Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

CONTRIBUȚII ÎN DOMENIUL DETECȚIEI METEORILOR ÎN SPECTRUL UNDELOR RADIO

Conducător științific: Prof. univ. dr. ing. Adrian GRAUR

Doctorand: ing. Cezar Eduard LEŞANU

- Suceava 2021 -

Această lucrare a fost susținută parțial:

- din proiectul "Centru integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii și Sisteme Distribuite de fabricație și control" (Acronim MANSiD), contract nr. 671/09.04.2015, Programul Operațional Sectorial pentru Creșterea Competitivității Economice cofinanțat din Fondul European de Dezvoltare Regională.

- din proiectul "Stație inteligentă radio/video asistată de GPS/Galileo pentru detecție meteori", proiect finanțat prin Programul național de cercetare, dezvoltare și inovare 2007-2013-PNCDII, contract nr. 205/2012, din cadrul Programului: Parteneriate în domenii prioritare, grant al Autorității Naționale pentru Cercetare Științifică și Inovare, UEFISCDI.

CUPRINS

INTRODUCERE	1
CAPITOLUL I DETECȚIA METEORILOR – GENERALITĂȚI	3
Metode de detecție a meteorilor	3
Detecția meteorilor în spectrul undelor radio	4
Clasificarea sistemelor RADAR	4
Detecția meteorilor utilizând metoda radarului bistatic pasiv	5
CAPITOLUL II ANTENE PENTRU DETECȚIA RADIO A METEORILOR	6
II.1. Antene cu polarizare verticală alimentate la bază	6
II.1.1. Antene cu polarizare verticală $3\lambda/4$	8
II.1.2. Antene directive $3\lambda/4$ cu polarizare verticală	.11
II.1.3. Antene verticale cu polarizare circulară cu elemenți paraziți	. 12
II.2. Antenă omnidirecțională cu impedanță complex conjugată	. 15
CAPITOLUL III SISTEME DE ALIMENTARE ALE ANTENELOR	. 18
Linii de transmisie	. 18
Filtre și preamplificatoare de antenă	. 18
Simetrizarea antenelor (rejecția/atenuarea curenților de mod comun)	. 20
CAPITOLUL IV RECEPTOARE RADIO PENTRU DETECTAREA METEORILOR	. 23
Determinări experimentale ale parametrilor receptoarelor definite prin program	. 23
CAPITOLUL V STAȚIE PILOT DE DETECȚIE A METEORILOR ÎN SPECTRUL	25
CADITOLUL VI CONCLUZU EINALE SUDIRECTU DE STUDIU	. 23
DIDI IOCDAEIE	. 20
DIDLIUUKAFIE	. 32

INTRODUCERE

Extinderea la nivel global a unor rețele de achiziție de date a fost posibilă prin implicarea unui număr mare de instituții și persoane interesate, adesea prin activități de voluntariat. Se pot menționa spre exemplificare rețelele de stații meteorologice conectate la internet PWSN (*Personal Weather Station Network*), care numără peste 250.000 de membri voluntari, dar și parteneriatul public-privat CWOP (*Citizen Weather Observer Program*). În domeniul radiotehnicii s-au dezvoltat rețele similare ca răspândire pe Glob, cu aplicații în domenii variate: Flightradar24 – rețea de radioreceptoare ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance–Broadcast*) pentru monitorizarea traficului aerian, MarineTrafic - rețea de radioreceptoare AIS (*Automatic Identification System*) pentru monitorizarea traficului maritim, SatNOGS (*Satellite Networked Open Ground Station*) - rețea de stații de sol pentru comunicații prin satelit, Blitzortung (*Lightning Detection*) – rețea de detecție a descărcărilor electrice atmosferice, TTN (*The Things Network*) – rețea de senzori *wireless* LoRa (*Long Range*).

Un domeniu de cercetare în care este necesară în continuare dezvoltarea unor sisteme de achiziție și rețele cu acoperire globală îl constituie detecția meteorilor în spectrul undelor radio. Această ramură a radioastronomiei prezintă interes în câteva domenii de cercetare aplicată: astronomie, astronautică, aeronomie și radiocomunicații.

În prezent pe plan mondial sunt utilizate două metode de detecție automată a meteorilor: metoda de detecție optică cu ajutorul rețelelor de camere video *all-sky* și metoda de detecție în spectrul undelor radio. Aceste două metode de detecție a meteorilor, video și radio, sunt complementare, determinarea traiectoriei meteorilor având ca scop în final recuperarea de material meteoritic.

Detecția radio a meteorilor are la bază principiul de funcționare al sistemelor RADAR (*RAdio Detection And Ranging*). Sistemele RADAR monostatice utilizate în scopul detecției meteorilor oferă o acoperire limitată a spațiului atmosferic, aceste sisteme având o răspândire redusă pe suprafața Globului.

O adordare alternativă constă în utilizarea sistemelor RADAR de tip bistatic, sisteme care au emițătorul și receptorul dispuse în amplasamente geografice diferite. Pe plan mondial există în prezent câteva proiecte destinate studiului meteorilor prin metoda radarului bistatic, sisteme care fac apel la emițătoare dedicate sau de oportunitate (care aparțin altor servicii de radiocomunicații):

- BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations) emițător dedicat în banda de 49 MHz;
- RMOJ (*Radio Meteor Observation in Japan*) emițător dedicat în banda de 50 MHz;
- FRIPON (*Fireball Recovery Interplanetray Observation Network*) emițător de oportunitate în banda de 143 MHz (*GRAVES RADAR*);
- BOLIDOZOR emițător de oportunitate în banda de 143 MHz (GRAVES RADAR);
- RMOB (*Radio Meteor Observatory's On Line*) reunește observații efectuate pe Glob cu ambele tipuri de emițătoare.

În lucrarea de față, autorul își propune să aducă noi contribuții în domeniul detecției radio a meteorilor prin metoda radarului bistatic. Se propun o serie de soluții tehnice în domeniul

antenelor și se face apel la tehnologii moderne în domeniul radiotehnicii (receptoare definite prin program SDR = *Software Defined Radio*) și al tehnicii de calcul (minisisteme SBC = *Single Board Computers*), toate acestea integrate într-un prototip de senzor radio pentru detecția radio a meteorilor. Lucrarea este structurată pe cinci capitole după cum urmează:

În **Capitolul I** sunt prezentate elementele introductive în domeniul studiului meteorilor, terminologia specifică și metodele de detecție ale acestora. Au fost sistematizate metodele de observare ale meteorilor cu accent pe metoda de radiodetecție, mecanismele de formare a urmei ionizate, mecanismele de reflexie a undelor radio pe meteori, clasificarea sistemelor de radiodetecție.

Capitolul II acoperă domeniul antenelor utilizate în scopul detecției radio a meteorilor. Sunt prezentate tipurile de antene utilizate în cadrul experimentelor preliminare, în urma cărora au fost identificate emițătoarele de oportunitate, respectiv domeniile de frecvență care se pretează scopului propus. Se propun și proiectează o serie de antene care îndeplinesc cerințele impuse: antene omnidirecționale cu polarizare verticală având lungimea elementului radiant de trei sferturi de lungime undă, antene directive cu polarizare polarizare verticală cu lungimea de trei sferturi de undă, antenă verticală cu polarizare circulară cu elemenți paraziți, antenă omnidirecțională cu polarizare circulară și impedanță complex conjugată. Pentru toate variantele de antene prezentate au fost efectuate simulări computerizate, urmate de realizarea practică a prototipului și caracterizarea experimentală a acestuia. Rezultatele obținute experimental au fost comparate cu cele obținute prin simulare și au fost optimizate prototipurile experimentale pentru a se îmbunătăți caracteristicile acestora.

Capitolul III grupează blocurile funcționale intercalate între antenă și receptor/emițător, elemente care asigură: transmiterea semnalului de radiofrecvență (linii de transmisie), tratarea problemei curenților de mod comun (simetrizarea antenelor), filtrarea semnalului (filtre de radiofrecvență), amplificarea semnalului (preamplificatoare), protecția la descărcări electrostatice (ESD = *ElectroStatic Discharge*). Pentru implementarea practică a acestor elemente funcționale, cu respectarea cerințelor teoretice, se propun o serie de soluții tehnice accesibile și reproductibile.

Capitolul IV este dedicat receptoarelor de radiofrecvență. Sunt puse în evidență caracteristicile tehnice specifice necesare ale radioreceptoarelor utilizate în cadrul sistemelor de radiodetecție a meteorilor, fiind evidențiată evoluția acestor echipamente pe parcursul experimentelor efectuate în cadrul temei de cercetare. Au fost efectuate măsurători ale parametrilor de intrare, cifră de zgomot și sensibilitate, pentru o serie de radioreceptoare SDR din clasa IF-DSP, performațele acestora fiind acoperitoare pentru scopul propus, aceste tipuri de radioreceptoare fiind în același timp răspândite și accesibile.

Capitolul V înglobează studiile efectuate în cadrul tezei, studii care au condus la implementarea practică a unui sistem pilot de radiodetecție a meteorilor (senzor integrat pentru detecția radio a meteorilor) ROAN@USV, instalat la Observatorul Astronomic și Planetariul din cadrul Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava, configurat să furnizeze date 24/7 în rețeaua RMOB (*Radio Meteor Observatory's On Line*). Testarea funcționării sistemului de detecție radio a meteorilor a fost realizată practic în timpul desfășurării unor ploi de meteori, rezultatele experimentale confirmând funcționarea corespunzătoare a acestuia.

În finalul tezei sunt prezentate concluziile generale, direcțiile viitoare de cercetare, lista de lucrări și bibliografia.

CAPITOLUL I DETECȚIA METEORILOR – GENERALITĂȚI

Detecția meteorilor în spectrul undelor radio constituie o ramură a radioastronomiei care are ca scop studiul distribuției meteoroizilor în regiunea noastră a Sistemului Solar (pe orbita Pământului).

Meteoroizii, cele mai mici corpuri cerești (particule de rocă și metal având dimensiuni de până la un metru), alături de asteroizi, comete și obiecte trans-neptuniene (OTN), alcătuiesc categoria corpurilor cerești mici ale Sistemului Solar.

La intrarea în atmosfera terestră, având viteze mari, în medie de ~40 km/s (10-100 km/s), meteoroizii se dezintegrează și ionizează gazele din atmosferă, creând un canal de plasmă neutră (atomi ionizați și electroni liberi) numit meteor, fenomenul vizibil fiind cunoscut sub denumirea populară de "stea căzătoare". Un meteor foarte strălucitor mai poartă denumirea de "bolid". Regiunea atmosferei de apariție a canalelor de plasmă meteorice este cuprinsă între 80 și 120 km altitudine.

În funcție de direcția de ocurență și de rata orară zenitală (ZHR = *Zenithal Hourly Rate*) meteorii sunt clasificați în două categorii: meteori sporadici (apar pe direcții aleatoare) și ploi de meteori (sunt asociate unor curenți sau roiuri de meteoroizi).

Studiul meteorilor prezintă importanță în câteva domenii de cercetare:

- Astronomie: studiul distribuției meteoroizilor în Sistemul Solar, cât și studiul evoluției și deplasării corpului părinte (cometă sau asteroid); recuperare de material meteoritic.
- Astronautică: aspecte legate de siguranța la lansare și operare pe orbită a misiunilor spațiale cu echipaj uman și a sateliților artificiali.
- Aeronomie: studiul curenților de aer la mare altitudine, prin analiza vitezei și a direcției de deplasare a canalului de plasmă ionizată.
- Comunicații: radiocomunicații la mare distanță în benzile de unde ultrascurte prin reflexii pe urme de meteoroizi (*meteor scatter*).

Metode de detecție a meteorilor

Se disting două categorii principale de metode de detecție a meteorilor: **metode optice**, care pot fi vizuale (cu ochiul liber), fotografice sau detecție video, și **metode de detecție radio**.

În cadrul metodelor optice, o amploare deosebită au luat-o sistemele de video detecție automată, existând în prezent mai multe rețele de camere video pentru detecția automată a meteorilor distribuite pe Glob (ASGARD *All-sky Fireball Network* NASA, FRIPON-Franța, CAMS–NASA, SPMN-Spania, SVMN-Slovacia, NEMETODE-UK, MOROI-România ș.a.).

Metodele de detecție radio sunt complementare metodelor de detecție foto/video, și au câteva avantaje:

- permit detecția pe timpul zilei, Lună plină, cer acoperit sau poluare optică, situații în care metodele optice nu pot fi folosite sau sunt interferate;
- asigură și detecția meteorilor slabi, nedetectabili optic (produși de micrometeoroizi rata orara zenitală ZHR poate ajunge la 20000).

Detecția meteorilor în spectrul undelor radio

O primă direcție de studiu a meteorilor în domeniul undelor radio are la bază **influența canalului de plasmă (meteor) asupra propagării undelor radio**. În general, meteoroizii sunt prea mici pentru a putea fi detectați direct utilizând tehnici de radiodetecție (RADAR). Pe de altă parte, canalele de plasmă meteorice au dimensiuni suficient de mari, în plus plasma din care acestea sunt constituite (electroni liberi) are proprietatea de a reflecta undele radio. Domeniul de frecvență în care aceste fenomene de reflexie apar, are limita inferioară impusă de prezența ionosferei (aproximativ 30 MHz), și este limitat superior de proprietățile intrinseci ale plasmei (densitate și temperatură).

Clasificarea sistemelor RADAR

Sistemele de detecție RADAR (*RAdio Detection And Ranging*), în funcție de amplasamentul emițătorului și al receptorului, se clasifică în două categorii principale: sisteme monostatice și sisteme bistatice.

Sistemele RADAR **monostatice** au configurația convențională în care emițătorul și receptorul sunt colocate (sunt instalate în același amplasament) și utilizează aceeași antenă la emisie și recepție. Reflexiile apar pe sfere concentrice, cu emițătorul și receptorul amplasate în centrul sferelor.

În cadrul sistemele RADAR **bistatice**, emițătorul și receptorul sunt instalate în amplasamente diferite (după orizontul radio), distanța dintre ele fiind comparabilă cu distanța până la țintă. Unghiul dintre emițător-țintă-receptor poartă numele de unghi bistatic β , acesta fiind un factor important în determinarea secțiunii transversale a țintei (RCS = *Radar Cross Section*). Reflexiile apar pe elipsoizi, cu emițătorul și receptorul amplasate în cele două focare.

Sistemele RADAR formate din mai multe componente monostatice sau bistatice distribuite spațial și care au o arie de acoperire comună sunt denumite sisteme **multistatice**.

Un caz particular de sistem monostatic îl constituie sistemul RADAR care are antenele de emisie și recepție separate, dar unghiul bistatic (unghiul emițător-țintă-receptor) este apropiat de zero ($\beta \approx 0^\circ$). Acest sistem poartă denumirea de sistem **pseudo-monostatic**.

Sistemele RADAR monostatice și pseudo-monostatice mai sunt cunoscute sub denumirea de sisteme *back-scatter*.

Sistemele RADAR bistatice și multistatice care au unghiul bistatic obtuz, mai sunt cunoscute sub denumirea de sisteme *forward-scatter*.

Un alt criteriu de clasificare a sistemelor RADAR, are în vedere originea/apartenența emițătorului folosit, care poate fi:

- 1. emițător dedicat (RADAR activ).
- 2. emițător de oportunitate (RADAR **pasiv**).

Sistemele monostatice (au aceeași antenă la emisie și recepție) și pseudo-monostatice (antene colocate diferite la emisie și recepție) utilizează emițătoare dedicate (sunt sisteme RADAR active) care lucrează fie în impulsuri, cu undă continuă CW (*Continuous Wave*) nemodulată, caz în care se poate determina doar viteza țintei, sau emițătoare cu undă continuă modulată în frecvență sau fază, caz în care se poate determina și distanța până la țintă.

Sistemele RADAR bistatice și multistatice pot utiliza emițătoare dedicate (sunt sisteme active) care emit în impulsuri sau cu undă continuă, sau emițătoare de oportunitate (*ad-hoc*), caz în care poartă denumirea de sisteme RADAR pasive.

O imagine de ansamblu a clasificării sistemelor RADAR este sintetizată în Tabelul I-1. Tabelul I-1 Clasificarea sistemelor RADAR [CL].

RADAR	Monostatic	2	Bistatic		
	Reflexii pe sfere concentrice cu T și R in centrul sferelor		Reflexii pe elipsoizi cu T și R în cele două focare		
	RADAR "clasic" (aceeași antenă la T și R) T R	Pseudo-monostatic $\beta \approx 0^{\circ}$ (antene colocate diferite la T și R) T R	T R		
Activ	Utilizează emițătoare dedicate care emit în impulsuri, cu undă continuă CW nemodulată sau modulată în frecvență sau fază				
Pasiv	Indispor	Utilizează exclusiv emițătoare de oportunitate			

Detecția meteorilor utilizând metoda radarului bistatic pasiv

Principiul general al observațiilor meteorilor utilizând metoda radarului bistatic (*forward scatter* – reflexie înainte) este ilustrat în Figura I-1. Un radioreceptor de unde ultrascurte (30-100 MHz) este acordat pe frecvența unui radioemițător amplasat la mare distanță, tipic între 500 și 2000 km. Contactul radio direct este imposibil datorită curburii Pământului. Când un meteor intră în atmosferă, urma ionizată rezultată poate reflecta undele radio de la emițător către receptor. În amplasamentul receptorului, unde în mod normal nu se recepționează nimic, emisiunea se poate auzi momentan, atât timp cât meteorul este prezent. Asemenea reflexii durează de la câteva zecimi de secundă până la câteva minute.



Figura I-1 Principiul observațiilor radio a meteorilor prin metoda radarului bistatic (forward scatter) [CL].

CAPITOLUL II ANTENE PENTRU DETECȚIA RADIO A METEORILOR

Considerații generale

În cazul detecției meteorilor în spectrul undelor radio utilizând metoda radarului bistatic, datorită geometriei reflexiei pe canalul ionizat creat de meteoroid și efectului Faraday de rotire a planului de polarizare, polarizarea se schimbă între amplasamentul de emisie și cel de recepție.

În cadrul sistemelor bistatice dedicate detecției radio a meteorilor sunt utilizate la recepție cu preponderență antene cu polarizare liniară, dipol, Yagi-Uda sau variante ale acesteia, așa cum se deduce din literatura de specialitate [23][24][25].

Emițătoarele de oportunitate (de exemplu stații TV analogice care operează în banda I) emit cu polarizare diferită – verticală V, orizontală H sau circulară CP, de multe ori necunoscută, nefiind un criteriu care să încline balanță în favoarea uneia dintre ele.

Balizele radio dedicate detecției radio a meteorilor (sisteme bistatice) utilizează cu exclusivitate antene cu polarizare axială circulară [23][24].

Studii privind comunicațiile radio la distanță prin reflexie pe meteori au arătat faptul că nu există diferențe notabile între situațiile în care se utilizează aceeași polarizare (V sau H) la emisie și recepție [28].

II.1.Antene cu polarizare verticală alimentate la bază

Considerentele de ordin practic privind în principal instalarea și mentenanța, au condus la focalizarea atenției în direcția antenelor verticale alimentate la bază (*End Feed*), urmărindu-se îndeplinirea criteriilor propuse.

Antenele verticale analizate în paragrafele următoare sunt caracterizate de:

- un efect de sol redus (influența înălțimii față de sol mai redusă decât în cazul antenelor cu polarizare orizontală);
- amprentă la sol redusă (instalare facilă);
- alimentare la bază (simplitate constructivă);
- rezistență mai redusă la vânt și mai puțin susceptibile givrajului.

Printre dezavantaje se numără:

- o mai mare sensibilitate la perturbațiile electromagnetice produse de activitățile umane (motoare termice cu aprindere prin scânteie, mașini electrice rotative, rețele de înaltă tensiune), deoarece aceste semnale perturbatoare au predominant o polarizare verticală;
- randamentul la emisie este influențat de conductivitatea solului atunci când sunt instalate la nivelul solului.

În cele mai multe situații concrete de instalare a antenelor, orizontul fizic este obturat la elevații joase (din cauza formelor de relief sau a construcțiilor). Din acest considerent și ținând cont și de atenuarea spațială datorată distanței mari față de emițător la elevații joase, s-a urmărit obținerea unei caracteristici de directivitate care să favorizeze elevațiile medii (15-60 grade).

Din simulările efectuate asupra antenelor fir lung (LW = Long Wire), se observă faptul că elementele radiante cu lungimi multipli de semiundă $(n + 1) \cdot \lambda/2$, $n \in N^*$, tind să aibă lobii de radiație principali mai apropiați de elementul radiant pe măsura creșterii lungimii. Când sunt instalate vertical față de sol, maximul lobului principal al caracteristicii de directivitate se deplasează către elevații mari, apropiindu-se de elementul radiant. În plan orizontal, caracteristica de directivitate este omnidirecțională.

Antenele cu lungimi mai mari de $\lambda/2$ pot fi privite ca arii de antene fazate sau antene coliniare, având un câștig de 3 dB la dublarea numărului de dipoli.

Au fost analizate comparativ, cu ajutorul programului de analiză a antenelor MMANA-GAL [45], o serie de antene verticale instalate la nivelul solului (h = 0 m), având lungimi ale elementului radiant de $\lambda/4$, $\lambda/2$, $5\lambda/8$, $3\lambda/4$ și λ . Parametrii de intrare utilizați în simulare: sol real cu proprietății medii având permitivitatea dielectrică ε =13 F/m și conductivitatea electrică σ =5 mS/m, și elemenți din material ideal, fără pierderi.

Lungime relativă element radiant	Elevație lob principal [°]	HPBW [°]	GA [dBi]	Z
$\lambda/4$	27	43 (10-53)	-0,2	<
$\lambda/2$	30	30 (8-38)	0,7	>
5λ/8	15	27 (6-33)	2,2	>
3λ/4	47	39 (27-66)	4,2	<
λ	35	28 (22-50)	3,8	>

Tabelul II-1 Parametrii antenelor verticale analizate Eroare! Fără sursă de referință.

Caracteristicile de directivitate ale antenelor verticale cu lungimi de $3\lambda/4$ și λ , în absența unor linii de defazare suplimentare, sunt favorabile în zona elevațiilor medii, de interes pentru aplicația propusă.

În Figura II-1 se remarcă o deplasare a maximului lobului principal către unghiuri de elevație medii, simultan cu o creștere (dublare) a câștigului în cazul antenelor verticale $3\lambda/4$ și λ , în condițiile păstrării caracteristicii omnidirecționale în plan orizontal.



Figura II-1 Caracteristicile de directivitate în plan vertical ale antenelor verticale, pentru diferite lungimi ale elementul radiant: $\lambda/4$, $\lambda/2$, $5\lambda/8$, $3\lambda/4$ și λ **Eroare! Fără sursă de referință**..

Antenele alimentate în curent, cu lungimi de $\lambda/4$ și $3\lambda/4$, pot fi alimentate cu linii coaxiale de transmisie de joasă impedanță.

Elementele radiante în $\lambda/2$ și λ alimentate la capăt, au impedanțe mari. Fiind alimentate în ventrul de tensiune (nod de curent), necesită utilizarea unor circuite adaptoare de impedanță. Dacă aceste antene sunt utilizate doar la recepție, adaptoarele pot fi implementate ușor utilizând elemente de circuit concentrate (componente LC uzuale de joasă tensiune).

În toate situațiile trebuie luate măsuri pentru evitarea apariției curenților de mod comun. Aceste tipuri de antene fiind rezonante realizează în același timp și o preselecție, atenuând semnalele din afara benzii de trecere.

II.1.1.Antene cu polarizare verticală 3λ/4

În urma analizei antenelor verticale rezonante, s-a optat pentru utilizarea unei antene cu lungimea elementului radiant de $3\lambda/4$, care întrunește criteriile impuse:

- caracteristică de directivitate în plan vertical favorabilă la unghiuri de elevație medii (se remarcă faptul că și la elevații joase câștigul este superior/egal cu cel al antenelor verticale cu lungimi ale elementelor radiante λ/4, respectiv λ/2);
- posibilitate de obținere a unei caracteristici de directivitate omnidirecționale în plan orizontal, aspect util în situația în care se urmărește implementarea unui sistem multiemițător/multifrecvență, având emițătoarele distribuite spațial din punct de vedere geografic;
- posibilitatea de creștere a directivității, atunci când bilanțul energetic al conexiunii radio (*link budget*) este insuficient, având aici în vedere situațiile în care puterea la emisie a radiobalizelor este redusă;
- impedanță caracteristică joasă 50/75 Ω (ajustabilă prin înclinarea elemenților radiali);
- alimentare la bază (capătul inferior), când este posibilă utilizarea unor structuri portante ușoare pentru fixarea elementului radiant vertical filar (de exemplu, pilon telescopic din fibră de sticlă).



Figura II-2 Geometria și distribuția curenților pentru antena 3λ/4 prevazută cu patru elemenți radiali (a), doi radiali (b) și un radial (c) [CL].

Utilizând programul de analiză a antenelor MMANA-GAL [45], au fost efectuate simulări ale unei antene având elementul radiant cu lungimea $\sim 3\lambda/4$, studiindu-se influența numărului de

elemenți radiali asupra caracteristicii de directivitate în cele două planuri de radiație, vertical și orizontal (Figura II-2). Elemenții radiali elevați față de sol, fiecare lungimea de $\sim\lambda/4$, sunt conectați la tresa liniei coaxiale de transmisie.

Caracteristicile de directivitate în planurile orizontal și vertical, pentru o antenă $3\lambda/4$ cu patru, doi, respectiv un element radial sunt ilustrate comparativ în Figura II-3.



Figura II-3 Caracteristicile de directivitate pentru o antenă $3\lambda/4$ cu patru elemenți radiali (roșu), doi elemenți radiali (verde) și cu un element radial (albastru) (în plan orizontal – stânga, în plan vertical - dreapta) [CL].

Determinarea experimentală a caracteristicii de directivitate a antenelor cu ajutorul sateliților artificiali

Caracteristicile de directivitate în plan vertical, ale antenelor $3\lambda/4$ cu unul și cu doi elemenți radiali, au fost determinate experimental cu ajutorul sateliților artificiali meteorologici cu orbită joasă LEO (*Low Earth Orbiting*) din seria NOAA POES [34]. Aceștia emit continuu un semnal în banda de 137 MHz, modulat în frecvență FM, având lățimea de bandă de 34 kHz. Puterea efectivă radiată ERP este de aproximativ 37 dBm (5 W).

Antena de emisie de la bordul satelitului are caracteristica de directivitate aproape semisferică și este orientată permanent perpendicular pe sol, fiind necesar controlul atitudinii satelitului pentru a oferi senzorilor optici de la bord o vizare ortogonală a suprafeței terestre.

Prezentând aceste caracteristici, sateliții NOAA sunt ideali pentru utilizare pe post de surse de semnal sau radiobalize de referință pentru trasarea experimentală a caracteristicilor de directivitate ale antenelor, cu condiția ca acestea să fie dimensionate pe lungimile de undă pe care emit acești sateliți.

Pentru trasarea experimentală a caracteristicilor de directivitate ale antenelor cu ajutorul sateliților artificiali NOAA, s-a folosit aplicația *Signal Plotter* din programul APT-Decoder 2.0.5.88 [36]. Aceast program este destinat decodării imaginilor în format APT (*Automatic Picture Transmission*) transmise de sateliții meteorologici din seria NOAA și care, prin intermediul port-ului COM, permite controlul CAT (*Computer Aided Transceiver*) pentru compensarea efectului Doppler și citirea datelor privind nivelul semnalului recepționat RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) de la un scanner radio comercial Icom PCR1000 (Figura II-4). Nivelul semnalului recepționat, corelat cu unghiul de elevație al satelitului, este salvat cu marcatoare de timp într-un fișier CSV (*Comma Separated Values*).



Figura II-4 Structura standului experimental pentru determinarea caracteristicii de directivitate cu ajutorul sateliților meteorologici NOAA [CL].

Au fost efectuate deteminări având antenele plasate la diferite înălțimi deasupra solului. În Figura II-5 sunt reprezentate pe același grafic caracteristica de directivitate teoretică și cea determinată experimental pentru o antenă $3\lambda/4$ cu doi radiali. Pe același grafic sunt reprezentate pierderile relative de propagare în spațiul liber (verde), nivelul semnalului recepționat (roșu) și câștigul antenei (albastru).



Figura II-5 Caracteristica de directivitate în plan vertical determinată experimental comparată cu caracteristica teoretică (h=0,1 m AGL) pentru antena verticală 3λ/4 cu doi radiali [CL].

Se observă o bună corelație între cele două caracteristici, cea teoretică și cea determinată experimental, dar și influența înălțimii față de sol și a structurilor metalice adiacente asupra caracteristicii de directivitate obținute experimental. Reflexiile parazite determină apariția unor maxime și minime ale câștigului în funcție de elevație, dar și prezența la elevații mari apropiate de zenit a unui câștig suplimentar.

În urma analizei antenei verticale $3\lambda/4$, au rezultat două noi configurații de antene cu potențială aplicabilitate în domeniul radioastronomiei și al radiocomunicațiilor spațiale:

- antenă/arie directivă 3λ/4 cu polarizare verticală;
- antenă verticală cu polarizare circulară cu elemenți paraziți.

II.1.2.Antene directive 3\/4 cu polarizare verticală

Pentru a crește câștigul la unghiuri de elevație medii, autorul propune un nou tip de antenă verticală directivă având la bază elementul radiant $3\lambda/4$ [21].

Similar antenelor directive cu elemenți paraziți, cea mai cunoscută fiind antena Yagi-Uda, se utilizează pentru creșterea directivității un element reflector și eventual unul sau mai mulți elemenți directori, coplanari cu elementul radiant.

Într-o primă variantă, cu trei elemenți (reflector-element radiant-director), elemenții paraziți sunt plasați vertical la distanța de aproximativ un sfert de lungime de undă față de elementul radiant. Aceștia sunt formați din două secțiuni: una verticală cu lungimea de aproximativ $\sim 3\lambda/4$ (reflector și director), având fiecare în prelungire o secțiune orizontală cu lungimea $\sim \lambda/4$ (radial).



Figura II-6 Geometria antenei directive 3λ/4 cu trei elemenți cu polarizare verticală: distribuția curenților (a), dimensiuni relative (b) [CL].



Figura II-7 Caracteristica de directivitate pentru antena directivă 3λ/4 cu 3 elemenți (în plan orizontal – stânga, în plan vertical - dreapta) [CL].

În această primă variantă, în care se utilizează câte un singur element radial coplanar cu elemenții verticali, există restricții de optimizare privind distanțele dintre elemenți, care în principiu nu pot fi mai mici decât lungimea radialului.

Aceste restricții sunt eliminate prin utilizarea a câte doi elemenți radiali, aferenți fiecărui element, dispuși perpendicular pe direcția lobului principal al caracteristicii de directivitate– practic această variantă are la bază antena verticală $3\lambda/4$ cu doi radiali [21].

II.1.3. Antene verticale cu polarizare circulară cu elemenți paraziți

S-a remarcat, în cazul antenelor verticale alimentate la bază (*End Feed*), cu lungimea egală sau mai mare de $\lambda/2$, posibilitatea obținerii polarizării circulare utilizând polarizoare circulare pasive parazite.

În Figura II-8 este prezentată structura a trei antene verticale alimentate la bază, având lungimea elementului radiant mai mare sau egală cu $\lambda/2$ (la acestea se poate adăuga și antena în semiundă alimentată la bază). Aceste antene pot fi privite ca dipoli în semiundă alimentați la capăt prin intermediul unor circuite adaptoare de impedanță. Caracteristica de directivitate diferă în funcție de arhitectura acestor adaptoare de impedanță care contribuie și ele la radiația totală.



Figura II-8 Antene verticale cu lungime > $\lambda/2$ [CL].

Polarizorul parazit circular este format dintr-o arie compusă din elemenți paraziți înclinați, poziționați simetric în jurul elementului activ, în planul nodului de tensiune (Figura II-9).



Figura II-9 Polarizor circular pasiv cu elemenți paraziți [39].

Au fost efectuate simulări preliminare ale unei antene verticale alimentate la bază, având lungimea elementului radiant egală $3\lambda/4$, prevăzută cu polarizor circular parazit.



Figura II-10 Antenă verticală $3\lambda/4$ cu polarizare circulară parazită (geometria și distribuția curenților) - stânga. Caracteristica de directivitate a unei antene $3\lambda/4$ dotată cu polarizor circular parazit (câmpul vertical – roșu, câmpul orizontal – albastru) - dreapta [CL].

S-a utilizat în cadrul simulărilor cu programul MMANA-GAL [45], un polarizor circular format din patru elemenți paraziți înclinați la 45°, având lungimea $0,425\lambda$, amplasați la un sfert de lungime de undă de elementul radiant.

Aceste simulări arată faptul că, prin utilizarea unui polarizor circular parazit, antenele verticale alimentate la bază cu lungimi egale sau mai mari de $\lambda/2$, pot fi utilizate atât pentru comunicații cu polarizare verticală cât și orizontală, păstrându-se caracteristica de directivitate omnidirecțională în plan orizontal.

Pentru testarea conceptului a fost construit un prototip al unei antene verticale cu polarizare circulară pentru banda de 435 MHz alocată radiocomunicațiilor via satelit, având la bază un element radiant cu lungimea $3\lambda/4$, care prezintă o impedanță la intrare apropiată de 50 Ω [17].

Măsurarea parametrilor electrici ai antenei verticale $3\lambda/4$ cu polarizare circulară parazită a fost efectuată cu ajutorul analizorului de antenă Agilent N9912A, obținând un raport de unde staționare SWR < 1,2:1 (Figura II-11).



Figura II-11 Raportul de unde staționare măsurat al antenei verticale 3λ/4 cu polarizare circulară parazită Eroare! Fără sursă de referință.

Analiza efectului polarizorului circular cu elemenți paraziți asupra carcteristicii de directivitate a fost realizată cu ajutorul unui stand experimental instalat în aer liber, cu antena testată (AUT) în mod recepție [50][51][52][53].



Figura II-12 Captură de ecran a analizorului de spectru și a wattmetrului GRC [CL].

Au fost efectuate măsurători ale influenței polarizorului circular parazit asupra nivelului semnalului recepționat, antena testată fiind instalată la exterior, în mediul real. Baliza radio de referință a fost instalată pe o structură izolatoare la o distanță și înalțime convenabile față de antena supusă testului, în zona de câmp îndepărtat (>10 λ).

Din considerente practice, distanța și unghiul de vizibilitate dintre baliza radio de referință și antena testată AUT au fost alese ca în Figura II-13.



Figura II-13 Dispunerea relativă a antenei de referință și a antenei supusă testului AUT [CL]

Au fost efectuate două seturi de măsurători, corespunzătoare polarizării verticale, respectiv orizontale a antenei dipol de referință, pentru situațiile în care polarizorul lipsește (NO) și pentru diferite poziții unghiulare ale elemenților paraziți: vertical (V), orizontal (H) și înclinat (45°).

Rezultatele sunt rezumate în Tabelul II-2. Erorile datorate pierderilor, reflexiilor parazite, dezadaptărilor și nealinierii au fost neglijate.

Tabelul II-2 Efectul polarizorului circular cu elemenți paraziți asupra nivelului semnalului recepționat, pentru o putere de emisie de 10 mW, la frecvența de 433,92 MHz [CL]

Polarizarea antenei de referință	Nivelul relativ al semnalului recepționat [dB]			
	NO	V	Н	45°
Н	-33,5	-29,5	-34,5	-23,5
V	-24	-26,5	-23	-25,5

Efectul polarizorului circular se observă clar: pentru o undă incidentă polarizată orizontal (H), atunci când elemenții paraziți sunt înclinați (45°), există un câștig relativ de 10 dB, față de situațiile în care polarizorul lipsește sau are elemenții orizontali.

II.2. Antenă omnidirecțională cu impedanță complex conjugată

În cadrul rețelei ROAN, se propune utilizarea la emisie a unei antene cu impedanță complex conjugată (*turnstile feeding*) [58][59][60], caracterizată printr-o mare simplitate a circuitului electric și d.p.d.v. constructiv. Acest tip de antenă, constă din doi dipoli ortogonali care au impedanțele complex conjugate, alimentați în paralel cu aceeași linie de transmisie.



Figura II-14 Circuitul echivalent al antenei cu impedanță complex conjugată [CL].

Există două situații practice în care impedanțele celor doi dipoli sunt complex conjugate și prin punerea lor în paralel se obține o impedanță rezultantă de 50 Ω .



Figura II-15 Geometria antenei cu impedanță complex conjugată în planurile xz (a) și yz (b) [CL].



Figura II-16 Geometria antenei cu impedanță complex conjugată în planul xy (a) și în spațiul xyz (b) [CL].

Cazul de interes pentru scopul propus, presupune componentele rezistive și reactive ale celor doi dipoli egale în modul:

$$R_x = R_y = |X_x| = |X_y| = 50 \,\Omega \implies \begin{cases} Z_x = 50 + j \cdot 50 \\ Z_y = 50 - j \cdot 50 \end{cases}$$
(2.1)

Componentele reactive de semn opus și egale în modul cu componentele rezistive, introduc defazaje de $\pm 45^{\circ}$ ale curenților prin cei doi dipoli față de tensiunea de alimentare (echivalent cu un defazaj total de 90° între curenții prin cei doi dipoli), rezultând un câmp cu polarizare circulară pe direcție axială.

Pentru testarea soluției propuse, au fost efectuate simulări, pornind de la considerentele teoretice și practice ilustrate anterior, cu programul de analiză a antenelor MMANA-GAL [45].



Figura II-17 Caracteristicile de directivitate totală pentru antena cu impedanță complex conjugată (în plan orizontal – stânga, în plan vertical - dreapta) [CL].

Pentru verificarea experimentală a rezultatelor obținute prin simulare a fost construită o antenă omnidirecțională cu impedanță complex conjugată redusă la scară. Antena de test a fost dimensionată pentru banda de 137 MHz alocată comunicațiilor sateliților meteorologici NOAA, cu scopul de a determina cu ajutorul acestora caracteristica de directivitate în condiții reale de operare [21].

Antena a fost concepută astfel încât să permită modificarea parametrilor geometrici: cei doi dipoli contruiți din elemenți de antenă telescopici, elementul central de prindere a dipolilor (printat 3D) cu posibilitate de modificare a unghiului elemenților, suportul central reglabil în înălțime (Figura II-18).



Figura II-18 Antenă de test cu impedanță complex conjugată [CL].

Valoarea impedanței la frecvența de interes pentru dipolul inductiv Z=49,5+j53, respectiv valoarea impedanței pentru dipolul capacitiv obținută experimental Z=50,4-j50,2.

După montarea celor doi dipoli în paralel, a fost măsurată impedanța totală a sistemului radiant obținut (Figura II-19), pe frecvența centrală de interes 137,5 MHz, valoarea acesteia fiind Z=53,5-j0,6.



Figura II-19 Impedanța măsurată pentru antena cu impedanță complex conjugată [CL].

Raportul de unde staționare SWR măsurat pe frecvența centrală este egal cu 1,07. Lățimea de bandă obținută pentru un raport de unde staționare 1:1,5 este de aproximativ 26 MHz (128,4–154,6 MHz).

Rezultatele obținute experimental confirmă validitatea conceptului și a valorilor dimensionale obținute prin simulare.

CAPITOLUL III SISTEME DE ALIMENTARE ALE ANTENELOR

Sub această titulatură au fost grupate blocurile funcționale intercalate între antenă și receptor/emițător, elemente care asigură: transmiterea semnalului de radiofrecvență (linii de transmisie), tratarea problemei curenților de mod comun (simetrizarea antenelor), filtrarea semnalului (filtre de radiofrecvență), amplificarea semnalului (preamplificatoare), protecția la descărcări electrostatice (ESD = *ElectroStatic Discharge*).

Avându-se în vedere dezvoltarea unei rețele cu un număr mare de sisteme de recepție distribuite geografic, au fost căutate soluții practice care să îndeplinească cerințele tehnice dorite și care să fie simple, reproductibile și accesibile.

Linii de transmisie

Cercetările asupra liniilor coaxiale de transmisie efectuate de către Lloyd Espenschied and Herman Affel în cadrul Laboratoarelor Bell (*Bell Labs*) în anul 1929, au arătat faptul că atenuarea minimă a unui cablu coaxial se obține pentru o impedanță a acestuia de aproximativ 77 Ω , tensiunea maximă de străpungere corespunde unei impedanțe de 60 Ω , iar puterea maximă ce poate fi transmisă corespunde unei impedanțe de 30 Ω [70][71].

La emisie, ca un compromis între pierderi și puterea transmisă, s-a încetățenit utilizarea cablurilor coaxiale cu impedanța de 50 Ω . La recepție, unde se dorește obținerea unei atenuari minime a semnalului transmis, se utilizează cu predilecție cabluri coaxiale cu impedanța standardizată de 75 Ω . Pentru a obține aceeași valoare a atenuarii este necesară utilizarea unui cablu coaxial cu impedanța de 50 Ω cu diametrul exterior mai mare decât al unui cablu coaxial cu impedanța de 75 Ω (pentru aceeași permitivitate electrică relativă).

Din considerentele ilustrate anterior, pentru sistemul de recepție a fost aleasă utilizarea liniilor coaxiale de transmisie cu impedanța de 75 Ω utilizate în CATV (*CAble TeleVision*) și transmisii de date de bandă largă (*Broadband*).

Pentru alimentarea antenei radiobalizei folosită la detecția radio a meteorilor s-a optat pentru un cablu coaxial cu impedanța de 50 Ω de tip RG213, al cărui factor de velocitate este $vf_c = 66\%$.

Filtre și preamplificatoare de antenă

Analiza spectrului de radiofrecvență (30-1000 MHz) în amplasamentul USV a arătat faptul că nivelul cel mai mare al semnalului îl au stațiile de radiodifuziune WFM locale din banda de frecvență 88-108 MHz. Aceste semnale cu nivel mare, considerate perturbatoare, pot desensibiliza radioreceptoarele care nu sunt dotate cu filtre de radiofrecvență la intrare.

Pentru atenuarea semnalelor din banda WFM 88-108 MHz, s-a optat pentru realizarea unor filtre oprește bandă realizate din linie coaxială de transmisie (*stub coaxial filters*). Acestea constau dintr-un segment de linie coaxială de transmisie cu capătul liber în scurtcircuit cu lungimea $l_c = \frac{\lambda}{4} \cdot v f_c$ la frecvența de operare (49,5 MHz), care pentru semnalele utile se

comportă ca un filtru trece bandă. Frecvențele (n·99 MHz) pentru care filtrul coaxial are lungimea de $\lambda/2$ sau multipli ai acesteia sunt rejectate.

O atenuare de inserție mare a filtrului de intrare este echivalentă cu degradarea factorului de

Sunt atenuate de asemenea și semnalele emise de stațiile radio care operează în gama undelor lungi UL, medii UM și scurte US care ajung la sistemul de detecție a meteorilor prin propagare ionosferică sau prin undă directă.

A fost caracterizat cu ajutorul programului de simulare *LTSpice* comportamentul unui filtru realizat din linie coaxială de transmisie cu lungimea electrică $\lambda/4$, având capătul liber în scurtcircuit (Figura III-1). Simularea a fost efectuată în plaja de frecvență 1-200 MHz, pentru o linia de transmisie ideală (fără pierderi) acordată pe frecvența de 98 MHz.



Figura III-1 Schema electrică a filtrului ideal din linie coaxială $\lambda/4$ [CL].

Banda de trecere a semnalelor utile la -3 dB este de aproximativ 69 MHz (14,5 – 83,5 MHz), atenuarea maximă teoretică la frecvența de 98 MHz având valoarea de -44 dB (Figura III-2).

Atenuarea teoretică la cele două capete ale benzii de radiodifuziune WFM este de -5 dB. S-a scăzut atenuarea de 6 dB introdusă de divizorul format din rezistența internă a sursei R_S și rezistența sarcinii R_L .



Figura III-2 Caracteristica de frecvență a filtrului ideal din linie coaxială X/4 [CL].

Creșterea atenuarii semnalelor WFM se poate obține prin utilizarea unui filtru cu mai multe celule (elemente de linie coaxială de transmisie).

Inserarea în fața receptorului a unui filtru din linie coaxială $\lambda/4$ în scurtcircuit asigură, pe lângă filtrare, și protecția la descărcări electrostatice ESD, elementul radiant al antenei fiind astfel conectat la masă din punct de vedere al curentului continuu.

Pentru creșterea raportului semnal/zgomot SNR se utilizează preamplificatoare cu factor de zgomot cât mai scăzut, amplificarea suplimentară compensând pierderile introduse de linia de transmisie. Rezistența la intermodulații este un alt criteriu de luat în calcul mai ales atunci când folosim amplificatoare de bandă largă. S-a optat pentru utilizarea unor preamplificatoare de bandă largă destinate recepției TV analogice și digitale terestre.

Simetrizarea antenelor (rejecția/atenuarea curenților de mod comun)

În general sistemele radiante sunt simetrice, în timp ce linia coaxială de transmisie utilizată pentru alimentare este asimetrică. Pentru evitarea apariției curenților de mod comun, care influențează caracteristica de directivitate prin includerea exteriorului liniei coaxiale de transmisie în sistemul radiant (tresa, la emisie radiază semnalul de radiofrecvență, la recepție captează semnalele parazite), este necesară utilizarea unui circuit de simetrizare.

Există mai multe tipuri de circuite de simetrizare de bandă largă sau de bandă îngustă (acordate), care, în funcție de scopul urmărit, utilizează elemente de circuit concentrate sau distribuite (componente LC, segmente de linii de transmisie liniare sau în buclă, înfășurări pe miezuri de ferită).

În absența circuitului de simetrizare și a conexiunii la priza de pământ a tresei, cazurile cele mai defavorabile în care curentul de mod comun pe exteriorul tresei este maxim, au loc pentru lungimi ale tresei liniei coaxiale de transmisie multipli impari de sfert de lungime de undă $l = (2n + 1) \times \lambda/4$, unde $n \in \mathbb{N}$. În aceste cazuri impedanța văzută în punctul de alimentare este mică (s-a notat cu Z< impedanța de valoare mică). Pentru lungimi ale tresei multipli de semiundă, în absența conexiunii la priza de pământ, impedanță văzută în punctul de alimentare este mare (s-a notat cu Z > impedanța de valoare mare) și în consecință curentul pe exteriorul tresei este minim (Figura III-3 b).



Figura III-3 Impedanța terminală și distribuția ventrelor și nodurilor de curent și tensiune pentru conductori λ/4 și λ/2, cu împământare (a) și fără împământare (b). Simetrizor cu linie λ/4 (c). Simetrizor cu impedanțe concentrate serie (d) [CL].

Prin conectarea la priza de pământ a tresei liniei coaxiale de transmisie în aceste zone, multipli impari de $\lambda/4$ plecând de la antenă, se introduce o impedanță mică față de punctul de alimentare

al antenei, având ca rezultat diminuarea curenților de mod comun (*quarter wave balun* - Figura III-3 c).

Același efect, de diminuare a curenților de mod comun, îl are și conectarea la tresă a unui element radial (sau mai mulți) cu lungimea de $\lambda/4$ la distanțe multipli impari de $\lambda/4$, plecând de la antenă. Și în acest caz, impedanța văzută în punctul de alimentare al antenei este mare.

Altfel, atenuarea curenților de mod comun se poate obține prin introducerea de impedanțe serie în ventrele de curent care apar pe exteriorul tresei cablului coaxial, la intervale $l = n \times \lambda/2$, plecând de la antenă, unde $n \in \mathbb{N}$ (Figura III-3 d).

Alimentarea antenei verticale $3\lambda/4$

În absența unui plan de masă consistent, în cazul antenelor verticale $3\lambda/4$ analizate în capitolul doi, este necesară decuplarea exteriorului tresei cablului coaxial din punct de vedere al radiofrecvenței pentru evitarea apariției curenților de mod comun. Aceștia au efecte nedorite asupra caracteristicii de directivitate și, la recepție, zgomotul exterior captat de tresa cablului coaxial este condus la bornele antenei, ajungând în final la intrarea receptorului.

Pentru evitarea apariției curenților de mod comun, s-a optat pentru împământarea tresei liniei coaxiale de transmisie la distanța de $\lambda/4$ (sau multipli impari) față de punctul de alimentare al antenei. Prin aceasta se introduce o impedanță mică în punctul de împământare, impedanță văzută mare în punctul de alimentare al antenei.

Inserarea în punctul de alimentare al antenei a unui filtru coaxial cu lungimea $l_c = \frac{\lambda}{4} \cdot v f_c$ având capătul liber în scurtcircuit asigură, pe lângă o preselecție a semnalului (cu o atenuare de inserție mică în banda de trecere), și protecția la descărcări electrostatice ESD.

În Figura III-4 este prezentată evoluția soluțiilor propuse pentru sistemul de alimentare al antenei verticale $3\lambda/4$.



Figura III-4 Sistemul de alimentare al antenei verticale $3\lambda/4$ cu un element radial [CL].

Alimentarea antenei cu impedanță complex conjugată

Antena cu impedanță complex conjugată este simetrică în timp ce linia coaxială de transmisie este asimetrică. Cuplarea cablului coaxial poate avea efecte nedorite asupra parametrilor antenei, în special în situațiile extreme când exteriorul tresei cablului coaxial are lungimi multipli impari de $\lambda/4$ pentru situația ideală când întreg sistemul este izolat față de sol, sau pentru lungimi multipli de $\lambda/2$ când tresa este conectată la o priză de pământ. În ambele situații din punctul de alimentare al antenei impedanța "văzută" este mică, favorizând circulația curenților de radiofrecvență (mai mult, în practică elementele din mediul înconjurător și pozarea asimetrică a liniei de transmisie pot introduce dezechilibre în sistemul radiant).

Impedanța antenei fiind egală cu cea a liniei coaxiale de transmisie, este necesar un circuit de simetrizare cu raportul impedanțelor 1:1. Se propune utilizarea unui circuit de simetrizare 1:1 de bandă largă care utilizează miezuri de ferită toroidale pe care este înfășurat cablul coaxial (*choke balun/common mode choke* = șoc de mod comun). Acest circuit electric introduce la frecvența de operare o impedanță în serie cu tresa de valoare $Z_F=R_F+jX_F$, atenuând curenții de radiofrecvență de mod comun care pot apărea pe exteriorul tresei cablului coaxial.



Figura III-5 Structura sistemului de alimentare al antenei de emisie a radiobalizei ROAN (simetrizare antenă, filtrare armonice, protecție la descărcări electrostatice ESD) [CL].

Din considerentul funcționării pe o frecvență unică, se propune inserarea în circuit a unui filtru oprește bandă FOB (*notch*) realizat din linie coaxială de transmisie cu lungimea $lc = \lambda/4$ la frecvența de emisie ($\lambda/2$ la frecvența de acord), având capătul liber în scurtcircuit. Acest tip de filtru este caracterizat printr-un factor de calitate ridicat la frecvența de acord, introducând o atenuare a armonicelor superioare pare, în special a armonicei de ordinul doi, reducându-se riscul de interferare (BCI) a serviciilor comerciale de radiodifuziune din gama de unde ultrascurte UUS (88-108 MHz). Capătul liber, în scurtcircuit, este conectat la priza de pământ, asigurându-se astfel și protecția la descărcări electrostatice.

Suplimentar, prin dimensionarea corespunzătoare a lungimii lp a traseului de împământare, multiplu impar de $\lambda/4$, se reduce riscul apariției curenților de mod comun pe exteriorul tresei liniei coaxiale de alimentare.

CAPITOLUL IV RECEPTOARE RADIO PENTRU DETECTAREA METEORILOR

În domeniul detecției meteorilor în spectrul undelor radio există câțiva parametri specifici pe care radioreceptoarele utilizate în acest scop trebuie să le aibă, pe lângă posibilitatea acordului continuu în frecvență și stabilitatea frecvenței.

Pentru a putea extrage profilul de putere al semnalului reflectat de meteor, radioreceptorul trebuie să aibă posibilitatea demodulării semnalelor cu bandă laterală unică BLU (SSB = Single Side Band) și posibilitatea dezactivării controlului automat al amplificării CAA (AGC = Automatic Gain Control).

Experimentele preliminare au fost efectuate cu radioreceptoare industriale superheterodină cu multiplă schimbare de frecvență, ulterior fiind abordat domeniul radioreceptoarelor definite prin program (*Software Defined Radio receivers* = SDR).

În prezent există două clase principale de sisteme SDR [61]:

- 1. Sisteme SDR cu schimbare de frecvență (*IF-DSP = IF Digital Signal Processing*) conversia de frecvență a semnalului RF de intrare pe o frecvență intermediară joasă, urmată de eșantionarea semnalului cu un convertor analogic-digital (*ADC*).
- 2. Sisteme SDR cu conversie digitală directă (*DDC* = *Direct Digital Convertion*) conversia A/D (analogic/digital) a semnalului la frecvența de lucru.

Pentru domeniul detecției radio a meteorilor, unul dintre avantajele receptoarelor SDR rezidă în posibilitatea de a demodula simultan mai multe canale de frecvență din banda de bază disponibilă la ieșire, aspect necesar pentru implementarea unui sistem de detecție multiplă (multi-emițător/multi-frecvență). Acest deziderat poate fi atins cu un nivel de complexitate hardware minimal, utilizând receptoarele SDR.

Într-un prim pas a fost dezvoltat un radioreceptor definit prin program SDR cu schimbare de frecvență de tip *IF-DSP*, deschizându-se o cale de utilizare a radioreceptoarelor și scanerelor radio cu posibilități de demodulare doar a semnalelor AM/FM [13].

Pasul următor a fost făcut în direcția receptoarelor SDR industriale, urmărind pe lângă parametrii tehnici necesari și accesibilitatea acestora. Un fapt important în sensul creșterii accesibilității receptoarelor SDR, l-a constituit descoperirea posibilității de utilizare a receptoarelor de larg consum, destinate recepției radiodifuziunii digitale (DAB) și televiziunii digitale terestre (DVB-T) pe post de adaptoare radio panoramice.

Accesibilitatea receptoarelor SDR a atras apariția de numeroase programe și aplicații, fiind disponibile *driver*-e pentru diferite sisteme de operare și blocuri funcționale pentru Matlab/Simulink, LabView și GNU Radio. Toate acestea au condus la o largă răspândire a receptoarelor RTL-SDR în zona experimentală și în educație.

Determinări experimentale ale parametrilor receptoarelor definite prin program

În cadrul laboratorului de cercetări în domeniul comunicațiilor digitale DVT (*Digital Broadcasting Research Laboratory*) de la Universitatea Tehnică din Ilmenau, Germania, au fost efectuate măsurători ale parametrilor de intrare pentru trei modele de receptoare SDR USB.

Determinări experimentale ale cifrei de zgomot și ale sensibilității

Pentru măsurarea cifrei de zgomot *NF* utilizând metoda coeficientului Y, a fost utilizată o sursă de zgomot profesională HP 346C care acoperă domeniul de frecvență 10 MHz-26,5 GHz.

Standul mai cuprinde un calculator cu sistem de operare Windows, măsurarea nivelului la ieșirea receptorului fiind efectuat cu programul Simulink (Matlab) (Figura IV-1). Din punct de vedere funcțional, ansamblul SDR+Matlab/Simulink constituie un analizor de spectru, măsurătorile reducându-se practic la găsirea valorii zgomotului la intrarea acestui analizor.



Figura IV-1 Diagrama bloc a standului pentru măsurarea cifrei de zgomot NF [CL].

Măsurarea puterii a fost efectuată în zona liniară a benzii de trecere, între frecvența centrală și unul dintre capetele benzii.

Caracteristicile de variație comparate ale celor trei receptoare SDR măsurate, sunt ilustrate în Figura IV-2.



Figura IV-2 Cifra de zgomot NF măsurată prin metoda coeficientului Y [CL].

Din analiza cifrei de zgomot / semnal minim detectabil se observă faptul că receptoarele SDR au o sensibilitate satisfăcătoare, suficientă pentru majoritatea aplicațiilor. Intercalarea la intrare a unui preamplificator cu zgomot redus și a unor filtre de radiofrecvență rezolvă problema sensibilității, performanțele ajungând la nivelul celor atinse de echipamente mult mai costisitoare.

CAPITOLUL V STAȚIE PILOT DE DETECȚIE A METEORILOR ÎN SPECTRUL UNDELOR RADIO

Pe baza analizei din capitolele precedente, a fost implementat practic un sistem pilot de radiodetecție a meteorilor (senzor integrat pentru detecția radio a meteorilor) ROAN@USV [16]. Arhitectura sistemului este ilustrată în figura Figura V-1.



Figura V-1 Arhitectura sistemului de detecție radio a meteorilor [CL].

Stația de recepție pilot pentru detecția radio a meteorilor din cadrul proiectului ROAN cuprinde o componentă instalată convenabil din punct de vedere al radiofrecvenței (senzor) și o unitate de procesare a datelor (server), componente interconectate prin rețeaua Internet. Senzorul este implementat utilizând un minisistem de calcul (ARM SBC) pe care rulează o distribuție Linux – inițial Marsboard A10, ulterior înlocuit cu Raspberry Pi 3 Model B+. Aplicațiile server rulează pe un calculator personal compatibil IBM-PC sub sistemul de operare Windows.

Sistemul utilizează un radioreceptor, preamplificator și o linie coaxială de transmisie cu impedanțele de 75 Ω . Antena $3\lambda/4$ cu un radial a fost optimizată pentru o impedanță de 75 Ω .



Figura V-2 Antena $3\lambda/4$ -75 Ω cu un element radial: geometria și distribuția curentului; caracteristicile de directivitate în planurile orizontal și vertical [CL].

Pe baza acestor valori dimensionale obținute prin simulare a fost realizată practic o antenă verticală $3\lambda/4$ cu un singur radial și impedanța de 75 Ω .

Antena a fost acordată cu analizorul de antenă Rig Expert AA200, inițial pe frecvența de 49,4 MHz. Caracteristicile de frecvență și impedanță determinate într-un ecart de frecvență de frecvență de 5 MHz sunt ilustrate în Figura V-3.



Figura V-3 Parametrii electrici determinați experimental pentru antena $3\lambda/4 - 75 \Omega$ cu un element radial [CL].

Această antenă a fost instalată pe terasa Observatorului Astronomic din cadrul Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava.

Radioreceptorul utilizat în cadrul sistemului de radiodetecție a meteorilor RTL-SDR, este o variantă îmbunătățită a receptorului generic RTLSDR.

Pentru atenuarea semnalelor de radiodifuziune WFM (88-108 MHz) și a semnalelor cu frecvențe inferioare benzii de interes, a fost realizat un filtru oprește bandă realizat din linie coaxială de transmisie Commscope F677TSV cu impedanța de 75 Ω și lungimea $\lambda/4$ (*stub coaxial filter*). Inserarea în circuit a fost efectuată prin intermediul unui adaptor T tip F (Figura V-4).



Figura V-4 Filtru oprește bandă λ /4 realizat din linie coaxială de transmisie [CL].

Sistemul de detecție radio a meteorilor ROAN@USV a fost proiectat să opereze pe două frecvențe ale purtătoarelor video emise de stații analogice TV Banda I: 49,739 MHz (canal R1) și 59,258 MHz (canal R2).

În funcție de perioada anului și de activitatea solară, condițiile de propagare sunt variabile, reflexiile pe stratul E-sporadic generând ecouri false contorizate de către sistemul de detecție a meteorilor. În plus, perturbații radioelectrice locale temporare de origine necunoscută, au condus pe parcursul desfășurării măsuratorilor ZHR la favorizarea unei dintre cele două frecvențe monitorizate.

Datele privind rata orară zenitală ZHR sunt salvate tabelar în format text de către aplicația HROFFT [83] și ulterior convertite în format grafic pentru publicare pe site-ul RMOB cu ajutorul programului Colorgramme RMOB Lab v3.0 [84] (Figura V-5).



Figura V-5 Rata orară zenitală ZHR măsurată pe parcursul lunii august 2019 la stația ROAN@USV [CL].

Testarea funcționării corecte a sistemului de detecție radio a meteorilor a fost realizată practic în timpul desfășurării unor ploi de meteori, în Figura V-6 fiind ilustrate grafic spre exemplificare ratele orare ZHR corespunzătoare lunilor ianuarie 2016, respectiv 2018. Se poate remarca o creștere a ZHR pe data de 4 ianuarie, în timpul desfășurării ploii de meteori Cuadrantide.



Figura V-6 Ratele orare zenitale ZHR corespunzătoare lunilor ianuarie 2016 (stânga) și 2018 (dreapta) [CL].

CAPITOLUL VI CONCLUZII FINALE ȘI DIRECȚII DE STUDIU

Pentru obținerea unei imagini de ansamblu cât mai exacte asupra distribuției meteoroizilor pe orbita Pământului și pentru a crește rata de detecție a bolizilor, proces care poate conduce la recuperarea de material meteoric, este de dorit o densitate mare a stațiilor pentru detecția meteorilor în spectrul undelor radio.

Contribuții teoretice

S-a realizat o analiză bibliografică cu privire la studiul meteorilor în spectrul undelor radio, cu accent pe metoda radarului de tip bistatic.

S-a realizat o clasificare a tipurilor de sisteme RADAR în funcție de amplasamentele emițătorului și receptorului și de apartenența emițătorului.

S-au studiat fenomenele de formare a urmei ionizate, mecanismele de reflexie și dispersie a undelor radio pe urma ionizată a meteorilor, fenomenul de difuzie a urmei ionizate, efectul de *fading* a semnalului la recepție.

Au fost analizate principalele sisteme de detecție radio ce pot fi folosite în detecția meteorilor și componentele adiționale ale sistemelor de recepție.

S-a efectuat un studiu privind tipurile de antene utilizate în mod curent în cadrul altor sisteme de detecție a meteorilor în spectrul undelor radio, și a parametrilor necesari ale acestora.

Au fost analizate posibilele emițătoare de oportunitate utilizabile în scopul detecției radio a meteorilor de pe teritoriul țării noastre.

Plecând de la analiza variației caracteristicii de directivitate a antenelor filare în funcție de lungimea elementului radiant, se propune utilizarea unor antene omnidirecționale cu polarizare verticală cu dimensiuni atipice ale elementului radiant, antene care prezită o caracteristică favorabilă de directivitate în zona unghiurilor de elevație medii.

Pentru creșterea câștigului antenei, în situațiile când bilanțul energetic al tronsonului radio nu este favorabil, se propune utilizarea unei arii directive cu polarizare verticală, a cărei caracteristică de directivitate este favorabilă la unghiurile de elevație de interes.

A fost realizată o analiză asupra aplicațiilor software necesare recepționării, demodulării și interpretării reflexiilor undelor radio pe urme de meteoroizi.

Au fost studiate opțiunile disponibile în domeniul radioreceptoarelor, urmărind criteriile pe care acestea trebuie să le indeplinească pentru atingerea scopului propus, subliniindu-se avantajele pe care le au radioreceptoarele definite prin program.

Publicație:

 T. Georgescu, A. Georgescu, I. Ghită, S. Potlog, C. Leşanu, M. Birlan, D. Savastru, C.-K. Banică, C. Drăgăsanu, *"Romanian ALLSKY Network - a systematic approach for meteor detection"*, Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013. Eds.: Gyssens M.; Roggemans P.; Zoladek P. International Meteor Organization, ISBN 978-2-87355-025-7, pp. 40-43. Ca un prim pas, în direcția implementării unei radiobalize dedicate studiului meteorilor, a fost analizat principiul de funcționare al unei antene *turnstile* cu impedanță complex conjugată și, avându-se în vedere frecvența fixă de operare a acesteia, s-a propus un sistem de alimentare prin care sunt soluționate aspectele legate de filtrarea armonicelor, atenuarea curenților de mod comun și protecția la descărcări electrostatice.

În domeniul achiziției și procesării digitale a semnalului, au fost analizate performanțele oferite de către sistemele de calcul disponibile, concluzionând faptul că cerințele pot fi îndeplinite și de către minisistemele de calcul integrate de ultimă generație.

Contribuții experimentale

A fost proiectată, modelată și simulată o antena omnidirecțională cu polarizare verticală având lungimea elementului radiant egală cu trei sferturi de lungime de undă, prevăzută cu unul sau mai mulți elemenți radiali.

Publicație:

 C. Leşanu, A. Dragoiu, "SDR - radio meteor affordable approach", Proceedings of the International Meteor Conference, Sibiu, Romania, 15-18 September, 2011 Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. International Meteor Organization, ISBN 2978-2-87355-023-3, p. 81.

A fost proiectată, realizată practic și testată experimental o antenă omnidirecțională cu polarizare verticală având lungimea elementului radiant egală cu trei sferturi de lungime de undă și prevăzută cu un element radial.

Publicație:

3. C. Leşanu, A. Done, A.-M. Căilean, A. Graur, "Vertical Polarized Antennas for Low-VHF Radio Meteor Detection", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 2018, ISBN: 978-1-5386-1493-8.

Caracteristicile de directivitate în plan vertical ale antenelor $3\lambda/4$, cu unul și respectiv doi elemenți radiali, au fost determinate experimental cu ajutorul sateliților artificiali meteorologici cu orbită joasă LEO utilizați pe post de surse radio de referință. Metodologia de lucru a fost aplicată și pentru trasarea caracteristicilor de directivitate ale antenelor utilizate în domeniul comunicațiilor prin satelit, caracterizate în condiții reale de operare.

Publicație:

4. Done, A. M. Căilean, C. Leşanu, M. Dimian, A. Graur, "Considerations on Ground Station Antennas used for communication with LEO satelites", International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iași, România, 13-14 July 2017, ISBN 978-1-5386-0674-2

În urma analizei antenei verticale $3\lambda/4$, au rezultat două noi configurații de antene cu potențială aplicabilitate în domeniul radioastronomiei și al radiocomunicațiilor spațiale: antenă directivă $3\lambda/4$ cu polarizare verticală și antenă verticală cu polarizare circulară cu elemenți paraziți. Aceste antene au fost modelate și simulate computerizat.

A fost proiectată, realizată practic și testată experimental o antenă omnidirecțională având lungimea elementului radiant egală cu trei sferturi de lungime de undă și prevăzută cu polarizor circular parazit. Pentru analiza efectului polarizorului circular cu elemenți paraziți asupra carcteristicii de directivitate a fost realizat un stand experimental instalat în aer liber (la exterior), cu antena testată în mod recepție. Publicație:

 C. Leşanu, A. Done, "Parasitic Circular Polarized Vertical Antennas", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 19-21 May 2016, ISBN 978-1-5090-1992-2.

A fost modelată și simulată o antenă omnidirecțională cu polarizare circulară cu cu impedanță complex conjugată. A fost analizat teoretic principul de funcționare al acesteia cu scopul de a determina sensul polarizării. Ulterior a fost proiectată, realizată practic și testată experimental o antenă redusă la scară, rezultatele confirmând corectitudinea valorilor dimensionale teoretice.

Publicație:

6. C. Leşanu, A. Done, C.-I. Adomniţei, "Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 2020.

A fost obținută și validată caracterizarea experimentală a unor radioreceptoare definite prin program (SDR) din punct de vedere al parametrilor la intrare: factor de zgomot și sensibilitate.

A fost realizat un sistem de recepție educațional controlat prin internet, care poate fi configurat pentru utilizare într-o gamă largă de frecvențe și diferite tipuri de modulație, de către unul (server RTL_TCP) sau mai mulți utilizatori simultan (OpenWebRX).

Publicație:

 Done, C. Leşanu, A.-M. Căilean, A. Graur, M. Dimian, "Implementation of an on-line remote control ground station for LEO satellites", 21st International Conference on System Theory, Control and Computing, Octombrie 19 - 21, 2017, Sinaia, România, ISBN 978-1-5386-3842-2.

Lucrarea a propus soluții practice care să îndeplinească cerințele tehnice dorite și care să fie simple, reproductibile și accesibile pentru următoarele blocuri funcționale intercalate între antenă și receptor/emițător: transmiterea semnalului de radiofrecvență, tratarea problemei curenților de mod comun, filtrarea și amplificarea semnalului, protecția la descărcări electrostatice.

A fost propus și implementat practic un sistem didactic dedicat detecției radio a meteorilor care înglobează rezultatele cercetărilor.

Publicație:

8. C. Leşanu, "ROAN Remote Radio Meteor Detection Sensor", Proceedings of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2-5 June 2016, Eds.: Roggemans, A.; Roggemans, P., ISBN 978-2-87355-030-1, pp. 155-158.

Direcții ulterioare de studiu

O primă direcție de cercetare, ca urmare a decomisionării stațiilor de televiziune analogice din banda I utilizate pe post de emițătoare de oportunitate, constă în dezvoltarea unei radiobalize dedicate studiului meteorilor în spectrul undelor radio.

Un prim pas în acest sens a fost efectuat în cadrul prezentei teze, fiind propusă și analizată o antenă de tip *turnstile* cu impedanță complex conjugată.

A fost demarată, în colaborare, proiectarea și realizarea emițătorului propriu-zis, și au fost efectuate primele demersuri cu privire la autorizarea și amplasamentul radiobalizei.

Având la dispoziție propriul emițător (baliză radio) a cărui poziție geografică și parametri tehnici cum ar fi puterea de emisie, caracteristica de directivitate a antenei, tipul de modulație și conținutul mesajului emis sunt bine cunoscuți, devine posibilă realizarea unei rețele de stații de recepție pentru detecția meteorilor care să permită determinarea vitezei și traiectoriei meteorilor și estimarea dimensiunii acestora.

Publicație:

9. T. Georgescu, A. Georgescu, C. Leşanu, "The evolution of ROAN 2016 - Radio surveillance of meteors and determination of reflection points through calculation of the radio path, based on time", Proceedings of the International Meteor Conference, Egmond, Olanda, 2-5 June 2016, ISBN 978-2-87355-030-1, pp. 80-82.

Dezvoltarea minisistemelor de calcul a căror viteză și putere de procesare a crescut considerabil, face posibilă implementarea algoritmilor și programelor de analiză a semnalului local chiar la bordul acestora, serverul central preluând via internet datele în format redus și efectuând calculele necesare pentru determinarea parametrilor asociați meteorilor.

BIBLIOGRAFIE

- [3] J. Rendtel, A. Rainer, D. Asher, "*Handbook for meteor observers*", International Meteor Organisation, 2011.
- [4] C. Veerbeeck, J.-M. Wislez, "Proceedings of the Radio Meteor School 2005", International Meteor Organisation, 2006.
- [8] J.-M. Wislez, "*Meteor astronomy using a forward scatter set-up*", Proceedings of the Radio Meteor School, International Meteor Organisation, 2006.
- [9] D.L. Schilling, *"Meteor Burst Communications Theory and Practice"*, John Wiley and Sons, 1993.
- [13] C. Leşanu, A. Dragoiu, "SDR radio meteor affordable approach", Proceedings of the International Meteor Conference, Sibiu, Romania, 15-18 September, 2011 Eds.: Gyssens M. and Roggemans P. International Meteor Organization, ISBN 2978-2-87355-023-3, p. 81.
- [14] T. Georgescu, A. Georgescu, I. Ghită, S. Potlog, C. Leşanu, M. Birlan, D. Savastru, C.-K. Banică, C. Drăgăsanu, "Romanian ALLSKY Network - a systematic approach for meteor detection", Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013. Eds.: Gyssens M.; Roggemans P.; Zoladek P. International Meteor Organization, ISBN 978-2-87355-025-7, pp. 40-43.
- [15] T. Georgescu, A. Georgescu, C. Leşanu, "The evolution of ROAN 2016 Radio surveillance of meteors and determination of reflection points through calculation of the radio path, based on time", Proceedings of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2-5 June 2016, Eds.: Roggemans, A.; Roggemans, P., ISBN 978-2-87355-030-1, pp. 80-82.
- [16] C. Leşanu, "ROAN Remote Radio Meteor Detection Sensor", Proceedings of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2-5 June 2016, Eds.: Roggemans, A.; Roggemans, P., ISBN 978-2-87355-030-1, pp. 155-158.
- [17] C. Leşanu, A. Done, "Parasitic Circular Polarized Vertical Antennas", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 19-21 May 2016, ISBN978-1-5090-1992-2.
- [18] A. Done, A. M. Căilean, C. Leşanu, M. Dimian, A. Graur, "Considerations on Ground Station Antennas used for communication with LEO satelites", International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iași, România, 13-14 July 2017, ISBN 978-1-5386-0674-2.
- [19] A. Done, A.-M. Căilean, C. Leşanu, M. Dimian, A. Graur, "Design and implementation of a satellite communication ground station", International Symposium on Signals Circuits and Systems - ISSCS 2017, Iași, România, ISBN 978-1-5386-0674-2.
- [20] A. Done, C. Leşanu, A.-M. Căilean, A. Graur, M. Dimian, "Implementation of an online remote control ground station for LEO satellites", 21st International Conference on System Theory, Control and Computing, Octombrie 19 - 21, 2017, Sinaia, România, ISBN 978-1-5386-3842-2.
- [21] C. Leşanu, A. Done, A.-M. Căilean, A. Graur, "Vertical Polarized Antennas for Low-VHF Radio Meteor Detection", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 2018, ISBN: 978-1-5386-1493-8.
- [22] C. Leşanu, A. Done, C.-I. Adomniţei, "Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection", International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, România, 2020.
- [23] ***, BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations) http://brams.aeronomie.be/
- [24] ***, The International Project of Radio Meteor Observation http://www.amronet.jp/about-hro/index-eng.html

- [25] ***, The Meteor Section of the Royal Netherlands Association for Meteorology and Astronomy (KNVWS) http://werkgroepmeteoren.nl/antennebouw/
- [26] ***, The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) http://meteor.uwo.ca/research/radar/cmor_intro.html
- [27] ***, The All-Sky Interferometric Meteor Radar (SKiYMET) http://www.gsoft.com.au/productsandservices/skiymet
- [28] S.-R. Chung, "Antenna Polarisation for Meteor Burst Communications", University of Western Ontario, Canada, 1997.
- [30] F. Crețu, "Radiotehnică teoretică și practică", Editura PIM, Iași, 2013.
- [34] ***, NOAA Satellite and Information Service: https://www.nesdis.noaa.gov/content/oursatellites
- [36] Tast P., POES-APT Decoder, 2015.
- [39] J. M. Fernández, J. L. Masa-Campos, M. Sierra-Pérez, "Circularly polarized omnidirectional millimeter wave monopole with parasitic strip elements", Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Online Library, Volume 49, Issue 3, pages 664– 668, March 2007.
- [45] M. Mori, MMANA-GAL antenna analyzer software http://hamsoft.ca.
- [50] M. Foegelle, "Antenna pattern measurement: Concepts and techniques", Compliance Engineering, Annual Reference Guide 2002.
- [51] J. A. Fordham, "An introduction to antenna test ranges, measurements and instrumentation", Microwave Instrumentation Technologies, LLC, 2016.
- [52] N. K. Nikolova, "Lecture 8: Basic methods in antenna measurements", Modern Antennas in Wireless Telecommunications Course ECE753, Department of Electrical & Computer Engineering, McMaster University Canada, 2014.
- [53] ***, "Antenna measurement theory: Introduction to antenna measurement", Orbit/Fr Inc., http://www.orbitfr.com, 2016.
- [54] ***, GNU Radio Companion, https://gnuradio.org, 2016.
- [55] S. Katz, "Using GNU Radio Companion: tutorial", Department of Electrical and Computer Engineering, California State University, Northridge, 2016.
- [56] T. Solc, "<u>Noise figure measurements of RTL-SDR dongles</u>", https://www.tablix.org/~avian/blog/, March 2015.
- [57] T. Solc, "Signal power in GNU Radio", https://www.tablix.org/~avian/blog/, April 2015.
- [58] M. Matsunaga, "A Circularly Polarized Spiral/Loop Antenna and Its Simple Feeding Mechanism", "Modern Antenna Systems", book edited by Mohammad A. Matin, ISBN 978-953-51-2926-4, Print ISBN 978-953-51-2925-7, Published: February 22, 2017 under CC BY 3.0 license.
- [59] B. Rama Rao, W. Kunysz, R. Fante, K. McDonald, "*GPS/GNSS antennas*", Artech House, 2013
- [60] I. Radnovic1, A. Nesic, B. Milovanovic, "A New Type of Turnstile Antenna", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 52, No.5, October 2010
- [61] F. Crețu, "Radioreceptoare Proiectare și scheme comentate", Tehnopress, 2007.
- [70] S. Lampen, "Is there an ideal impedance for coaxial cable?", Belden Inc., Mai 2003.
- [71] S. Lampen, "50 ohms: The forgotten Impedance", Belden Inc., August 2010.
- [83] HROFFT software, The International Project for Radio Meteor Observation, <u>http://www.amro-net.jp/</u>.
- [84] Colorgramme RMOB Lab v3.0 software, <u>www.rmob.org</u>.