de antene pătratică cu 4 elemente pe plan de masă în timpul măsurătorilor parametrilor electrici. După acordarea fină a rețelei s-a obținut un VSWR apropiat de 1,06 la frecvența de 436,5 MHz. Rezultatele măsurătorii VSWR după acordarea fină a rețelei de antene propuse la frecvența de rezonanță de aproximativ 436,5 MHz se pot observa în Figura IV-3.

Planul de masă a fost realizat din placă de aluminiu cu grosimea de 1,5 mm, prelucrată în formă discoidală cu diametrul de 1 m, suficient de mare pentru ca distanța de la elemente până la marginea planului să fie mai mare sau egală cu $\lambda/4$ (condiție minimă pentru planul de masă).

Partea hardware a sistemului propus a fost fixată pe partea inferioară a planului de masă, opusă celei care conține partea radiantă și include componentele pasive și electronica hardware, necesare pentru funcționarea corectă a sistemului.

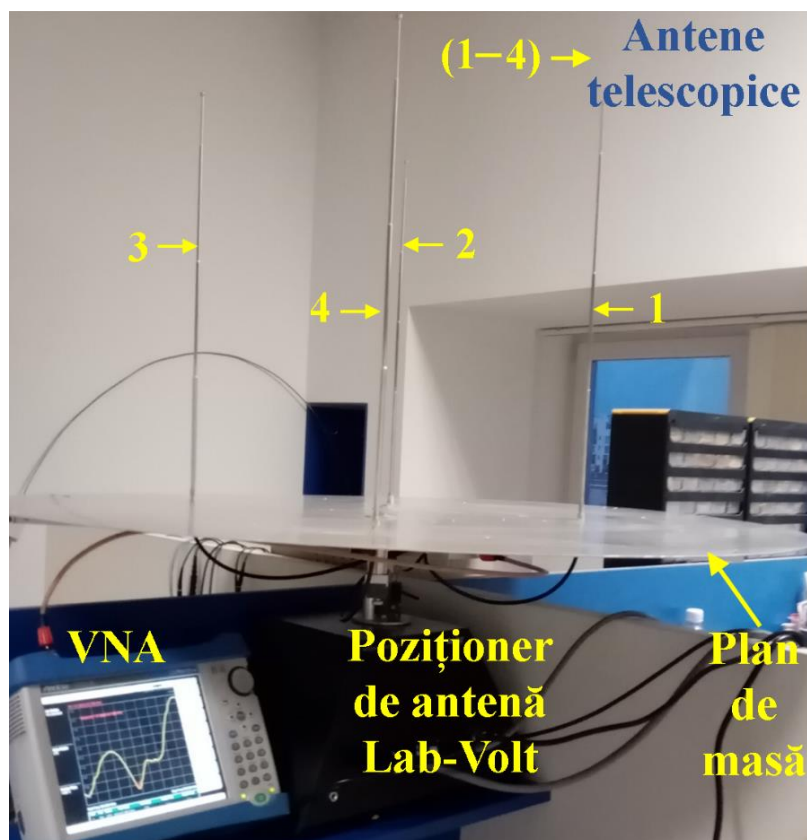


Figura IV-2 Configurația utilizată pentru măsurarea parametrilor electrici ai rețelei de antene pătratică cu patru elemente (partea radiantă a rețelei de antene fazate) în timpul procesului de reglare fină a lungimilor elementelor pentru frecvența de rezonanță a rețelei de antene de aproximativ 436,5 MHz.

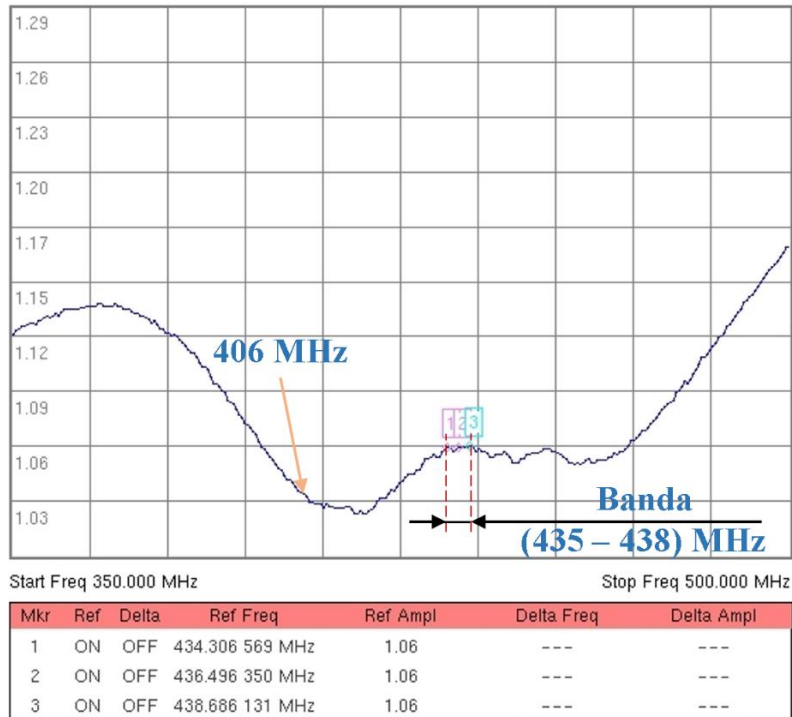


Figura IV-3 Rezultatele măsurătorii VSWR după acordarea fină a rețelei de antene propuse la frecvența de rezonanță de aproximativ 436,5 MHz.

Toate componentele radio au fost ecranate electromagnetic și conectate electric la planul de masă, care la rândul său a fost conectat la sistemul de împământare. În Figura IV-4 se poate observa partea hardware a rețelei de antene fazate în care componentele pasive și electronica hardware au fost fixate pe planul de masă, în partea opusă celei care conține elementele radiante. Pentru rețeaua de antene propusă în acest capitol s-a considerat necesară proiectarea și realizarea practică a unui nou **modul de control al orientării lobului principal al rețelei**. Imaginea mărită a acestui modul este prezentată în Figura IV-5, în care se pot observa sumatorul de semnale (Splitter/Combiner) [84], defazoarele, modulul de comandă al defazoarelor și interfața USB de comunicație cu sistemul de calcul (PC), montate pe același PCB. Defazoarele și modulul de comandă au fost integrate într-un submodul demontabil pentru a fi utilizabil și în alte tipuri de rețele de antene. În rețeaua de antene fazate propusă s-au integrat defazoarele de radiofrecvență disponibile [85], bazate pe modulul vectorial integrat AD8340 [77] produs de Analog Devices. Funcționalitatea acestora a fost testată la frecvența de 435 MHz. Rezultatele acestor teste au validat capacitatea lor de a funcționa la un nivel acceptabil în domeniul de frecvențe care include 435 MHz, situat sub domeniul specificat în mod oficial în datele de catalog ale acestui circuit. Pentru **modulul de comandă a defazoarelor** rețelei cu 4 elemente a fost utilizată microplatforma de dezvoltare Teensy 4.0, de înaltă performanță, având la bază microprocesorul ARM Cortex-M7 a cărui frecvență de clock standard este de 600 MHz, având posibilitatea de overclock până la 1 GHz. Capacitatea memoriei RAM este 1024K iar interfața USB poate atinge viteza de 480 Mbit/sec [86]. Funcția principală a acestui modul constă în programarea defazoarelor conținute în modulul de control al orientării lobului principal de radiație al rețelei de antene fazate. În Figura IV-5 se poate observa poziționarea acestui modul pe placa de bază a modulului de control al orientării lobului principal al rețelei de antene fazate. **Sistemul de alimentare** se bazează pe o baterie de acumulatori fabricați în tehnologie LiFePO4. Capacitatea mare a sursei de alimentare asigură o autonomie energetică de aproximativ 20 de ore pentru rețeaua de antene fazate, în cazul implementării acesteia într-un sistem de recepție a sateliților LEO.

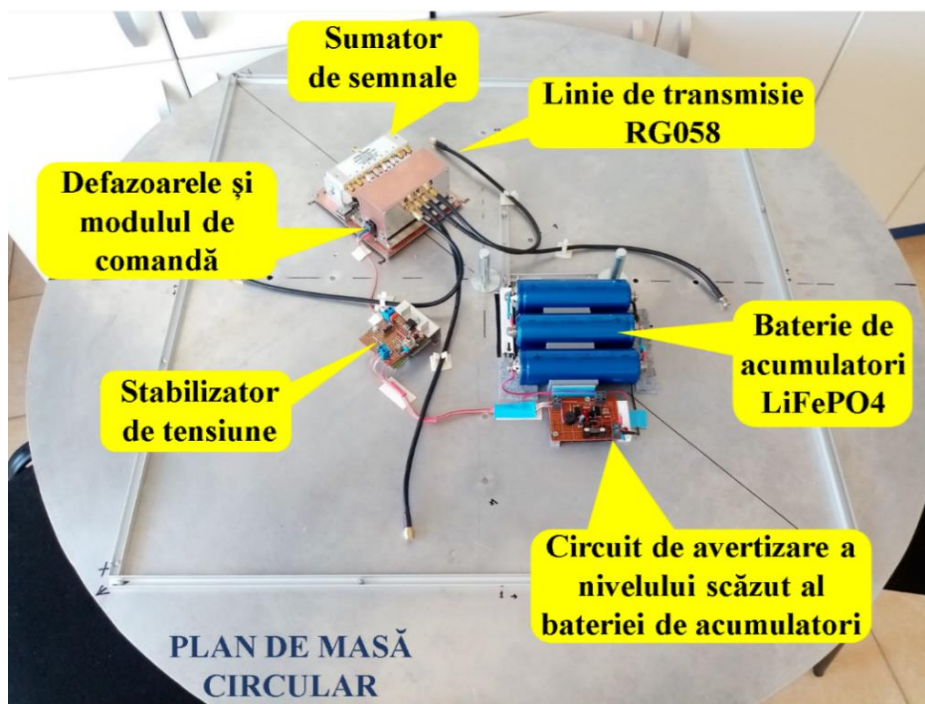


Figura IV-4 Partea hardware a rețelei de antene fazate. Componentele pasive și cele electronice au fost fixate pe planul de masă, în partea opusă celei care conține elementele radiante.

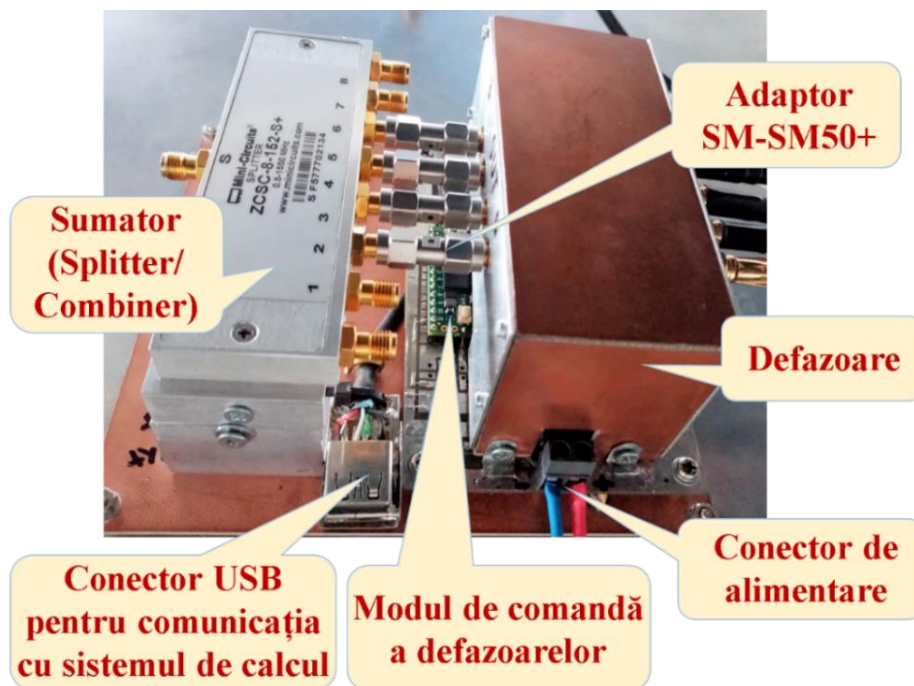


Figura IV-5 Imagine mărită a modulului de control al orientării lobului principal de radiație al rețelei de antene fazate propuse.

Software-ul de control al orientării lobului principal al rețelei de antene fazate. Pentru comanda celor patru defazoare a fost folosit același software ca cel descris în Secțiunea III.2., bazat pe aceeași diagramă logică pentru fiecare defazor în parte. Singurele modificări s-au făcut doar în configurarea pinilor de ieșire și a ferestrei de introducere a defazajelor pentru comanda a patru defazoare, precum și micșorarea întârzierilor între subrutinele de transmitere a datelor către modulul de comandă a defazoarelor.

IV.2. Analiza experimentală a diagramelor de radiație ale rețelei propuse

Această secțiune a tezei oferă prezentarea și analiza rezultatelor măsurătorilor diagramelor de radiație ale rețelei de antene fazate propuse, efectuate în două medii distincte. Într-o primă fază, testele au fost efectuate într-un laborator de cercetare al Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava, fiind urmate de măsurători în camera semi-anecoică din laboratorul de compatibilitate electromagnetică din cadrul acestei universități. Alegerea acestor două medii diferite de măsurare a fost determinată de necesitatea verificării reproductibilității și validității rezultatelor obținute. De asemenea, compararea între aceste rezultate permite identificarea diferențelor și asemănarilor, oferind o perspectivă mai cuprinzătoare asupra comportamentului rețelei propuse, în diferite medii de testare. Atât în măsurătorile de laborator cât și în cele efectuate în camera semi-anecoică, pentru a obține diagramele de radiație ale rețelei a fost utilizat echipamentul de laborator Lab-Volt, care a inclus poziționerul de antenă și interfața de achiziție de date (DAQ). Rețeaua de antene propusă a reprezentat AUT (Array Under Test) și a fost instalată în modul de recepție. O antenă Yagi-Uda a fost folosită în modul de emisie ca antenă de testare pentru AUT. După cum se poate observa în Figura IV-6, pentru această antenă a fost adaptat un sistem de montare a trepidului cu diverse facilități de reglare mecanică, astfel încât antena de testare să poată fi fixată în diferite poziții în raport cu rețeaua de antene testată. Ca semnal de alimentare a antenei Yagi-Uda, un generator RF Agilent N5182A (MXG Vector Signal Generator) a fost configurat la o frecvență de 436,5 MHz. După cum se poate vedea în Figura IV-6, antena de testare Yagi-Uda a fost poziționată pentru măsurători ale diagramelor de radiație corespunzătoare unei elevații de aproximativ 42° , astfel încât axa sa să fie de-a lungul axei Ox a rețelei de antene fazate testate. Aceasta a fost considerată ca axa care trece prin centrul planului de masă al rețelei și paralelă cu liniile imaginare care unesc elementele 1 și 2, respectiv 3 și 4. Distanța dintre centrul rețelei de antene și vârful antenei Yagi-Uda a fost de aproximativ 1,5 m.



Figura IV-6 Configurația de laborator pentru măsurarea diagramelor de radiație ale rețelei de antene propuse. Raportorul a fost folosit pentru fixarea antenei Yagi-Uda la aproximativ 42° elevație față de centrul rețelei.

Configurația utilizată în camera semi-anechoică pentru măsurarea caracteristicilor de directivitate ale rețelei se poate observa în Figura IV-7. Pentru măsurarea caracteristicilor de directivitate, rețeaua de antene propusă împreună cu echipamentul Lab-Volt au fost instalate în camera semi-anechoică. Antena log-periodică a fost utilizată în modul emisie. Un generator de radiofrecvență a fost configurat pentru emisia unui semnal sinusoidal cu frecvența de 436,5 MHz (frecvența pe care s-a acordat rețeaua de antene testată) modulat cu un semnal sinusoidal de 1 KHz, astfel încât semnalul emis, care a alimentat antena log-periodică, să fie compatibil cu echipamentul Lab-Volt. Condițiile oferite de camera semi-anechoică au permis mărirea distanței între vârful antenei de test și centrul rețelei testate la aproximativ 4 m pentru o elevație de 42°. Procedura de obținere a diagramelor a fost similară cu cea urmată în laborator.

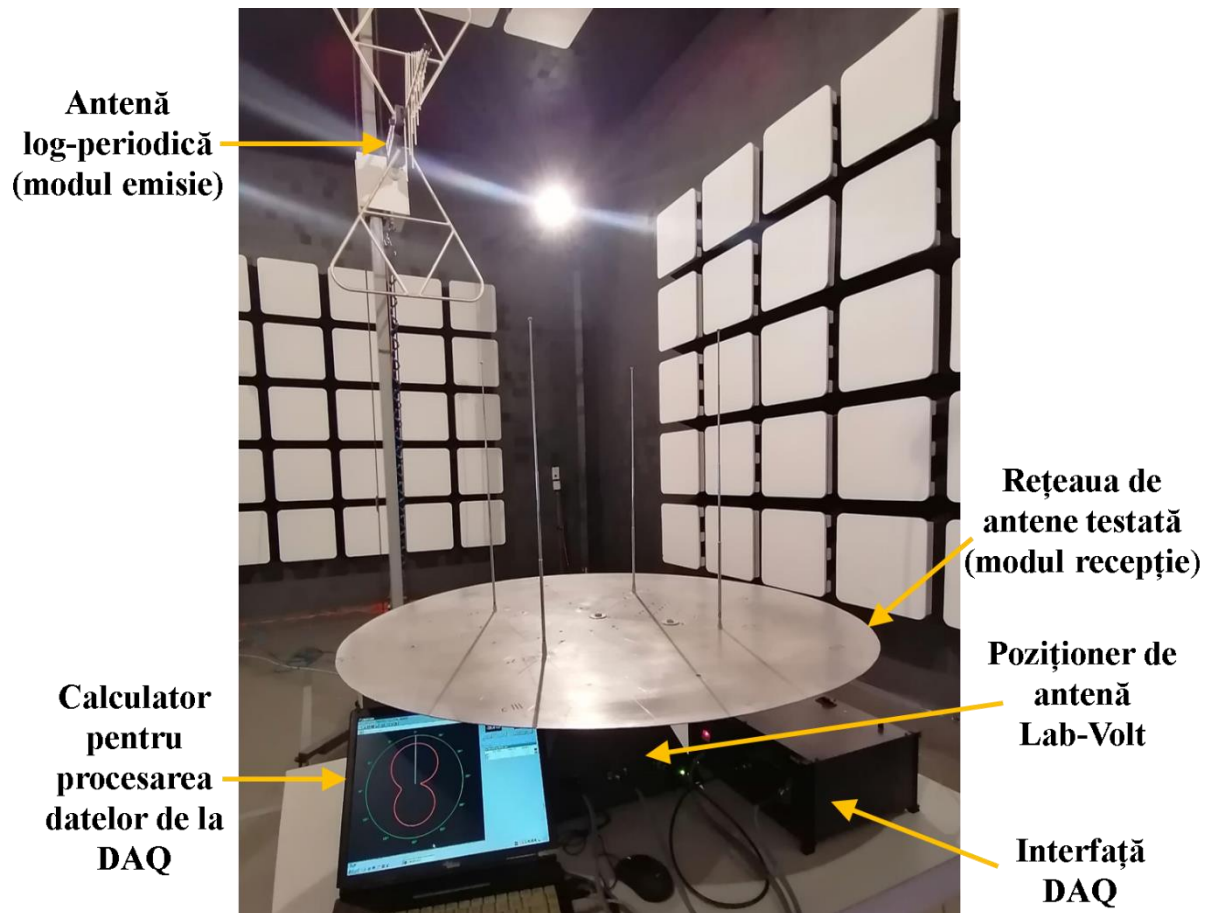
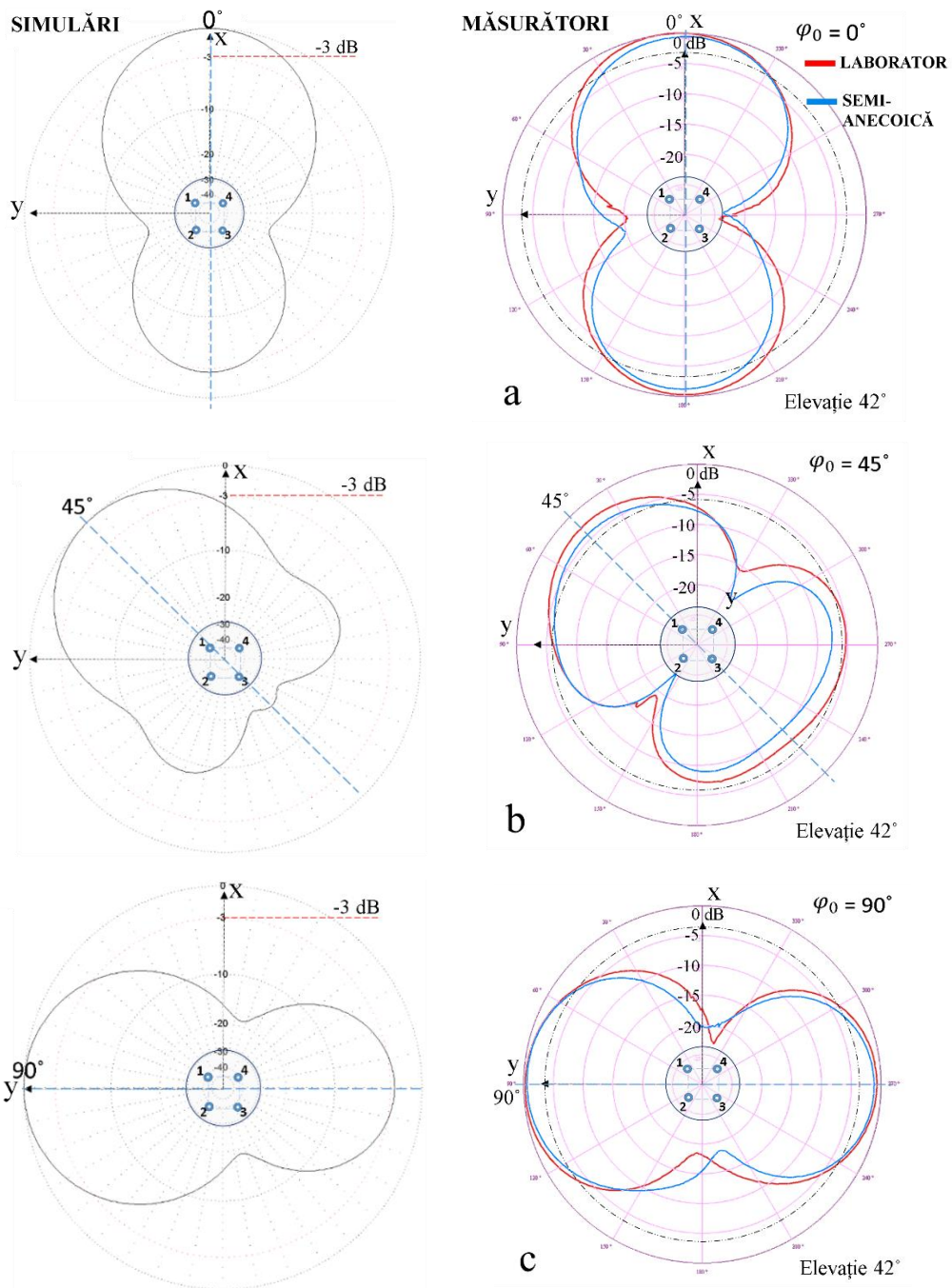
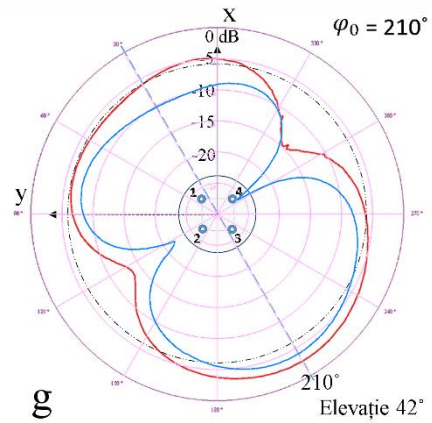
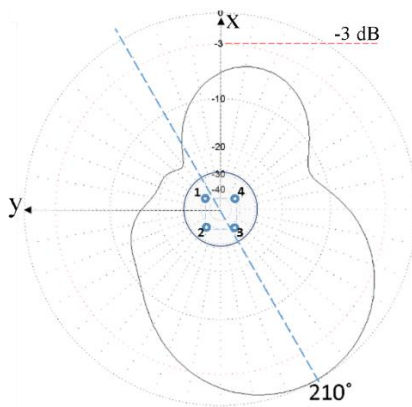
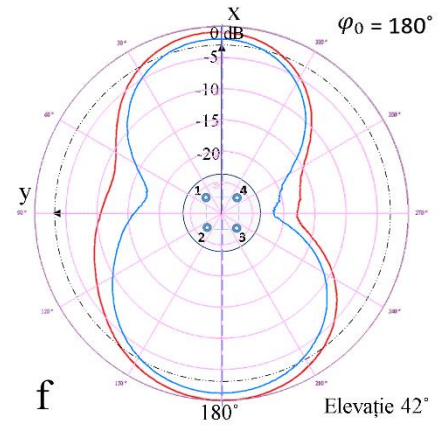
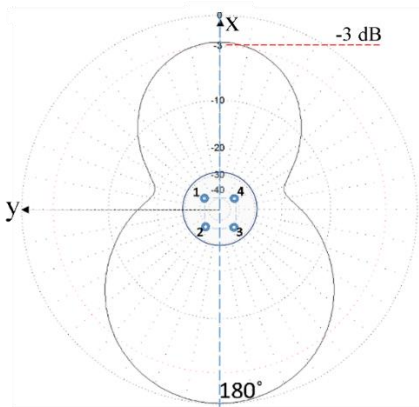
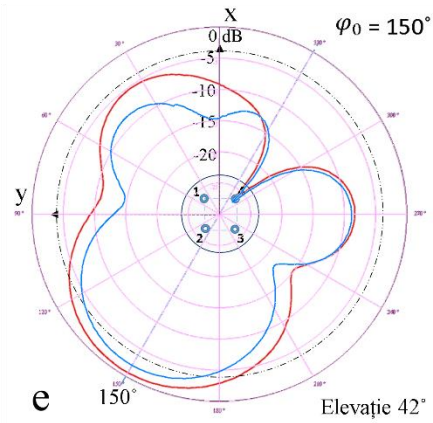
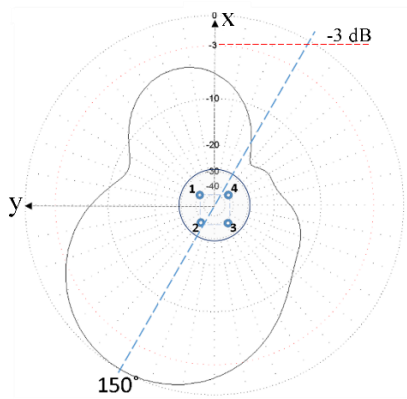
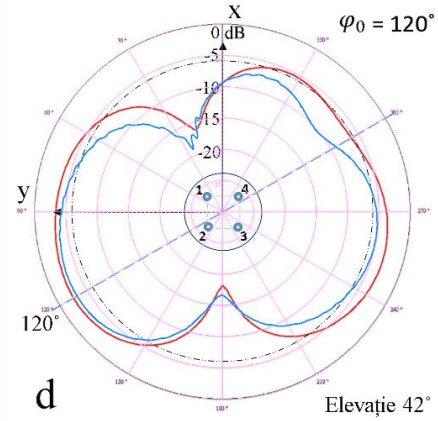
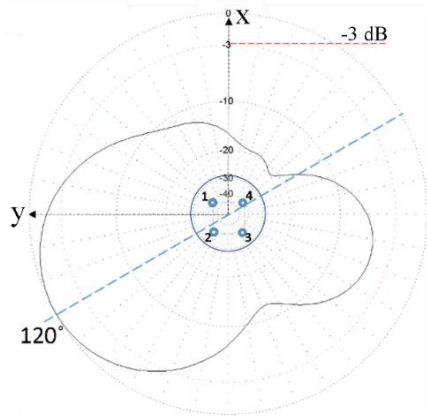


Figura IV-7. Configurația de măsurare instalată în camera semi-anechoică a laboratorului de compatibilitate electromagnetică din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava.

Rezultatele obținute în cele două medii de măsurare ale diagramelor de radiație ale rețelei au fost suprapuse și prezentate în Figura IV-8. Diagramele obținute în laboratorul de cercetare sunt reprezentate în culoare roșie, iar cele obținute în camera semi-anechoică sunt reprezentate în culoarea albastră. Rezultatele simulărilor și măsurărilor corespunzătoare aceluiași unghi de orientare al rețelei sunt prezentate în imagini adiacente. Simulările sunt ilustrate în figurile din partea stângă, iar rezultatele experimentale în cele din partea dreaptă a figurii. Planul de masă al rețelei a fost simbolizat printr-un cerc și elementele sale au fost numerotate de la 1 la 4, așa cum se poate vedea în Figura IV-8. Din analiza rezultatelor ilustrate în această figură se poate constata că, pornind de la valorile de referință ale defazajelor deduse teoretic, s-a atins scopul propus, respectiv de orientare a lobului principal al rețelei către unghiul dorit în planul azimutal, a cărui valoare a fost setată în software-ul de comandă a modului de control al lobului principal. În cadrul experimentelor aceste valori au fost ajustate ușor, cu o variație de

aproximativ $\pm 10\%$, în funcție de unghiurile de orientare, în scopul realizării direcționării cât mai precise a lobului principal. Se pot remarca anumite diferențe între formele modelelor de radiație obținute din rezultatele experimentale și cele provenite din simulări, însă aspectul cel mai important constă în menținerea unghiului de orientare dorit, al lobului principal al rețelei. Aceste diferențe sunt inerente și câteva dintre cauzele acestora includ: precizia limitată a software-ului de analiză și proiectare a antenelor, efectele mediului de măsurare, erorile echipamentelor de măsurare și toleranțe ale elementelor rețelei de antene sau ale altor componente pasive și active (linii de transmisie, componente electronice, inclusiv defazoare).





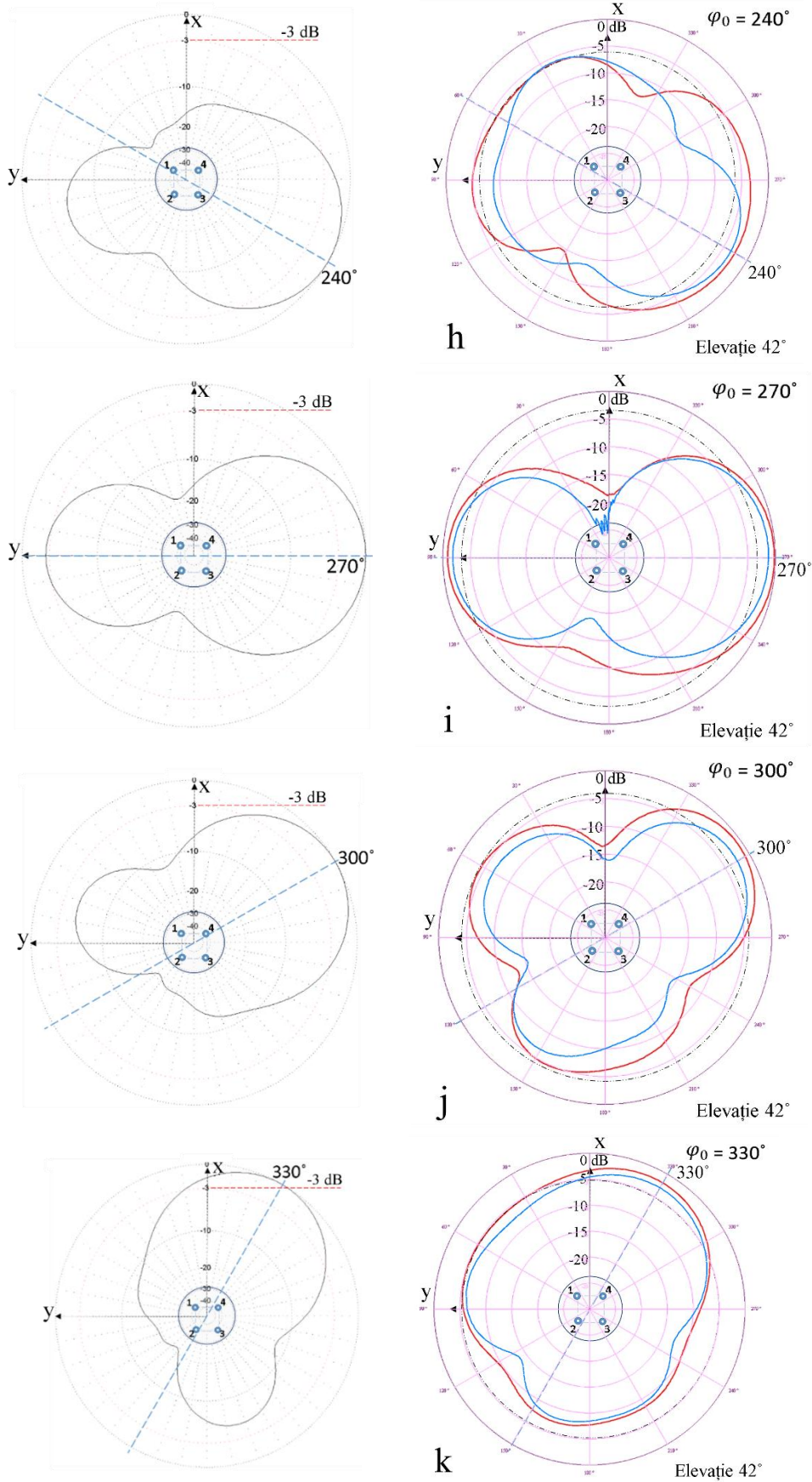


Figura IV-8 Diagramele de radiație simulate (stânga) și măsurate (dreapta) ale rețelei de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.

În simulările ilustrate în Figura IV-8, HPBW al unui lob principal poate fi determinat prin estimarea valorii unghiului central ale cărui segmente sunt situate de fiecare parte a punctului maxim al lobului și intersectează cercul auxiliar corespunzător câștigului de -3 dB. Acesta are un diametru constant pentru orice unghi de orientare al lobului deoarece software-ul de simulare normalizează automat modelele de radiație la 0 dB, indiferent de acest unghi.

Ca urmare a procesării datelor obținute în timpul măsurării fiecărei diagrame, au fost calculate valorile HPBW prin intermediul software-ului LVDAM-ANT. Acestea sunt prezentate în Tabelul IV-1. În simulări HPBW are o valoare constantă de 80°. Media valorilor HPBW obținută din măsurătorile în laborator este de aproximativ 83,36°, iar cea corespunzătoare măsurătorilor din camera semi-anechoică este de aproximativ 73,5°. Prin coroborarea rezultatelor simulărilor cu cele experimentale obținute în cele două medii de interior, se poate ajunge la o înțelegere mai detaliată a cauzelor diferențelor dintre valorile HPBW pentru diferite unghiuri de orientare ale lobului principal. Cu toate aceste diferențe, pentru o rețea de antene proiectată pentru banda de frecvențe (435-438) MHz, un HPBW între 54° și 90° (valorile extreme obținute în camera semi-anechoică) este adecvat pentru recepția sateliților LEO, deoarece poate oferi o acoperire azimutală suficient de largă a zonei de trecere a satelitului. Analizând caracteristicile din Figura IV-8, raportul F/B al rețelei propuse poate fi evaluat cu ajutorul liniilor albastre punctate, care trec prin maximele lobilor principali și centrul rețelei. Valorile F/B prezentate în Tabelul IV-1 au rezultat din diferențele dintre maxime și cele corespunzătoare direcțiilor diametral opuse. Pentru majoritatea unghiurilor de orientare în plan azimutal, valorile raportului F/B obținute în camera semi-anechoică sunt mai mari decât cele rezultate în mediul de laborator. Totuși, atât în simulări cât și în măsurători, maximele și minimele F/B sunt similare între ele pentru fiecare unghi de orientare al lobului principal.

Tabelul IV-1 Valorile HPBW și F/B rezultate din diagramele de radiație simulate, respectiv măsurate, corespunzătoare diferitelor unghiuri de orientare în planul azimutal, ale lobului principal al rețelei propuse.

φ_0	HPBW Azimut			F/B Azimut		
	Simulat	Măsurat (Laborator)	Măsurat (Semi-anechoică)	Simulat	Măsurat (Laborator)	Măsurat (Semi-anechoică)
0°	80°	≈ 76°	≈ 67°	2.5 dB	≈ 0.5 dB	≈ 0,9 dB
45°	80°	≈ 80°	≈ 90°	19 dB	≈ 5 dB	≈ 6,8 dB
90°	80°	≈ 80°	≈ 70°	2.5 dB	≈ 0.5 dB	≈ 1,2 dB
120°	80°	≈ 98°	≈ 80°	16 dB	≈ 3.75 dB	≈ 6,5 dB
150°	80°	≈ 77°	≈ 64	16 dB	≈ 14 dB	≈ 14 dB
180°	80°	≈ 80°	≈ 70°	2.5 dB	≈ 1 dB	≈ 1 dB
210°	80°	≈ 87°	≈ 90°	16 dB	≈ 3.5 dB	≈ 6.5 dB
240°	80°	≈ 105°	≈ 65°	16 dB	≈ 3.5 dB	≈ 5,7 dB
270°	80°	≈ 80°	≈ 73°	2.5 dB	≈ 0.7 dB	≈ 0,7
300°	80°	≈ 62°	≈ 54°	16 dB	≈ 11 dB	≈ 9,3 dB
330°	80°	≈ 92°	≈ 85°	16 dB	≈ 6.5 dB	≈ 6,7 dB

Modalitățile de abordare analizate și testate în cadrul rețelelor de antene fazate cu intenția de a fi implementate în sisteme de comunicații satelitare LEO pot fi rezumate la trei categorii, care presupun utilizarea liniilor de întârziere [25], a receptoarelor SDR coerente [26] și a modulatorilor vectoriale. În cercetarea din cadrul acestei teze, metoda abordată a fost cea bazată pe implementarea modulatorilor vectoriale integrate. Tehnica de defazare bazată pe rețele de linii de întârziere oferă o rezoluție mică a direcționării fasciculului de radiație, datorită defazajelor predefinite impuse prin proiectare. De asemenea, acest lucru implică cerințe de proiectare relativ complicate. Tehnica ce utilizează receptoare SDR coerente pentru defazare, deși oferă o rezoluție unghiulară mare în direcționarea fasciculului și capacitatea de urmărire simultană a mai multor sateliți, este costisitoare. În plus, puterea de procesare necesară este foarte mare. Un alt dezavantaj îl constituie întârzierile semnificative ale semnalelor RF procesate, cauzate de factori care includ complexitatea sistemului. Rețeaua de antene fazate propusă oferă o rezoluție mare a direcționării lobului principal de radiație (practic mai mare de 1° în planul azimutal), necesitând o putere de calcul redusă pentru controlul directivității. Aceste avantaje sunt oferite de modulatorii vectoriale integrate, utilizate în tehnica de defazare. În plus, sistemul propus are avantajele simplității constructive, capacitatea de a orienta lobul principal la orice unghi în intervalul de la 0° la 360° și întârzieri mici ale semnalelor RF procesate.

O aplicație potențială a sistemului propus este ilustrată schematic în Figura IV-9. Sistemul de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ poate fi adecvat pentru sistemul de recepție bazat pe principiul prezentat în această figură, funcționalitatea sistemului propus fiind demonstrată în această secțiune a lucrării de față. Pentru claritate, rețeaua de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ a fost delimitată cu un contur dreptunghiular punctat, pentru a se distinge de celelalte elemente din lanțul de recepție. Semnalele primite de fiecare element al rețelei sunt defazate în mod controlat și apoi sunt însumate. Semnalul RF rezultat este folosit de receptorul stației de sol pentru a recepționa informațiile transmise de sateliții LEO.

Anumite valori ale defazajelor elementelor corespund unui anumit unghi de orientare în planul azimutal, al lobului principal al rețelei. Sistemul de calcul, care poate fi un Raspberry Pi, PC sau un alt tip de SBC (Single Board Computer) poate modifica acest unghi aproape instantaneu. În Figura IV-9 este ilustrat lobul principal al rețelei, care se încadrează în intervalul unghiurilor de elevație medie, favorabil pentru recepția sateliților LEO, iar în planul azimutal este orientat către unul dintre sateliți. Valorile unghiului azimutal al satelitului sunt furnizate prin intermediul aplicației software Orbitron [87] în timp real și pot fi introduse în software-ul de control al directivității rețelei de antene propusă. Pe baza azimutului satelitului, sistemul de calcul determină valorile defazajelor dintre semnalele de alimentare ale elementelor pentru direcționarea lobului principal către acest unghi. Sistemul de calcul rulează software-ul Orbitron, software-ul pentru controlul orientării lobului principal al rețelei de antene și poate efectua corecția Doppler pe baza informațiilor furnizate de Orbitron. Automatizarea sistemului de recepție satelitară LEO este fezabilă și presupune integrarea aplicației Orbitron cu software-ul de comandă a defazoarelor. Pentru amplasarea în mediu exterior, este necesară construirea unui radom (carcasă sau înveliș de protecție transparent pentru unde radio) cu scopul de a proteja rețeaua de antene împotriva factorilor nefavorabili din mediul exterior.

Este posibilă explorarea facilităților tehnologiilor IT moderne disponibile, studiate în cercetări anterioare. Printre acestea, Docker și Kubernetes [88] sunt esențiale pentru gestionarea și orchestrarea aplicațiilor în medii cloud și pot optimiza gestionarea și controlul dinamic al rețelei. De exemplu, prin integrarea cu software-ul Orbitron, Docker și Kubernetes pot îmbunătăți gestionarea și monitorizarea în timp real a sateliților, contribuind astfel la o mai bună coordonare a rețelei de antene. De asemenea, autentificarea fără parolă [89] poate spori securitatea accesului autorizat la controlul rețelei de antene fazate.

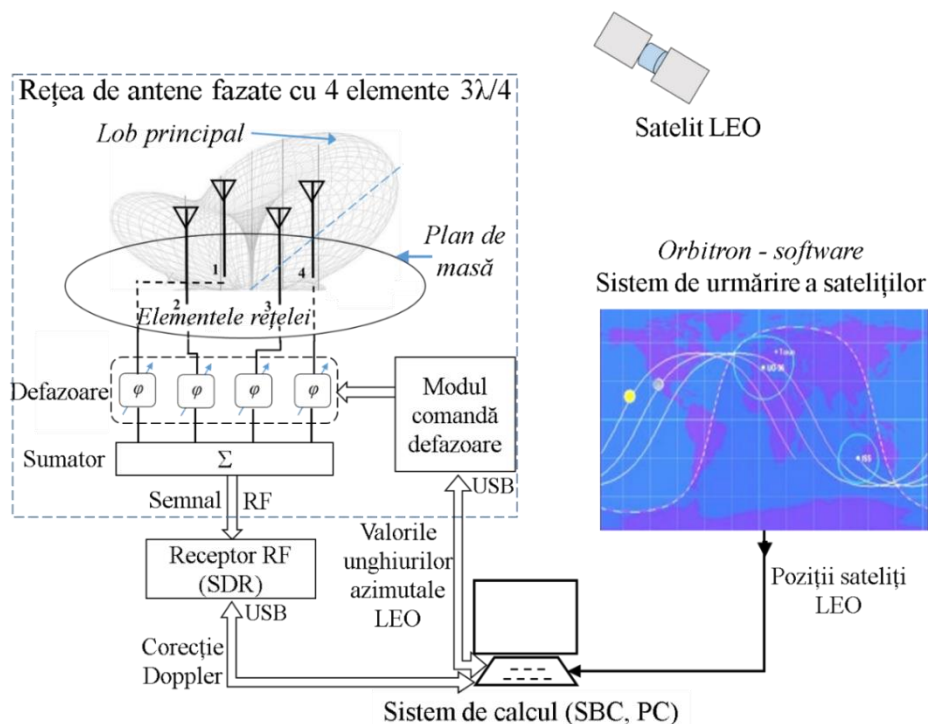


Figura IV-9 Reprezentare schematică a unui sistem de recepție a sateliților LEO, în care s-a integrat rețeaua de antene fazate.

IV.3. Concluzii

Acest capitol reflectă rezultatul integrării experienței teoretice și practice acumulate până la acest stadiu al cercetării descrise în teză, concentrându-se pe proiectarea și implementarea unei rețele planare de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, adaptată pentru modul de recepție, în contextul comunicațiilor satelitare LEO. Sunt prezentate detaliat fazele proiectării și părțile componente ale rețelei. Realizarea rețelei de antene fazate s-a bazat pe un concept original, prin implementarea elementelor $3\lambda/4$ pe plan de masă și amplasarea celorlalte componente esențiale dedesubtul acestuia. Această abordare conceptuală contribuie la: îmbunătățirea performanțelor sistemului prin reducerea semnificativă a curenților de mod comun, reducerea interferențelor cauzate de surse perturbatoare exterioare, creșterea câștigului și directivității, îmbunătățirea stabilității mecanice și a parametrilor electrics ai sistemului preum și obținerea unei structuri compacte și portabile a sistemului, cu posibilitatea transportării în locuri favorabile pentru urmărirea eficientă a sateliților LEO. Spre deosebire de rețelele de antene liniare fazate, studiate în etapele anterioare, rețeaua prezentată în acest capitol al tezei oferă un singur lob principal pentru majoritatea unghiurilor de orientare ale lobului principal și un HPBW adecvat pentru recepția sateliților LEO. Rețeaua de antene a fost proiectată pentru banda (435 - 438) MHz, sistemul propus a fost proiectat pentru a opera în banda de frecvențe (435 - 438) MHz, utilizată de un număr mare de sateliți LEO, dar conceptul poate fi utilizat pentru frecvențe mai înalte.

În secțiunea finală a capitolului se demonstrează funcționalitatea sistemului prin prezentarea rezultatelor obținute în urma măsurătorilor în două medii de laborator distincte din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava, respectiv într-un laborator de compatibilitate electromagnetă acreditat RENAR, dotat cu o camera semi-anechoică și infrastructura de măsurare și testare specifică, și într-un mediu de laborator cu condiții obișnuite de funcționare pentru prototipul propus. O analiză comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulări numerice încheie acest capitol și evidențiază calitatea rezultatelor obținute.

CAPITOLUL V CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PRINCIPALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

Cercetarea în domeniul rețelelor de antene fazate este de mare actualitate, iar importanța deosebită a acestor rețele derivă din capacitatea lor de a-și modifica directivitatea și forma diagramei de radiație prin control electronic rapid, fără utilizarea sistemelor mecanice, care sunt mult mai lente și mai limitate ca număr de utilizări. Integrarea acestor rețele în sistemele de recepție a sateliților LEO poate completa infrastructura terestră existentă, contribuind la optimizarea colectării datelor de la acești sateliți. În cercetarea din cadrul acestei teze s-a evidențiat importanța antenelor cu caracteristică de directivitate favorabilă în intervalul unghiurilor de elevație medie în domeniul comunicațiilor satelitare LEO. Analizele comparative au validat caracteristica de directivitate favorabilă în intervalul unghiurilor de elevație medie a antenei $3\lambda/4$, motiv pentru care aceasta a fost aleasă ca element în rețelele de antene fazate proiectate și realizate. De asemenea, elementul $3\lambda/4$ îndeplinește criteriile de simplitate și fezabilitate în implementare în comparație cu alte opțiuni analizate. Simulările și a rezultatelor experimentale asupra rețelelor de antene care includ aceste tipuri de elemente au evidențiat potențialul lor aplicativ în sfera comunicațiilor satelitare LEO. Cercetarea din această teză a cuprins studiul rețelelor de antene fazate cu elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, evidențiind avantajele lungimilor mai mari decât $\lambda/4$, privind câștigul, directivitatea și controlul lobului principal. Aceasta a condus la studii preliminare, realizate în cadrul tezei, asupra unor „antene cu fir lung” rezonante [90] și non-rezonante [91], care oferă directivitate, câștig ridicat și simplitate constructivă, conducând astfel la o soluție rentabilă și eficientă pentru rețele de antene fazate destinate frecvențelor foarte mari, de ordinul GHz sau zecilor de GHz.

Contribuții teoretice

Am sintetizat elemente esențiale ale rețelelor de antene fazate, cu focalizare pe concept și categorii principale, elemente constitutive și termeni specifici, metode și algoritmi utilizați frecvent pentru formarea și direcționarea lobilor de radiație, aplicații în diferite domenii, precum și pe dezavantaje și provocări curente, dar și pe direcții viitoare de dezvoltare.

Am efectuat o analiză asupra mai multor tipuri de unor antene utilizabile în rețelele de antene fazate, cu accent pe specificul caracteristicilor de directivitate, în scopul identificării elementelor de antenă cu potențial de aplicabilitate în domeniul comunicațiilor prin satelit de tip LEO. Am concluzionat că tipul de elemente radiante care se apropie cel mai mult de caracteristicile vizate în cadrul tezei sunt monopolarile verticale. Pe baza literaturii de specialitate și a simulărilor realizate am evidențiat avantajele oferite de utilizarea planului de masă în cadrul antenelor individuale. Alegerea elementului monopol vertical și avantajele planului de masă au determinat implementarea elementelor de tip monopol vertical fixați pe plan de masă în rețelele de antene care au constituit subiectul cercetării ulterioare.

Am realizat o analiză preliminară detaliată bazată pe simulările efectuate asupra rețelelor planare uniforme cu 4 elemente radiante de tip monopol în configurațiile $\lambda/4$, $3\lambda/4$ și monopol repliate, fixate pe plan de masă, fără introducerea de defazaje între semnalele de alimentare ale elementelor. Rezultatele analizei au determinat focalizarea cercetării ulterioare asupra rețelelor de antene fazate cu elemente configurate la $3\lambda/4$ poziționate pe plan de masă.

Analiza detaliată a rezultatelor simulărilor asupra rețelelor uniforme de antene fazate liniare cu 2, 4, 8 și 16 elemente, planare cu 4, 9 și 16 elemente și circulare cu 8 elemente, pentru diferite unghiuri de orientare ale lobilor principali, a relevat potențialul rețelelor planare uniforme pentru aplicații de comunicații satelitare LEO, datorită posibilității dezvoltării unei diagrame de radiație favorabile în intervalul unghiurilor de elevație medie și cu un singur lob principal.

Contribuții experimentale

În cadrul analizei asupra antenelor utilizabile în rețelele de antene fazate am testat antena omnidirecțională cu impedanță complex conjugată, care a fost propusă și ca alternativă la antena de tip turnichet de transmisie a radiobalizelor pentru detecția radio a meteorilor. Cu toate avantajele oferite de această antenă, am considerat că implementarea acesteia în rețele fazate de antene ar crește complexitatea realizării practice a rețelelor și a procedurilor de acordare în benzile de frecvențe de interes. De asemenea, efectele cuplajului mutual dintre multitudinea de elemente radiante poate genera un număr considerabil de variabile, dificil de gestionat în procesul de optimizare.

Publicație:

1. C. E. Lesanu, A. Done, **C. I. Adomnitei**, “Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection”, *15th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, May, 2020, <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108972> , wos:000589776100016.

Am proiectat și realizat practic o rețea de antene cu două elemente $3\lambda/4$ nedefazate, fixate pe același plan de masă având structura din plasă metalică. Scopul principal a constat în validarea unor aspecte teoretice specifice rețelei cu elemente $3\lambda/4$, incluzând stabilitatea impedanței și câștigul măsurat la unghiuri ce aparțin intervalului de elevație medie. Astfel, am efectuat:

- Analiza influenței distanței față de marginile planului de masă asupra parametrilor electrici ai unui element.
- Analiza efectelor cuplajului mutual dintre elementele rețelei, utilizând simularea numerică și determinări experimentale. Scopul analizei a fost implementarea unei metode de acordare a rețelei de antene pe frecvența de rezonanță dorită.
- Evaluarea experimentală a caracteristicii de directivitate a rețelei în mediul exterior utilizând un RTL-SDR (Software Defined Radio).
- Verificarea predicției teoretice referitoare la caracteristica de directivitate favorabilă pentru intervalul unghiurilor de elevație medie ale rețelei. Aceasta a făcut posibilă estimarea câștigului rețelei de antene cu 2 elemente $3\lambda/4$ nedefazate pe plan de masă, în planul azimutal și vertical, verificându-se și concordanța cu rezultatele simulărilor.

Publicație:

2. **C. I. Adomnitei**, A. Yu, C. Lesanu, A. Done, M. Dimian, “Analysis of a Three - Quarter Wavelength Antenna Array for UHF Satellite Communication Band,” *25th International Conference on System Theory, Control and Computing*, 2021, pp. 618-623, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC52150.2021.9607178> , wos: 000859487900102.

Am implementat o rețea de antene fazate cu două elemente $3\lambda/4$, fixate pe un plan de masă consistent, suficient de versatil pentru a fi integrat și în alte de rețele de antene. Am simulat diverse rețele de antene cu diverși parametri constructivi și am calculat parametrii electrici asociați (SWR, impedanța, F/B/ și câștig), în vederea identificării soluțiilor optime. Am proiectat, implementat și testat componentele esențiale în funcționarea rețelei, precum:

- Confecționarea planului de masă circular, cu diametrul de 1 m, din placă de aluminiu.
- Realizarea a 2 elemente de rețea prin utilizarea de antene telescopice adaptate la planul de masă și atașarea unor conectori SMA cu impedanța de 50 ohmi la bazele acestora.
- Realizarea practică a unui modul de comandă a defazoarelor de radiofrecvență. S-a utilizat platforma Teensy 3.6 cu un microprocesor ARM Cortex-M4 pe 32 de biți, cu o frecvență de ceas de 180 MHz și cu posibilitatea de overclock până la 240 MHz.

- Dezvoltarea unei aplicații software pentru programarea modului de comandă a defazoarelor, utilizând mediul de programare Teensyduino.

În etapa ulterioară am validat funcționalitatea conceptului propus, prin testarea integrată a rețelei de antene fazate cu două elemente $3\lambda/4$, fixate pe un plan de masă consistent, contribuțiile experimentale incluzând:

- Verificarea impedanțelor elementelor și acordarea rețelei de antene la frecvența de rezonanță, utilizând un analizor vectorial de rețea.
- Analiza tensiunii diferențiale care apare între două defazoare, fiecare programat pentru un defazaj diferit, utilizând metoda standard specificată de producătorul acestora. Studiul a fost întreprins pornind de la teorie, conform căreia valorile tensiunilor de alimentare ale elementelor pot influența caracteristica de directivitate a antenelor. Am analizat și propus o metodă pentru reducerea acestei tensiuni. Comparând diagramele simulate ale rețelelor cu două elemente $3\lambda/4$ și aplicând metoda standard și noua metodă propusă am constatat că tensiunea diferențială nu afectează semnificativ caracteristicile acestor rețele. Limitarea metodei la rețele cu două elemente și preferința pentru un singur software de comandă în cercetările viitoare au condus la continuarea utilizării metodei standard de defazare în studiile rețelelor de antene fazate cu elemente $3\lambda/4$. În schimb, metoda propusă se poate aplica acolo unde este necesară egalitatea strictă a tensiunilor dintre defazoare, precum modulatele în amplitudine sau în fază în sistemele complexe de comunicații fără fir.
- Efectuarea de măsurători ale caracteristicilor de directivitate introducând defazaje progresive de 30° între semnalele de alimentare ale elementelor rețelei.
- Realizarea unei analize a efectelor defazajelor aplicate semnalelor de alimentare ale elementelor rețelei, prin evaluarea caracteristicilor de directivitate ale rețelei de antene fazate și compararea cu rezultatele simulărilor, confirmând prin aceasta corectitudinea execuției sistemului în ansamblu și funcționalitatea conceptului.

Publicații:

3. **C. I. Adomnitei**, M. Dimian, A. Yu, C. E. Lesanu, A. Done, “Method Proposal for Minimize the Phase Shifters Differential Voltage applicable in Phase-Only Controlled Antenna Arrays”, *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, Issue 2, vol. 15, 2021, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102001> .
4. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, M. Dimian, I. Chiuchisan, A. Yu, “Phase Shift Effects Analysis on Radiation Pattern of a Ground Plane Antenna Array,” *16th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, May, 2022, pp. 95-100, <https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786221> .

Analiza comportamentului elementului $3\lambda/4$ a condus și la explorarea și studiul antenelor cu lungimi mult mai mari de $3\lambda/4$ (Long-Wire antennas) pentru a înțelege și optimiza performanța acestor antene în domeniul comunicațiilor radio la frecvențe foarte înalte. Rețelele de antene fazate care utilizează astfel de elemente ar fi de interes pentru frecvențe foarte înalte, corespunzătoare lungimilor de undă milimetrice.

Publicații:

5. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, “Long-Wire Directive S-band Antenna,” *16th International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May 2022, pp. 101-104, <https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786204> , 978-1-6654-8162-5/22, IEEE.

6. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, M. Dimian, I. Chiuchisan, “Non-resonant Long-Wire Feed for Parabolic Antennas,” *17th International Conference on Development and Application Systems*, 2024, Suceava, Romania, May 2024, pp. 95-99, <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541180> , 979-8-3503-4929-0, IEEE.

Am proiectat și realizat practic o rețea de antene fazate cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă, pentru banda de frecvențe (435 - 438) MHz, destinată utilizării în sisteme de recepție satelitară LEO. Am utilizat planul de masă versatil realizat în cadrul rețelei de antene fazate cu 2 elemente și am adus următoarele contribuții practice:

- Realizarea celor 4 elemente ale rețelei de antene, folosind antene telescopice adaptate pentru planul de masă prin atașarea de conectori SMA cu impedanța caracteristică de 50 ohmi. În această etapă am confecționat și cele patru linii de transmisie de lungime egală pentru conexiunea între antene și sumatorul de semnale.
- Configurarea unui nou modul de comandă a defazoarelor, bazat pe platforma Teensy 4.0, ce oferă performanțe și facilități superioare modulului detașabil realizat anterior pentru rețeaua cu 2 elemente.
- Proiectarea și realizarea practică a unui modul compact dedicat controlului orientării lobului principal al rețelei, și integrarea acestuia în sistemul rețelei de antene fazate. Acesta a inclus sumatorul semnalelor furnizate de cele patru defazoare, defazoarele de radiofrecvență și modulul de comandă al defazoarelor. Am conceput aceste elemente astfel încât să permită ecranarea electromagnetică a componentelor de radiofrecvență.
- Proiectarea și realizarea practică a unei surse de alimentare stabilizată bazată pe o baterie de acumulatori fabricați în tehnologie LiFePO₄. Sursa poate asigura o autonomie de aproximativ 20 ore pentru rețeaua cu 4 elemente. Pentru a oferi o tensiune stabilizată componentelor active ale rețelei, am construit un stabilizator de tensiune ce asigură o alimentare cu o tensiune de 5 V pentru o plajă largă a tensiunii de intrare furnizată de acumulatori.
- În cadrul sursei de alimentare am proiectat și implementat un sistem de avertizare sonor și luminos, a nivelului redus al tensiunii de la bornele acumulatorilor. S-a impus necesitatea acestui sistem pentru a obține o încărcare cât mai eficientă a bateriei, prin aceasta asigurându-se integritatea acumulatorilor și un număr de cicluri de încărcare conform celui din specificațiile tehnice (cel puțin 1500).

Contribuțiile experimentale asupra rețelei de antene fazate cu 4 elemente au inclus:

- Reglarea elementelor telescopice la o lungime apropiată de $3\lambda/4$ și ajustarea fină și progresivă a lungimilor acestora utilizând analizorul vectorial de rețea, scopul fiind acordarea rețelei cu 4 elemente la frecvența de rezonanță de aproximativ 436,5 MHz, situată la mijlocul benzii de frecvențe (435 - 438) MHz.
- Testarea și validarea funcționalității defazoarelor în banda de 435 MHz.
- Efectuarea unei analize a diagramelor de radiație ale rețelei de antene propusă, pentru diferite unghiuri de orientare ale lobului principal, cuprinse în intervalul (0° - 360°).
- Am realizat o analiză comparativă între rezultatele experimentale și simulările diagramelor de radiație ale rețelei de antene cu 4 elemente $3\lambda/4$ pe plan de masă.

Publicație:

7. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, A. Yu, M. Dimian, A. Lavric, “The Design and Implementation of a Phased Antenna Array System for LEO Satellite Communications,” *Sensors* 24, 2024, no. 6: 1915, <https://doi.org/10.3390/s24061915> , wos: 001192446900001. Factor de impact ISI: 3,4, Cuartila Q2.

Direcții de cercetare viitoare

Rețeaua de antene fazate cu 4 elemente va fi implementată într-un sistem de recepție al sateliților LEO, împreună cu un sistem de calcul tip Raspberry Pi sau alt SBC (Single Board Computer) și un RTL-SDR (RTL - Software-Defined Radio), utilizând aplicații specifice de urmărire și furnizare de informații digitale referitoare la pozițiile sateliților LEO în timp real, cum ar fi Orbitron [87]. Prin integrarea acestei aplicații cu software-ul de comandă a defazoarelor rețelei se vizează controlul automat al directivității rețelei spre sateliții LEO de interes. Vor fi efectuate teste și experimente specifice pentru mediul de recepție exterior și, pe măsura necesităților, se vor implementa amplificatoare LNA (Low Noise Amplifier) identice la fiecare din cele 4 elemente. Testele preliminare asupra acestora vor consta în determinările NF (Noise Factor) și defazajele suplimentare introduse de fiecare din cele 4 amplificatoare. Se va construi o structură exterioară transparentă pentru undele radio, cu rolul de a proteja rețeaua de antene împotriva efectelor negative cauzate de factori din mediu exterior (radom).

Se intenționează explorarea modului în care rețeaua de antene poate fi integrată cu tehnologii avansate de procesare a semnalului, cum ar fi formarea adaptivă a modelului de radiație sau metodele de detectare și clasificare a semnalului.

Se va lua în considerare construcția altor tipuri de rețele de antene, cu un număr de până la opt elemente, care vor fi implementate pe același plan de masă și folosind același hardware și software de control, datorită versatilității sistemului cu 4 elemente propus în această lucrare.

Datorită conectivității permanente la un sistem de calcul sau PC prin intermediul unei interfețe USB, rețeaua de antene fazate cu 4 elemente permite accesul la diverse servicii disponibile pe internet. În acest sens, se vor explora posibilitățile de comandă a rețelelor de antene fazate utilizând anumite disponibilități IT . Se va studia posibilitatea integrării și utilizării eficiente a tehnologiilor moderne, cum ar fi Docker și Kubernetes, pentru gestionarea controlului dinamic al rețelelor de antene fazate integrate în cadrul sistemelor de comunicații prin satelit. Integrarea acestor tehnologii informaționale în Orbitron ar aduce avantajul unui mediu de rulare scalabil, mai robust și mai ușor de gestionat pentru acest sistem de urmărire a sateliților.

În acest context, abordarea tehnologiilor moderne de autentificare fără parolă poate contribui la îmbunătățirea securității și accesului autorizat la sistemele de control și gestionare a rețelelor de antene fazate, simplificând implementarea acestor rețele în mediul comunicațiilor satelitare LEO. Studii preliminare asupra Docker, Kubernetes și Autentificării fără parole au fost deja efectuate, iar rezultatele sunt prezentate sintetic în publicațiile de mai jos întreprinse. Confirmarea interesului pentru aceste tehnologii inovatoare este susținută de cele 9 citări ale primei lucrări de mai jos primite de la autori din străinătate.

Publicații:

8. I. Gordin, A. Graur, S. Vlad, **C. I. Adomniței**, “Moving forward passwordless authentication: challenges and implementations for the private cloud,” *20th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research*, Iasi, Romania, Nov. 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/RoEduNet54112.2021.9638271> , 978-1-6654-1351-0, IEEE.
9. I. Gordin, A. Graur, **C. I. Adomniței**, “Web portal development with different cloud containers: Docker vs. Kubernetes”, *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, vol. 15 (2), 2021, pp. 15-19, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102002> .

Lista de lucrări

Lucrări publicate în reviste cotate ISI -Clarivate Analytics

1. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, A. Yu, M. Dimian, and A. Lavric, “The Design and Implementation of a Phased Antenna Array System for LEO Satellite Communications,” *Sensors* 24, 2024, no. 6: 1915, <https://doi.org/10.3390/s24061915> , wos: 001192446900001. Factor de impact ISI: 3,4, Cuartila Q2.

Lucrări publicate în volume de conferințe indexate ISI – Clarivate Analytics

2. **C. I. Adomnitei**, A. Yu, C. E. Lesanu, A. Done and M. Dimian, “Analysis of a Three - Quarter Wavelength Antenna Array for UHF Satellite Communication Band,” *25th International Conference on System Theory, Control and Computing*, Iasi, Romania, Oct. 2021, pp. 618-623, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC52150.2021.9607178> , wos: 000859487900102.
3. C. E. Lesanu, A. Done, **C. I. Adomnitei**, “Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection,” *15th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, May 2020, pp. 90-93, <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108972> , wos:000589776100016.

Lucrări publicate în volume de conferințe indexate IEEE

4. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu and A. Done, “Long-Wire Directive S-band Antenna,” *16th International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May 2022, pp. 101-104, <https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786204> , 978-1-6654-8162-5/22, IEEE.
5. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, M. Dimian, I. Chiuchisan, A. Yu, “Phase Shift Effects Analysis on Radiation Pattern of a Ground Plane Antenna Array,” *16th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, May 2022, pp. 95-100, <https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786221> , 978-1-6654-8162-5, IEEE.
6. **C. I. Adomnitei**, C. E. Lesanu, A. Done, M. Dimian and I. Chiuchisan, “Non-resonant Long-Wire Feed for Parabolic Antennas,” *17th International Conference on Development and Application Systems*, 2024, Suceava, Romania, May 2024, pp. 95-99, <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541180> , 979-8-3503-4929-0, IEEE.
7. I. Gordin, A. Graur, S. Vlad, **C. I. Adomniței**, “Moving forward passwordless authentication: challenges and implementations for the private cloud,” *20th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research*, Iasi, Romania, Nov. 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/RoEduNet54112.2021.9638271> , 978-1-6654-1351-0, IEEE.

Lucrări publicate în reviste indexate în alte baze de date internaționale:

8. **C. I. Adomnitei**, M. Dimian, A. Yu, C. E. Lesanu, A. Done, “Method Proposal for Minimize the Phase Shifters Differential Voltage applicable in Phase-Only Controlled Antenna Arrays”, *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, vol. 15 (2), 2021, pp. 9-14, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102001> .
9. I. Gordin, A. Graur, **C. I. Adomniței**, “Web portal development with different cloud containers: Docker vs. Kubernetes”, *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, vol. 15 (2), 2021, pp. 15-19, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102002> .

Lucrări publicate în reviste din domenii conexe tematicii tezei:

10. C. M. Picus, B. M. Constantin, and **C. I. Adomniței**, „Studies on Reducing Emissions Using preheating of Exhaust gases in the Isuzu 4JB1 Diesel Engine”, *TEHNOMUS Journal*, vol. 30, Jan. 1, 2023.

Prezentări la manifestări științifice

1. “25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Iași, 2021”, la care s-a prezentat online articolul: “Analysis of a Three - Quarter Wavelength Antenna Array for UHF Satellite Communication Band”.
2. “16th International Conference on Development and Application Systems (DAS)”, Suceava, Romania, May, 2022, cu articolul “Phase Shift Effects Analysis on Radiation Pattern of a Ground Plane Antenna Array”.
3. “17th International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, May, 2024, cu articolul “Non-resonant Long - Wire Feed for Parabolic Antennas”.
4. “The 13th International Workshop of Electromagnetic Compatibility – CEM – 2022”, Suceava, Romania, 14 – 16 Sept. 2022, cu lucrarea “Defectoscopy Tools for the Evaluation of Near Field Radiated Emissions”.
5. Prezentare și organizare workshop cu titlul „Rețele de Antene Fazate și Aplicații în Comunicații Satelitare”, la Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, 7 Septembrie 2023, în cadrul proiectului FDI, „Proiect de susținere a excelenței în domeniul cercetării interdisciplinare la USV”, cod proiect: CNFIS-FDI-2023-F-0579.

Rapoarte de cercetare

1. **C. -I. Adomniței**, „Stadiul actual în domeniul rețelelor de antene inteligente”, Referat I, 2022.
2. **C. -I. Adomniței**, „Simularea și proiectarea de rețele de antene inteligente cu aplicații în comunicații satelitare și localizare radio”, Referat II, 2022.
3. **C. -I. Adomniței**, „Contribuții la dezvoltarea și controlul rețelelor de antene inteligente cu aplicații în comunicații satelitare și localizare radio”, Referat III, 2022.

Implicarea în proiecte de cercetare:

1. Proiect PNIII, „Excelență în cercetare avansată, leadership în inovare și brevetare pentru dezvoltarea universității și regiunii” (EXCALIBUR), Programul 1 - Dezvoltarea sistemului național de cercetare-dezvoltare, Subprogramul 1.2 - Performanță instituțională - proiect de finanțare a excelenței în CDI, Contract de finanțare nr. 18PFE din 16.10.2018, contract nr. 18PFE/16.10.2018. Perioada 03.2019 – 12.2020, ID 392.
2. Proiect POCU, „Dezvoltare prin educație antreprenorială și cercetare inovativă doctorală și postdoctorală”, (DECIDE), Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman 2014-2020, contract de finanțare: 45649/20.06.2019. Perioada: 21 iunie 2019 – 20 aprilie 2023. În cadrul proiectului am efectuat și un stagiu de practică de 8 luni la Societatea Comercială Solution Plus S.R.L.
3. Proiect FDI, „Proiect de susținere a excelenței în domeniul cercetării interdisciplinare la USV”, finanțat de Consiliul Național pentru Finanțarea Învățământului Superior din România, CNFIS, cod proiect: CNFIS-FDI-2023-F-0579.

BIBLIOGRAFIE

- [1] J. L. Allen, "The Theory of Array Antennas (with Emphasis on Radar Applications)," Technical report No. 322, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln laboratory, 25 July 1963, p.1, 74.
- [2] O. M. Manu, „Contribuții la dezvoltarea sistemelor de antene inteligente și aplicații”, Teză de doctorat, Universitatea „Ștefan cel Mare” - Suceava, Suceava, 2011.
- [3] H. J. Visser, *Array and Phased Array Antenna Basics*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, USA, 2005, pp. 241-267.
- [4] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed., John Wiley & Sons Ltd., New York, NY, USA, 2013, pp. 160-167.
- [5] M. J. Abedin, A. S. Mohan, "Use of Smart Antennas for the Localization of RFID Reader," *Apmc:2009 Asia Pacific Microwave Conference*, Vol 1-5, pp.1037- 1038, 2009.
- [6] K. Kucuk, A. Kavak, "Scalable location estimation using smart antennas in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 8, Issue 8, Nov. 2010, pp. 889-903.
- [7] S. J. Wijnholds, W. A. Van Cappellen, "In Situ Antenna Performance Evaluation of the LOFAR Phased Array Radiotelescope," *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, Jun. 2011, pp. 1982-1988.
- [8] T. M. Braun, *Satellite Communications Payload and System*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012, p. 63.
- [9] Straits Research. "Satellite Communication Market". 3 August 2022. [Online]. Disponibil: <https://straitsresearch.com/report/satellite-communication-market> (accesat 17 Octombrie 2023).
- [10] R. Freeman, "Satellite Communications," In *Reference Manual for Telecommunications Engineering*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2002, pp. 1-2. [Online]. Disponibil: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471208051.fre018> (Accesat 25 Iunie 2024).
- [11] M. Sheetz "Amazon Wants to Launch Thousands of Satellites So It Can Offer Broadband Internet from Space". [Online]. Disponibil: <https://www.cnbc.com/2019/04/04/amazon-project-kuiper-broadband-internet-small-satellite-network.html> (Accesat 25 Iunie 2024).
- [12] Eutelsat. OneWeb Network Access Associates Limited. "Our Story". [Online]. Disponibil: <https://oneweb.net/about-us/our-story> (Accesat 25 Iunie 2024).
- [13] SpaceX. Wikipedia. "Starlink Project". [Online]. Disponibil: https://wiki2.org/en/Starlink_Project (Accesat 25 Iunie 2024).
- [14] China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC). "NewSpace Index: Hongyan Satellite Constellation". [Online]. Disponibil: <https://www.newspace.im/constellations/hongyan> (Accesat 25 Iunie 2024).
- [15] A. Done, C. E. Lesanu, A. M. Căilean, A. Graur and M. Dimian, "Implementation of an on-line remote control ground station for LEO satellites," *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania, 2017, pp. 855-859, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2017.8107144>.
- [16] A. Done, A. M. Căilean, C. E. Leșanu, M. Dimian and A. Graur, "Design and implementation of a satellite communication ground station," *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2017, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ISSCS.2017.8034925>.
- [17] B. Klofas, J. Anderson, K. Leveque, "A Survey of Cubesat Communication Systems". Nov. 2008. [Online]. Disponibil: http://www.klofas.com/papers/CommSurvey-Bryan_Klofas.pdf (Accesat 01 Aprilie 2024).

- [18] J. LaBerteaux, J. Moesta and B. Bernard, "Cajun advanced picosatellite experiment," *2007 IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference*, Dallas, TX, USA, 2007, pp. 5.E.2-1-5.E.2-7, <https://doi.org/10.1109/DASC.2007.4391943>.
- [19] Libre Space Foundation. Fosdem 2017, Brussels, Belgium. "An SDR-based Satellite Networked Open Ground Station". [Online]. Disponibil: <https://archive.fosdem.org/2017/schedule/event/satnogs/> (Accesat 20 Mai 2024).
- [20] D. White et al., "Overview of the Satellite Networked Open Ground Stations (SatNOGS) Project". 2018. [Online]. Disponibil: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4125&context=smallsat> (Accesat 26 Februarie 2024).
- [21] TinyGS Project, "TinyGS, the Open Source Global Satellite Network", tinygs.com. [Online]. Disponibil: <https://tinygs.com/satellites> (Accesat on 25 October 2023).
- [22] W. Zhou, T. Hong, X. Ding and G. Zhang, "LoRa Performance Analysis for LEO Satellite IoT Networks," *2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Changsha, China, 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/WCSP52459.2021.9613680>.
- [23] E. Kulu "World's largest database of nanosatellites, over 4100 nanosats and CubeSats". Jan. 2024. [Online]. Disponibil: <https://www.nanosats.eu/> (Accesat 27 Aprilie 2024).
- [24] L. Rasaporlu, R. Pranitha, M. Sinha, R. Farheen, S. J. and K. Vasanth, "Design of a 7 Element Yagi Uda Antenna for tracking LoRA based Satellites operating at 433MHz," *2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, India, 2023, pp. 610-615, <https://doi.org/10.1109/ICCPCT58313.2023.10245024>.
- [25] P. Ibelings, @ibelings. 7 Iulie, 2022. [Online]. Disponibil: <https://twitter.com/ibelings?lang=en> (Accesat 25 Aprilie 2024).
- [26] KrakenRF Inc. "KrakenSDR a Coherent Radio Receiver for Radio Direction Finding", krakenrf.com. [Online]. Disponibil: <https://www.krakenrf.com/> (Accesat 25 Aprilie 2024).
- [27] C. E. Lesanu and A. Done, "Parasitic circular polarized vertical antennas," *2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, 2016, pp. 143-149. <https://doi.org/10.1109/DAAS.2016.7492564>.
- [28] B. Bruninga, WB4APR, "An Omni Receive Antenna Challenge for Outernet L-band downlink reception", <http://aprs.org/outnet-whip-ant.html> (Accesat 25 Oct., 2023).
- [29] B. Bruninga, WB4APR, "Antennas for APRS Satellite Igates", <http://www.aprs.org/aprs-satellite-igate-antennas.html> (Accesat 25 Oct., 2023).
- [30] C. E. Lesanu, A. Done, A. M. Cailean, A. Graur, "Vertical Polarized Antennas for Low-VHF Radio Meteor Detection," *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, 24-26 May, 2018, pp. 93-98, <https://doi.org/10.1109/DAAS.2018.8396078>.
- [31] C. I. Adomnitei, A. Yu, C. E. Lesanu, A. Done and M. Dimian, "Analysis of a Three-Quarter Wavelength Antenna Array for UHF Satellite Communication Band," *25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2021, pp. 618-623, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC52150.2021.9607178>.
- [32] P. J. Bevelacqua. "Antenna Fundamentals", 2020. Antenna-Theory.com. [Online]. Disponibil: <https://www.antenna-theory.com/basics/efficiency.php> (Accesat: 27 Mai 2024).
- [33] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2009.
- [34] R. Bansal, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Copyright 2006 by Taylor &

- Francis Group, LLC, New York, pp.268, 269.
- [35] B. Sharma, IndranilSarkar, T. Maity, P. Bhattacharya, “An Introduction to Smart Antenna System,” *International Journal of Business and Engineering Research*, Vol. 8, Nov. 2014, ISSN: 0975-0479.
- [36] G. D’Amato, G. Avitabile, G. Coviello, C. Talarico, “Toward a Novel Architecture for Beam Steering of Active Phased-Array Antennas,” *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Oct. 16-19, 2016, Abu Dhabi, UAE.
- [37] P. Delos, B. Broughton, J. Kraft, “Phased Array Antenna Patterns-Part 1: Linear Array Beam Characteristics and Array Factor”, Vol 54, No 2, May 2020, Copyright 2019 Analog Devices, Inc., Norwood, Massachusetts, United States.
- [38] J. C. Liberti, Jr., and T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [39] R. Schmidt, “Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, no. 3, Mar. 1986, pp. 276-280, <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>.
- [40] R. H. Roy and T. Kailath, “ESPRIT - Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 37, no. 7, Jul. 1989, pp. 984-9, <https://doi.org/10.1109/29.32276>.
- [41] R. Muhamed and T. S. Rappaport, “Comparison of conventional subspace based DOA estimation algorithms with those employing property-restoral techniques: simulation and measurements,” *Proceedings of ICUPC - 5th International Conference on Universal Personal Communications*, Cambridge, MA, USA, 1996, pp. 1004-1008 vol.2, <https://doi.org/10.1109/ICUPC.1996.562731>.
- [42] M. L. Honig and J. S. Goldstein, “Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage Wiener filter,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 6, June 2002, pp. 986-994, <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.1010618>.
- [43] J. Jeraj and V. J. Mathews, “A stable adaptive Hammerstein filter employing partial orthogonalization of the input signals,” in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 4, Apr. 2006, pp. 1412-1420, <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.870643>.
- [44] P. Kollias, et al., “Science Applications of Phased Array Radars,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 103, Oct. 2022, pp. E2370-E2390, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0173.1>.
- [45] D. C. Munson, J. D. O'Brien and W. K. Jenkins, “A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar,” in *Proceedings of the IEEE*, vol.71, no. 8, Aug. 1983, pp. 917-925, <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12698>.
- [46] R. N. Adams, L. L. Horowitz and K. D. Senne, “Adaptive Main-Beam Nulling for Narrow-Beam Antenna Arrays,” in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-16, no. 4, Jul. 1980, pp. 509-516, <https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308981>.
- [47] R. T. Compton, Jr., *Adaptive Antennas: Concepts and Performance*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [48] I. Bogdan, „Comunicații mobile”, 2006 . [Online]. Disponibil: <http://staff.etc.tuiasi.ro/bogdani/Mobile/ComunicatiiMobile.pdf> (Accesat 17 Martie 2024).
- [49] NLR Amsterdam, Netherland, Aerospace Systems Division, “Smart Antennas for Aerospace Applications”. [Online]. Disponibil: <https://www.nlr.org/flyers/en/f513->

- smart-antennas-for-aerospace-applications.pdf (Accesat 15 martie 2024).
- [50] A. M. Ferendeci, "Smart Electronic Phase Control for Phased Array Antennas", *Proceedings of the IEEE 2010 National Aerospace and Electronics Conference (Naecon)*, Jul. 14, 2010, pp. 250-252, <https://doi.org/10.1109/NAECON.2010.5712955>.
- [51] UKEssays. "Advantages and Disadvantages of Smart Antenna", Nov 2018. [Online]. Disponibil: <https://www.ukessays.com/essays/english-language/advantages-and-disadvantages-of-smart-antenna-english-language-essay.php?vref=1> (Accesat 19 Martie 2024).
- [52] M. Tangemann and R. Rheinschmitt, "Comparison of upgrade techniques for mobile communication systems," *Proceedings of ICC/SUPERCOMM'94 - 1994 International Conference on Communications*, New Orleans, LA, USA, 1994, pp. 201-205 vol.1, <https://doi.org/10.1109/ICC.1994.368995>.
- [53] Samsung Co., "6G - The Next Hyper Connected Experience for All". [Online]. Disponibil: <https://www.samsung.com/global/business/networks/solutions/6g/> (Accesat 10 Ianuarie 2024).
- [54] M. K. A. Rahim, M. N. A. Karim, T. Masri, O. Ayop, H. Majid. "Dielectric Resonator Antenna Array at 2.4 GHz," *2008 Asia-Pacific Microwave Conference*, Dec. 2008, <https://doi.org/10.1109/APMC.2008.4958543>.
- [55] Academia Forțelor Aeriene „Henri Coandă”, Brașov, România, www.afach.ro, „Curs 04 - Domenii ale Spectrului Electromagnetic”. [Online]. Disponibil: <https://www.afahc.ro/ro/facultate/cursuri/ccg/MSE/C04%20-%20Domenii%20ale%20spectrului.pdf> (Accesat 9 Martie 2024).
- [56] C. E. Leșanu, „Contribuții în domeniul detecției meteorilor în spectrul undelor radio”, Teză de doctorat, Universitatea „Ștefan cel Mare”- Suceava, Suceava, 2021.
- [57] A. Done, „Contribuții la dezvoltarea unor stații de sol pentru recepția sateliților”, Teză de doctorat, Universitatea „Ștefan cel Mare”- Suceava, Suceava, 2019.
- [58] J. M. Fernández, J. L. Masa-Campos, M. Sierra-Pérez, "Circularly polarized omnidirectional millimeter wave monopoles with parasitic strip elements," *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, Volume 49, Issue 3, pp. 664-668, Mar. 2007, <https://doi.org/10.1002/mop.22237>.
- [59] C. E. Lesanu, A. Done, C. I. Adomnitei, "Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection," *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, 21-23 May, 2020, <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108972>.
- [60] P. J. Bevelacqua "The monopole antenna", antenna-theory.com, 2009-2011. [Online]. Disponibil: <https://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php> (Accesat 22 Iunie 2024).
- [61] [anagal-V] Mori, M. Help MMANA-GAL Basic. [Online]. Disponibil: <http://galana.de/basicmm/en/> (Accesat 5 Iulie 2024).
- [62] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Copyright 2016 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [63] J. K. Raines, *Folded Unipole Antennas Theory and Applications*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2007.
- [64] A. Maxworth, "Far-Field Radiation Characteristics of Folded Monopole Antennas over a Conducting Ground Plane," *Eng 3*, no. 1, Mar. 9, 2022, pp. 142-160. <https://doi.org/10.3390/eng3010012>.

- [65] M. S. Hashmi, D. Sharma, "A meandered rectangular monopole antenna for quad-band applications," in *Proceedings of the 2015 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, Hyderabad, India, Dec. 10-12, 2015, pp. 61-63.
- [66] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed., Copyright 2005 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [67] W. L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Copyright 1981, by John Wiley & Sons, Inc.
- [68] S. R. Best, "Improving the Performance Properties of a Dipole Element Closely Spaced to a PEC Ground Plane," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 3, 2004, pp. 359-363.
- [69] T. Hung, M. Hirayama, M. Nagatoshi, H. Morishita, "Characteristics of U-shaped folded dipole antenna on a small ground plane," in *Proceedings of the 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Toronto, Canada, 2010, pp. 1-4.
- [70] Y. Chen, S. Yang and Z. Nie, "The role of ground plane plays in wideband phased array antenna," *2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Nanjing, China, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICUWB.2010.5615352.
- [71] K. H. Sayidmarie, M. N. Saghurchy, "Array beam scanning by variation of elements amplitude-only excitations," in *2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Beijing, China, 2011, pp. 749-753, doi: 10.1109/MAPE.2011.6156133.
- [72] O. Manu, M. Dimian, A. Graur, "Analysis of Beamforming in Phased Antenna Arrays," *10th International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May 27-29, 2010.
- [73] F. Crețu, YO8CRZ, „NanoVNA-F V2 - Review”. [Online]. Disponibil: <https://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=1312> (Accesat 25 Martie 2024).
- [74] Minicircuits. Power Splitter/Combiner ZFSC-2-5-S Datasheet. Disponibil: https://www.electronicsdatasheets.com/manufacturers/minicircuits/parts/zfsc25s_1 (Accesat 25 Octombrie 2023).
- [75] J. Richard, *Antenna Engineering Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1984, Inc. p. 1-12.
- [76] C. I. Adomnitei, C. E. Lesanu, A. Done, M. Dimian, I. Chiuchisan, A. Yu, "Phase Shift Effects Analysis on Radiation Pattern of a Ground Plane Antenna Array," *16th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, May, 2022, pp. 95-100, doi: 10.1109/DAS54948.2022.9786221.
- [77] Analog Devices. AD8340 RF Vector Modulator Datasheet. [Online]. Disponibil: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8340.pdf> (Accesat 15 Ianuarie 2024).
- [78] Burr-Brown. DAC8554 Digital-to-Analog Converter Datasheet. Disponibil: <https://datasheetspdf.com/pdf/557005/Burr-BrownCorporation/DAC8554/1> (Accesat 10 Ianuarie 2024).
- [79] O. Manu, M. Dimian, A. Graur, "Radiation Pattern Analysis and Advanced Phase Shifter Development for designing Phased Smart Antenna Arrays," *Elektronika Ii Elektrotehnika*, Vol. 117, no. 1, Jan. 11, 2012, pp. 105-110, <https://doi.org/https://doi.org/10.5755/j01.eee.117.1.1063>.
- [80] C. I. Adomnitei, M. Dimian, A. Yu, C. E. Lesanu, A. Done, "Method Proposal for Minimize the Phase Shifters Differential Voltage applicable in Phase-Only Controlled Antenna Arrays," *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, Issue 2, vol. 15, 2021, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102001>.

- [81] Festo Didactic Inc., New Jersey, USA. RF Generator 9505-1 Overview. Disponibil: https://labvolt.festo.com/solutions/9_telecommunications/60-9505-10_rf_generator (Accesat 20 Aprilie 2024).
- [82] K. H. Sayidmarie and B. J. M. Jasem, "Amplitude-only beam scanning in linear antenna arrays," *2010 7th International Multi- Conference on Systems, Signals and Devices*, Amman, Jordan, 2010, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/SSD.2010.5585596>.
- [83] C. I. Adomnitei, C. E. Lesanu, A. Done, A. Yu, M. Dimian and A. Lavric, "The Design and Implementation of a Phased Antenna Array System for LEO Satellite Communications," *Sensors* 24, 2024, no. 6: 1915, <https://doi.org/10.3390/s24061915>.
- [84] Minicircuits. Power Splitter/Combiner ZCSC-8-152-S+ Datasheet. Disponibil: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZCSC-8-152-S+.pdf> (Accesat 20 Octombrie 2023).
- [85] O. M. Manu, M. Dimian, I. Dumitru and A. Graur, "Influence of array geometrical configuration on beamforming in phased antenna arrays and the phase shifter development," *10th International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2011, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ISSCS.2011.5978760>.
- [86] PJRC. Teensy 4.0. Disponibil: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html> (Accesat 21 Octombrie 2023).
- [87] Stoff. S. Orbitron - Satellite Tracking System. Stoff.pl. [Online]. Disponibil: <http://www.stoff.pl/> (Accesat 12 Octombrie 2023).
- [88] I. Gordin, A. Graur, C. I. Adomniței, "Web portal development with different cloud containers: Docker vs. Kubernetes," *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, Issue 2, 2021, vol.16, no. 32, <https://doi.org/10.4316/JACSM.202102002>.
- [89] I. Gordin, A. Graur, S. Vlad, C. I. Adomniței, "Moving forward passwordless authentication: challenges and implementations for the private cloud," *20th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, 2021, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/RoEduNet54112.2021.9638271>, 978-1-6654-1351-0/21.
- [90] C. I. Adomnitei, C. Lesanu, A. Done, "Long-Wire Directive S-band Antenna," *16th International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May, 2022, pp. 101-104, <https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786204>, 978-1-6654-8162-5/22.
- [91] C. I. Adomnitei, C. Lesanu, A. Done, M. Dimian, I. Chiuchisan, "Non-resonant Long-Wire Feed for Parabolic Antennas", *17th International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, 2024, pp. 95-99, <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541180>, 979-8-3503-4929-0/24.