



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

Decizie nr. 2 din 06.09.2023

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Florin-Lucian CHIPER

**Utilizarea metodelor de localizare a unei surse radio în
sisteme de detecție, localizare și combatere a dronelor**

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Mihai CIUC Univ. Politehnica din București	Președinte
Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
Prof.dr.ing. Daniela TĂRNICERIU Universitatea Tehnică Gh. Asachi Iași	Referent
Prof.dr.ing. Ioan NICOLAESCU Academia Tehnică Militară Ferdinand I	Referent
Conf. Dr. Ing. Alexandru MARȚIAN Univ. Politehnica din București	Referent

BUCUREȘTI 2023

Cuprins

Cuprins	i
1. Introducere	1
1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat	1
1.2 Scopul tezei de doctorat	2
1.3 Conținutul tezei de doctorat	2
2. Stadiul actual al cercetării	3
2.1 Necesitatea DDDS. Incidente și legislație	4
2.1.1 Incidente raportate recent	5
2.1.2 Reglementări privind folosirea dronelor	6
2.2 Detectia dronelor și sisteme de apărare: Clasificare, Senzori, Contramăsuri	6
2.2.1 Clasificarea DDDS	7
2.2.2 Clasificarea senzorilor de detecție	7
2.2.3 Clasificarea contramăsurilor	8
2.2.4 Reglementări privind folosirea bruiajului în DDDS	10
2.3 Detectia și DDDS bazate pe metode RF	10
2.4 Provocări și perspective ale DDDS	11
2.5 Concluzii privind stadiul actual al cercetării	12
3. Aspecte teoretice privind DoA	12
3.1 Metode de determinare a locației unei surse radio	12
3.1.1 Parametrii utilizați pentru determinarea locației	13
3.1.2 Estimarea poziției	13
3.2 Analiza și descrierea algoritmilor de estimare a direcției radio	14
3.2.1 Algoritmul de estimare DoA: MUSIC	14
3.2.2 Algoritmul de estimare DoA: Root MUSIC	15
3.2.3 Algoritmul de estimare DoA: ESPRIT	15
3.2.4 Algoritmul de estimare DoA: MVDR / Capon	15
3.3 Analiza performanței algoritmilor DoA	16
3.3.1 Determinarea DoA în mediul de simulare MATLAB	16
3.3.2 Evaluarea performanțelor după simularea în MATLAB	16
3.3.3 Analiza rezultatelor	17
3.4 Concluzii	17

4	Introducere, descriere și analiză a performanțelor SDR.....	18
4.1	Introducere în tehnologia SDR. Moduri de realizare a unui echipament SDR.....	18
4.2	Evoluția SDR	18
4.2.1	Prima generație de echipamente radio software	19
4.2.2	A doua generație de SDR	19
4.3	Tehnologii derivate pe baza SDR	19
4.4	Funcțiile pe care trebuie să le îndeplinească SDR.....	20
4.5	Analiza comparativă a unor platforme SDR.....	20
4.5.1	Detalierea platformelor SDR pentru care se aplică studiul	20
4.5.2	Descrierea scenariului de măsurare	22
4.5.3	Rezultatele și analiza măsurărilor.....	22
4.6	Concluzii	22
5.	Proiectarea și implementarea unui sistem DDDS - DRONEND	23
5.1	DRONEND - DDDS cu baza la sol	23
5.1.1	Identificarea prezenței dronei folosind algoritmi de detecție spectrală	24
5.1.2	Localizarea dronei folosind algoritmi AoA	25
5.1.2	Neutralizarea unei drone folosind bruiaj RF	25
5.2	DRONEND - DDDS aerial.....	26
5.2.1	Descrierea platformei SDR USRP E-312	26
5.2.2	Descrierea soluției și a funcțiilor DDDS – DRONEND aerial	26
5.2.3	Detalierea funcțiilor DRONEND-aerial	27
5.2.4	Detalii privind implementarea hardware a DRONEND - aerial	28
5.3	Concluzii	28
6.	Concluzii	29
6.1	Rezultate obținute	30
6.2	Contribuții personale	32
6.3	Lista lucrărilor originale	33
6.4	Perspective de dezvoltare a activității de cercetare.....	34
	Bibliografie	35

1. Introducere

Existența unui număr mare de aplicații care se bazează pe determinarea unghiului de incidență a semnalelor radio care provin de la o sursă a cărei localizare prezintă interes, precum și apariția și evoluția rapidă a unor tehnologii de susținere sau de combatere a dronelor au fost principalele motive pentru alegerea acestei teze de doctorat. Pornind de la cele mai recente inovații tehnologice din domeniul comunicațiilor radio, am ales folosirea platformelor Radio Definit prin Software (SDR - *Software Defined Radio*) ca fiind potrivite pentru susținerea aplicațiilor dezvoltate în cadrul acestei teze [1].

În vederea realizării aplicațiilor care implică localizarea unor bunuri sau persoane s-a constatat că este necesară o estimare cât mai precisă a direcției din care sosește semnalul și apoi a poziției sursei, chiar și în transmisiuni care nu se află în vizibilitate directă radio - NLOS (*Non-Line-Of-Sight*) sau în cazul propagării multicale [2].

Unele dintre cele mai importante contribuții tehnologice din lumea ingineriei moderne se regăsesc în domeniul comunicațiilor wireless și în dezvoltarea de sisteme inteligente cu aplicabilitate multiplă, în special în mediul militar. Acestea pot fi utilizate atât pentru aplicații prietenoase dar și ca soluții combatante. Odată cu dezvoltarea acestor sisteme s-a impus și dezvoltarea unor contramăsuri care să țină pasul cu această evoluție. În ambele cazuri trebuie respectate cerințele impuse de resursele limitate din punctul de vedere al spectrului radio [3].

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Determinarea locației unei surse radio și-a demonstrat utilitatea în mai multe aplicații din mediul militar și de securitate pentru apelurile de urgență, urmărirea infractorilor, managementul traficului rutier, sisteme de transport inteligent, etc.[1]. În acest context în activitatea de cercetare doctorală am urmărit conceperea și dezvoltarea unor metode de implementare fizică a unor arhitecturi care au la bază platforme SDR pentru neutralizarea amenințărilor provenite din folosirea de sisteme UAV ale unor entități rău intenționate.

În acest cadru, pentru a crea premisele realizării unui sistem versatil de detecție a dronelor am abordat cercetarea și dezvoltarea sistemelor care utilizează platforme SDR. Trebuie menționat că deși utilizarea platformelor SDR și detecția semnalelor radio în aceste sisteme pare a fi o soluție optimă de implementare, am identificat în literatura de specialitate multe abordări diferite printre care se remarcă cele care folosesc detecția video, termică, audio, radar.

Având în vedere aceste considerente, am decis ca domeniul de cercetare ale acestei lucrări să fie detecția pasivă a semnalelor RF asociate dronelor, iar în secțiunile următoare vor și prezentate contribuții la dezvoltarea unor metode.

În literatura tehnică se constată că estimarea AoA utilizând SDR este realizată folosind algoritmi de localizare (MUSIC, ROOT MUSIC, CAPON (MVDR), ESPRIT). Este utilă evaluarea acestora în termeni de performanță, fiabilitate, redundanță, etc.

În urma analizei semnalului cu sisteme de tip radio-cognitiv se poate realiza replicarea acestora [12]. Prin folosirea acestor replici se poate înlocui comanda sistemului UAV-țintă, acesta poate fi adus la sol fără a fi necesară distrugerea sa și, ulterior, se poate realiza analiza datelor/metadatelor de pe acesta.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Observând că în ultima perioadă, sistemele UAV, datorită caracteristicilor specifice precum dimensiuni reduse, agilitate, modul facil de control, siguranța operatorilor, etc., și-au găsit aplicabilități în din ce în ce mai multe domenii, cum ar fi: militar, comercial, industrial, siguranță publică etc. Acest fapt a condus, inevitabil, la apariția probleme cum ar fi posibilitatea folosirii lor pentru a crea amenințări și a folosi eventuale breșe de securitate la obiectivele civile sau, chiar, militare.

Analizând contextul, în etapa de demarare a activității de cercetare am formulat următoarele obiective principale:

Obiectiv principal : Contribuții la perfecționarea algoritmilor de localizare a obiectelor care sunt surse de semnale radio; studiul lor prin simulare și experimental prin folosirea tehnologiei SDR. Contribuții la utilizarea unor astfel de algoritmi în aplicații legate de identificarea, localizarea și combaterea unor obiecte zburătoare precum sunt dronile

Obiective secundare:

- realizarea un studiu extins cu privire la stadiul actual al cercetării în domeniul metodelor folosibile pentru localizarea unei surse de semnal radio și utilizarea acestora în sisteme destinate luptei împotriva sistemelor UAV - folosite în mod neautorizat;
- realizarea unei analize comparative prin simulare și experimental a algoritmilor de localizare a surselor radio în vederea identificării algoritmului optim pentru implementarea unui sistem fezabil pentru localizarea dronelor;
- folosirea unor medii de programare precum: MATLAB și GNU-radio, Labview pentru analiza de la obiectivul precedent;
- conceperea, realizarea (ca model experimental) și validarea unui sistem pentru detecția, localizarea și combaterea dronelor.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Teza de doctorat va fi structurată în **șase capitole** și vor descrie în detaliu procesele și nivelul în care au fost atinse obiectivele propuse, astfel:

Primul capitol va cuprinde o scurtă introducere. Aici vor fi tratate prezentarea domeniului de cercetare, scopul, motivația, obiectivele și conținutul tezei de doctorat.

În cel de-al doilea capitol va fi realizată o sinteză cu privire la stadiul actual al cercetării din domeniul evoluției dronelor și cel al luptei împotriva folosirii neautorizate a sistemelor UAV.

În capitolul trei vor fi analizate principalele metode folosite pentru localizarea surselor de semnal radio precum parametrii de semnal implicați. În această secțiune vor fi prezentate bazele teoretice necesare pentru înțelegerea noțiunilor și principiilor asociate acestor metode și va fi prezentată o sinteză cu privire la stadiul actual al cercetării în domeniu.

De asemenea, în acest capitol vor fi prezentați și analizați cei mai importanți algoritmi folosiți pentru realizarea localizării și o analiză comparativă a acestora din punct de vedere al performanțelor în funcție de numărul de antene de recepție și de numărul de surse de localizat etc.. Se va urmări identificarea celor mai potriviți algoritmi pentru aplicația avută în vedere.

În capitolul patru vor fi prezentate principalele moduri de realizare a unei soluții integrate pe o platformă SDR. Aici va fi prezentată evoluția și necesitatea dezvoltării echipamentelor de tip SDR și o clasificare a acestora.

De asemenea, aici va fi prezentată o comparație ale unor platforme SDR și se vor analiza rezultatele obținute în urma unor implementări practice pe platformele considerate. Concluziile vor evidenția care ar fi varianta optimă pentru implementarea algoritmului de localizare a unei drone.

Capitolul cinci va consta în descrierea activității de cercetare pe care am desfășurat-o în cadrul unui proiect (DRONEND) care a implicat implementarea unui sistem integrat bazat pe tehnologii SDR pentru identificarea, localizarea și combaterea dronelor cu intenții ostile. Sunt evidențiate contribuțiile la realizarea celor două variante de sistem anti-dronă: un sistem terestru și unul aeropurtat. Vor fi descrise aspecte din evoluția soluțiilor și din validarea lor experimentală.

În capitolul șase vor fi prezentate cele mai semnificative rezultate, contribuțiile personale, lucrările publicate și perspectivele continuării activității de cercetare.

2. Stadiul actual al cercetării

Inovațiile tehnologice, au o creștere exponențială și provoacă schimbări rapide și majore în societatea modernă la toate nivelurile. Aceste schimbări, determinate de posibilitățile oferite de noile tehnologii, afectează cetățenii, guvernele precum și toate sectoarele publice și private ale industriei.

Odată cu aceste inovații s-a constatat o utilizare din ce în ce mai masivă a vehiculelor aeriene fără pilot – UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) de mici dimensiuni și cu cost redus, cunoscute în mod uzual sub denumirea de drone, într-o varietate de aplicații [13]. Folosirea UAV-urilor a introdus noi participanți în spațiul aerian,

evoluând rapid, depășind originea lor militară pentru a deveni instrumente puternice cu roluri nu întotdeauna benefice [14,15].

Aplicațiile UAV-urilor variază de la cele recreaționale la cele comerciale și militare, incluzând divertisment, hobby-uri, jocuri cu drone, înregistrări video de divertisment realizate acasă, filme [16–18], stații de zbor la altitudine joasă [19] și operațiuni cu UAV-uri în scopuri militare [20–25].

În vederea acestei sinteze au fost formulate următoarele întrebări:

- Ce funcții ar trebui să aibă un sistem de detecție, localizare și combatere a dronelor (DDDS) pentru a-și demonstra funcționalitatea?
- Care sunt cele mai populare metode utilizate în implementarea DDDS-urilor?
- Care sunt principalii parametri care ar trebui luați în considerare în această cercetare?
- Ce lacune există în cercetarea actuală a DDDS-urilor?

Pentru a răspunde acestor întrebări a fost utilizată o metodologie larg răspândită de revizie sistematică a literaturii – PRISMA. PRISMA este una din cele mai bune ghiduri de cercetare și de concepere a sistemelor de literatură și meta-analize [26].

Pentru aceasta am efectuat căutări succesive în mai multe baze de date de literatură de specialitate. Printre acestea se enumeră baze de date științifice care cuprind reviste și conferințe de prestigiu precum: IEEE Xplore, ScienceDirect, ACM Digital Library, Springer Link și SAGE Journals Online. În urma căutărilor au fost găsite cele mai relevante articole și jurnale științifice cu tema sistemelor de detecție și apărare împotriva dronelor.

Am utilizat următoarele expresii în căutare pentru a descoperi publicațiile și articolele relevante pentru cercetarea noastră: ('Drone' SAU 'UAV') ȘI (Counter) în domeniile ingineriei electrice, fizicii aplicate, telecomunicațiilor, apărării și sistemelor informatice pentru o perioadă de șase ani (2016–2022). În total, am adunat un set de 7.349 de publicații potențial relevante, excluzând literatura din zona de gri și drafturile.

Am studiat cu atenție publicațiile selectate după finalizarea procedurii de selecție a literaturii, în scopul de a determina aplicațiile pentru problematica descrisă. Rezultatele analizei sunt prezentate în secțiunile următoare, care reprezintă nucleul acestei revizii sistematice a literaturii pe tema sistemelor de apărare împotriva dronelor.

2.1 Necesitatea DDDS. Incidente și legislație

Creșterea rapidă de producție și vânzare din industria UAV a depășit zona operațiunilor sigure, făcându-le un simbol al terorismului, infracțiunilor și distrugerii [27].

Folosirea sistemelor UAV a câștigat din ce în ce mai multă atenție ca fiind o amenințare la adresa siguranței și securității concomitent cu intrarea lor în tehnologia civilă. Pe cale de consecință, a dus la dezvoltarea tehnologiilor anti-dronă (sau contra-

dronă). Sistemele anti-dronă sunt concepute pentru a opri sau împiedica accidentele sau actele teroriste în care sunt folosite. Pentru a fi eficiente, aceste sisteme antidronă vor trebui să evolueze concomitent cu dezvoltarea sistemelor sistemelor UAV viitoare [28].

Deși, inițial UAV-urile au fost utilizate într-o varietate de acțiuni militare, au fost numeroase cazuri în care sisteme UAV non-militare au pus în pericol aeronave civile, persoane și proprietăți aflate la sol.

2.1.1 Incidente raportate recent

Necesitatea sistemelor DDDS este justificată de numărul mare și de potențialul de risc generat de evenimente similare celor din *Tabelul 2.1*.

Tabelul 2.1 Lista evenimentelor recente în care au fost implicate sisteme UAV.

Tipul de incident	Data și locația incidentului	Scurtă descriere a incidentului	Urmări
Coliziuni aeriene	17 Aprilie 2016/UK, London, Aeroportul Internațional Heathrow	O aeronavă A320 a lovit un sistem UAV al Poliției Metropolitane când se apropia de aterizare	Nu au fost raportate daune majore
	21 Septembrie 2017/SUA, Staten Island, New York City	Un sistem UAV civil a fost lovit de un elicopter militar Black Hawk	Elicopterul nu a suferit daune majore și aputut fi aterizat în siguranță
	12 Octombrie 2017/ Canada, Aeroportul Jean Lesage, Quebec	O aeronavă privată Skyjet Aviation Beech King Air A100 a lovit un sistem UAV	Aeronava a aterizat în siguranță cu mici daune la una din aripi.
	13 Decembrie 2018/ Mexic, Aeroportul Internațional Tijuana	Aeronava Boeing 737-800 avand zborul 773 a lovit o dronă	După aterizarea în siguranță a reieșit că partea din față a aeronavei fusese deteriorate. Cauzele incidentului nu au fost identificate dar în urma examinărilor se presupune coliziunea cu o dronă
	10 August 2021/ Marea Britanie, Aeroportul Municipal Buttonville	Aeronava Cessna 172 cu numărul de coadă C-GKWL a lovit o dronă operate de Poliția Regională York	Aeronava Cessna a aterizat în siguranță dar cu daune semnificative
Risc de coliziune aeriană	Ianuarie 2017/P.R. China, Aeroportul Internațional Hangzhou Xiaoshan	Un bărbat în vârstă de 23 ani a fost arestat după postarea făcută din care reieșea că pilota o dronă în proximitatea aeronavelor care veneau la aterizare	Compania producătoare de drone DJI – care a produs și dona folosită în acest incident a emis un comunicat prin care condamna folosirea ilegală a dronelor în acest scop
	25 Martie 2018/Noua Zeelandă, Aeroportul Auckland	Un UAV s-a apropiat la mai puțin de 5m de o aeronavă Boeing 777-200 înainte de aterizarea acesteia	Pilotii aeronavei de transport au observer drona pe panta finală de aterizare când orice manevră de evitare este imposibilă.
	19 Decembrie 2018/UK, Gatwick	O acțiune deliberată și repetată de intruziune a unor drone a fost observată în proximitatea aeroportului a fost observată	Suspendarea tutot decolărilor și aterizărilor pentru aproximativ 24 de ore
Alte incidente	Aprilie 2015/Japonia	O dronă de mici dimensiuni care transporta material	Drona nu numai că nu a putut fi detectată, dar a fost lăsată

care aveau ca țintă obiective strategice și oficiali de rang înalt		radioactiv a „lansat” încărcătura neobservată aproximativ două pe acoperișul casei unde locuia săptămâni. prim-ministrul japonez	
	Octombrie 2016/ Siria	Gruparea ISIS a folosit două drone de dimensiuni reduse achiziționate de pe Amazon pentru a asasina două persoane de origine iraniană în Siria	Acesta este primul incident în care gruparea teroristă și-a executat misiunea folosind echipamente comerciale
	August 2018/ Venezuela	Două drone care aveau acroșate bombe au eșuat în asasinarea președintelui venezuelean Nicolas MADURO în timpul unei manifestații în aer liber	Acest incident este primul în care dronele au fost folosite pentru a realiza un asasinat. Incidentul arată importanța tehnologiilor anti-dronă.

În plus față de incidentele evidențiate, numărul micilor incidente cauzate de drone neautorizate sau ilegale care invadează regiuni restricționate crește de la o zi la alta [42]. Aceasta este încă un motiv pentru care tehnologia anti-dronă devine tot mai importantă. Deoarece reglementările privind utilizarea dronelor reprezintă, de asemenea, un aspect semnificativ de luat în considerare în momentul proiectării unui sistem de detecție, localizare și combatere a dronelor (DDDS), în următoarea subsecțiune vom analiza în detaliu această privință.

2.1.2 Reglementări privind folosirea dronelor

Cele mai importante agenții care reglementează utilizarea dronelor (Ex: Agenția Europeană pentru Siguranța Aviației (EASA - *European Union Aviation Safety Agency*), Comisia Federală de Comunicații (FCC - *Federal Communications Commission*), Autoritatea Australiană de Comunicații și Media (ACMA - *Australian Communications And Media Authority*), Autoritatea de Aviație Civilă (CAA), etc.) au adoptat planuri de acțiune în scopul protejării obiectivelor critice de utilizarea ilegală a dronelor [42–44].

În plus, Uniunea Europeană a aprobat ghidurile europene standard ale EASA pentru a permite integrarea și operarea în siguranță a UAV-urilor în sistemul aviatic. Regulile care se aplică dronelor sunt prezentate în Regulamentul (UE) 2019/94735 privind regulile și procedurile pentru exploatarea vehiculelor aeriene fără pilot (UAV-uri) și Regulamentul (UE) 2019/945 privind vehiculele aeriene fără pilot și operatorii din țări terțe ai sistemelor aeriene fără pilot (UAV-uri).

Conform documentului, există trei tipuri principale de încălcări ale folosirii dronelor care pun în pericol aviația civilă, după cum urmează: motivație non-criminală, neglijență gravă și motivație criminală/teroristă [42].

2.2 Detecția dronelor și sisteme de apărare: Clasificare, Senzori, Contramăsuri

În această secțiune, voi evidenția clasificarea sistemelor de detecție și apărare împotriva dronelor în funcție de diferite criterii prin comparația diferitelor tipuri de

senzori care pot fi utilizați pentru a detecta prezența dronelor în zona monitorizată, prin clasificarea contramăsurilor care pot fi adoptate pentru a neutraliza dronele detectate și prin reglementările referitoare la utilizarea interferenței ca măsură de contracarare.

2.2.1 Clasificarea DDDS

În primul rând, este necesară clasificarea sistemelor de detecție și apărare împotriva dronelor (DDDS) pentru a înțelege capacitățile acestora, așa cum este rezumat în *Tabelul 2.3*.

Tabelul 2.2 Clasificarea DDDS

Categorie	Definiție
Cu baza la sol - fixă	Sisteme concepute pentru folosirea din locații fixe [45]
Cu baza la sol - mobilă	Sisteme concepute pentru a fi instalate pe platforme mobile, putând fi operate din mișcare [45]
Portabilă	Sisteme concepute pentru a fi operate de o singură persoană, de regulă acționate manual. Adesea au formă de armă [46]
Aeropurtată (UAV)	Sisteme concepute pentru a fi acroșate pe alte platforme UAV [46]
UAV- roi (swarm)	Sisteme concepute pentru a utiliza drone multiple [47]

Un DDDS implică diferite tehnologii disponibile pentru detecția, urmărirea și clasificarea țintelor, respectiv de tehnici de neutralizare. Elementele esențiale recomandate pentru un DDDS sunt considerate a fi detecția, urmărirea și clasificarea dronelor țintă [42,46]. Tehnologiile diferite utilizate pentru permiterea detectării dronelor sunt rezumate în *Tabelul 2.4*.

Tabelul 2.3 Tehnologii utilizate pentru detecția DDDS

Tehnologie	Descriere
Acustică	Prezența și urmărirea dronelor este realizată prin utilizarea unei rețele de microfoane
Imagine (EO/IR)	Prezența și urmărirea dronelor este realizată prin utilizarea camerelor EO/IR
Radar	Prezența și urmărirea dronelor este realizată prin identificarea semnăturii radar
Radiofrecvență (RF)	Prezența și urmărirea dronelor este realizată prin monitorizarea frecvențelor radio utilizate pentru comunicații; această tehnologie poate localiza drona și pilotul.
Hibrid	Combinație a două sau mai multe dintre tehnologiile menționate anterior.

2.2.2 Clasificarea senzorilor de detecție

Toate tipurile de senzori utilizate în prezent în sistemele DDDS prezintă avantaje și limitări specifice. Pe cale de consecință, un astfel de sistem trebuie să încorporeze mai mulți senzori de diferite tipuri pentru a obține o rată mai mare de detecție [45].

O scurtă descriere a fiecărei categorii de senzori este prezentată mai jos, iar diferitele avantaje și dezavantaje pentru fiecare categorie sunt rezumate în *Tabelul 2.5*.

Tabelul 2.4 Avantaje și dezavantaje ale senzorilor folosiți în DDDS

Tip	Avantaje	Dezavantaje
Acustic	<ul style="list-style-type: none"> • Acoperă spectrul între 20 Hz–20 kHz; • Biblioteca de semnături acustice poate fi actualizată cu ușurință la fiecare zbor; • Nu au o greutate foarte mare și pot fi conjugați cu ușurință cu alt tip de senzori. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rază limitată; • Vulnerabil la zgomot ambiental; • Ușor de înșelat.
Imagine	<ul style="list-style-type: none"> • Acoperă spectrul vizibil și IR (3 MHz–300 GHz); • Camerele IR pot opera în condiții de ceață sau nori pe timp de zi și de noapte; • Pot fi asistați de tehnologii bazate computaționale și AI. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generează doar imagini 2 D; • Limitări legate de condiții meteorologice și temperatura ambientală; • Dependent de date georeferențiale • LoS este obligatoriu.
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Lărgimea de bandă folosită: 3 MHz–300 GHz; • Pot opera în orice condiții meteorologice pe timp de zi și pe timp de noapte; • Oferă informații cu privire la viteza țintei; • Poate recunoaște semnături micro-Doppler (MDS) • Oferă acoperire mare; • Acuratețe crescută; • Poate fi conceput compact și mobil – necesar pentru aplicațiile tactice; • Fiabilitate crescută. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesită o amprentă radar de ordinal $\lambda/2$; • Dificil de discriminat păsările de UAV; • Performanță limitată pentru altitudini joase și viteze reduse. • Ineficient în zona conului mort • Poate interfera cu ușurință cu obiecte mici și păsări; • LoS este necesar; • Cost ridicat.
RF	<ul style="list-style-type: none"> • Poate face capturi ale semnalelor de comunicație dintre dronă și operatorul UAV; • De complexitate redusă – ușor de implementat; • Poate opera în toate condițiile meteorologice pe timp de zi și de noapte; • Ușor de îmbunătățit datorită modularității antenelor de recepție și a unităților de procesare a semnalului folosite pentru implementare; • Posibilitatea de a localiza pilotul dronei. 	<ul style="list-style-type: none"> • Este nevoie de cunoașterea în prealabilă a amprentei radio aferentă comunicațiilor dintre dronă și operator (benzi de frecvență, modulații, etc.); • AoA este determinat cu o precizie scăzută; • Problematic în utilizarea în zone urbane din cauza fenomenelor de fading și multiale; • Vulnerabil la folosirea malițioasă sau ilegală prin folosirea unor benzi de frecvență care exced capabilitățile sistemului.

2.2.3 Clasificarea contramăsurilor

Necesitatea unui DDDS a apărut pentru prima dată în aplicațiile militare, sub reglementări speciale care depășesc capacitățile și responsabilitățile altor guverne sau structuri. Ca urmare, tehnicile de neutralizare sunt mai numeroase decât cele de detecție [42].

Principalele avantaje și dezavantaje ale fiecărei tehnici de contra-măsură sunt prezentate în Tabelul 2.6.

Tabelul 2.5 Caracteristici și limitări ale contramăsurilor

Tip	Avantaje	Dezavantaje
Impuls electromagnetic	<ul style="list-style-type: none"> Poate arde sau interfera cu sistemele interne ale dronei țintă oprindu-i funcționarea Are efect în toate benzile de frecvență (îngustă/largă). 	<ul style="list-style-type: none"> Precizia direcției de bruij este greu de obținut; Rezultatul contramăsurii este greu de estimat.
Drone interceptoare	<ul style="list-style-type: none"> Dispune de capacități de căutare și urmărire; Pot fi folosite ca platforme aeriene pentru arme și muniții. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesită o apropiere foarte mare de țintă; Are o latență considerabilă.
LASER	<ul style="list-style-type: none"> Poate opera cu puteri mici (dazzlers) pentru a opri sistemele de camera ale dronei țintă sau cu puteri mari cu care pot distruge ținta; Ținta poate fi urmărită cu ușurință. Mai sigur și mai ieftin decât orice alta contramăsură fizică 	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilă la condițiile meteorologice; Este necesară o cunoaștere foarte bună a poziției dronei țintă; Laserele de mare putere pot interfera cu alte sisteme.
Magnetic	<ul style="list-style-type: none"> Dezvoltarea și implementarea lor nu necesită sume mari de bani; Poate bloca eficient mai multe ținte concomitent 	<ul style="list-style-type: none"> Protejează obiective de dimensiuni reduse; Poate interfera cu alte sisteme.
Păsări de pradă	<ul style="list-style-type: none"> Nu necesită tehnologii complexe; Nu este nevoie de mulți operatori umani. 	<ul style="list-style-type: none"> Această contramăsură este fezabilă numai pentru drone de mici dimensiuni care nu se deplasează cu viteze foarte mari; Poate duce la rănirea păsărilor.
Proiectile/ Please lansate/ Tunuri cu apă	<ul style="list-style-type: none"> Eficiente împotriva oricărui tip de UAV; Funcționează în toate condițiile meteorologice; Este o metodă de reacție rapidă. 	<ul style="list-style-type: none"> Poate provoca daune colaterale; Costuri ridicate de implementare; Necesită operatori profesioniști.
Bruiaj RF/GNSS	<ul style="list-style-type: none"> Poate neutraliza un grup de ținte simultan, degradând raportul signal-to-noise ratio - SNR; Frecvențele și benzile folosite de GNSS sunt foarte cunoscute și relativ ușor de bruiat; Diagrama de directivitate a semnalului de bruij este foarte precisă. 	<ul style="list-style-type: none"> Ineficient împotriva dronelor autonome; Ineficient împotriva dronelor care folosesc sisteme de navigație inerțială – INS (<i>Inertial Navigation Systems</i>); Ineficient împotriva dronelor care folosesc comunicații criptate; Eficient doar pentru distanțe scurte; Bruiajul poate interfera cu alte echipamente proprii.
Spoofing	<ul style="list-style-type: none"> Algoritmi de procesare a semnalului și AI pot reproduce semnalele de control ale dronei țintă cu acuratețe mărită într-un timp relativ scurt; Poate exploata vulnerabilitățile unei plaje largi de sisteme UAV. 	<ul style="list-style-type: none"> Este necesară o analiză consistentă a sistemului UAV țintă cu privire la frecvențele și a modul de lucru al acestuia. Algoritmi de detecție spectrală sunt necesari.

Neutralizarea unei drone folosind una dintre metodele enumerate mai sus reprezintă doar jumătate din răspuns. Este important să se descopere și să se rețină operatorul dronei care zboară ilegal pentru a rezolva complet problema. Fără aceasta, un operator motivat cu siguranță va reveni cu o dronă mai nouă și mai bună, capabilă să cauzeze chiar și mai multă tulburare și daune [47].

2.2.4 Reglementări privind folosirea bruiajului în DDDS

Pentru majoritatea categoriilor de contra-măsuri menționate mai sus, nu există în prezent reguli în vigoare. Cu toate acestea, pentru cazul interferenței RF, există mai multe reglementări în vigoare, care vor fi detaliate în paragrafele următoare.

Neutralizarea dronelor folosind sisteme de bruiaj nu este încă (în majoritatea țărilor) permisă din punct de vedere legal și este în prezent subiectul unor numeroase discuții de reglementare.

Autoritățile UE au fost printre primele organizații care au adoptat o poziție referitoare la utilizarea dispozitivelor de interferență. Directiva 2014/53/UE interzice utilizarea unor astfel de dispozitive care ar putea provoca interferențe dăunătoare radiocomunicațiilor autorizate respectiv împiedicării funcționării normale a comunicațiilor care utilizează frecvențe radio [158]. Această directivă a fost transpusă în legislația tuturor statelor membre.

„Directiva 2014/53/UE a fost transpusă în legislația română prin Hotărârea de Guvern nr. 740/2016. Potrivit acestei hotărâri, fabricarea, importul, deținerea, publicitatea, punerea pe piață, punerea la dispoziție pe piață, punerea în funcțiune și/sau utilizarea echipamentelor radio sau a dispozitivelor concepute pentru a cauza interferențe dăunătoare (jammere) sunt interzise și sancționate cu contravenții” [159].

În ciuda lipsei de reglementări privind utilizarea semnalelor de interferență RF împotriva dronelor și a unor riscuri care ar trebui luate în considerare, această metodă este una dintre cele mai eficiente.

2.3 Detecția și DDDS bazate pe metode RF

După cum s-a menționat în *Secțiunea 2.1*, una dintre cele mai utilizate metode pentru detecția dronelor este reprezentată de identificarea semnalelor RF care sunt schimbate între drone și o altă entitate (stație terestră/operator). Neutralizarea dronelor detectate poate fi obținută și prin metode RF, prin transmiterea de semnale de interferență suficient de puternice care pot întrerupe comunicația între dronă și operatorul său (așa cum s-a menționat în *Secțiunea 2.2*).

De regulă, dronele militare folosesc frecvențe specifice, însă majoritatea dronelor comerciale operează în benzile de frecvență industriale, științifice și medicale (ISM) de 433 MHz și 2.4/5.8 GHz. Prin urmare, majoritatea sistemelor moderne de detecție RF oferă detecția și identificarea amprentei unice RF generate de comunicațiile dintre pilot/stația de bază și UAV sau a protocolului de date folosit.

Există două funcții principale necesare pentru detecția dronelor:

- identificarea prezenței dronelor prin scanarea spectrului de frecvență și localizarea dronelor;
- funcția de neutralizare - necesară pentru a permite apărarea împotriva dronelor detectate, poate fi realizată prin intermediul interferenței RF având scopul întreruperii comunicării între drone și operatorii lor.

Tablelul 2.7 rezumă principalele elemente referitoare la implementarea acestor sisteme. În paragrafele următoare, fiecare dintre categoriile menționate va fi detaliată.

Tablelul 2.6 DDDS bazate pe metoda de radiofrecvență

Referințe	Funcții implementate	Metode	Platforme SDR folosite (producător / țara de proveniență)
[164]	Identificare Localizare	Amprentă RF (SFS, WEE, PSE) AoA (MUSIC, RAP MUSIC)	USRP-X310 (Ettus Research, / USA)
[165]	Identificare	Amprentă RF (DRNN)	USRP-X310 (Ettus Research / USA)
[166]	Identificare	Amprentă RF (CNN)	USRP-X310 (Ettus Research / USA)
[167]	Identificare	Amprentă RF (KNN)	USRP-B210 (Ettus Research / USA)
[168]	Identificare	Amprentă RF (KNN, XGBoost)	-
[169]	Identificare	Amprentă RF (Wi-Fi)	-
[170]	Identificare	Amprentă RF	LimeSDR (Lime Microsystems / Marea Britanie)
[171]	Identificare	Amprentă RF	-
[172]	Localizare	Puterea semnalului la recepție Received-Signal Strength (RSS)	USRP N210 (Ettus Research / USA)
[173]	Localizare	RSS	AD-FMCOMMS5-EBZ Evaluation Board (Analog Devices / USA)
[174–176]	Neutralizare	RF jamming	BladeRF (Nuand / USA)
[177]	Neutralizare	RF jamming	Great Scott Gadgets HackRF One

Aproape toate implementările folosite pentru validarea soluțiilor propuse în literatură se bazează pe platforme SDR (Software-Defined Radio) datorită unor avantaje semnificative oferite de această categorie de platforme, cum ar fi:

- Cost redus sau moderat;
- Gama extinsă de frecvențe, care poate acoperi de obicei toate benzile de frecvențe utilizate de dronele comerciale;
- Scalabilitate, permițând extinderea platformei, în funcție de funcțiile prevăzute;
- Flexibilitate, permițând procesarea semnalelor RF corespunzătoare diferitelor standarde de comunicații.

2.4 Provocări și perspective ale DDDS

Una dintre provocările cu care ne confruntăm în implementarea unui DDDS este capacitatea de a identifica și, ulterior, de a neutraliza nu doar o dronă țintă, ci mai multe. În ultimii ani, multe aplicații au folosit mai multe drone [178], motiv pentru care această caracteristică devine importantă pentru un DDDS. În funcție de senzorii utilizați în sistem, posibilitatea de a detecta mai multe drone țintă poate exista sau nu. Există câteva exemple de sisteme care includ această caracteristică în literatura de specialitate.

O altă provocare cu care se confruntă un DDDS, în special în cazul în care zona în care este instalat sistemul este una rezidențială și există mai multe gospodării în apropiere constă în evitarea interferențelor sau a deteriorării echipamentelor din vecinătate (în cazul interferenței RF și EMP) și în respectarea intimității vecinilor apropiați (în cazul senzorilor de imagine). În cazul interferenței RF, aceasta ar putea fi

rezolvată dacă antenele utilizate pot crea diagrame de directive foarte înguste și pot fi îndreptate direct către ținte.

Atunci când ne referim la un DDDS bazat pe metode RF, una dintre principalele provocări cu care trebuie să ne confruntăm este legată de aspectele juridice privind utilizarea interferenței ca măsură de contracarare, așa cum am menționat și în *Secțiunea 2.3*.

O alta limitare importantă a DDDS-urilor bazate pe metode RF este legată de imposibilitatea detectării și neutralizării dronelor autonome în cazurile în care acestea au o rută de zbor predefinită și nu au nicio cale de comunicații activă de date cu un operator aflat la sol.

2.5 Concluzii privind stadiul actual al cercetării

În acest capitol, am efectuat o analiză a stadiului actual al sistemelor de detecție și apărare împotriva dronelor. În cadrul analizei am inclus diferite aspecte, cum ar fi aspectele reglementare și incidentele raportate care implică dronile. Am efectuat o clasificare a sistemelor de detecție a dronelor bazată pe tipul de senzori utilizați. Am realizat o descriere detaliată a sistemelor de detecție și apărare a dronelor bazate pe RF, punând accent pe utilizarea platformelor SDR pentru implementarea acestor sisteme.

3. Aspecte teoretice privind DoA

3.1 Metode de determinare a locației unei surse radio

În vederea realizării aplicațiilor de determinare a direcției de sosire a unor semnale radio este necesară o estimare cât mai precisă a poziției, chiar și în transmisiuni care nu se află în vizibilitate directă radio NLoS (*Non-Line-of-Sight*) sau multicale [184].

Estimarea poziției poate fi definită drept procesul prin care se estimează poziția unui nod țintă care transmite sau primește semnale radio de la alte noduri de referință. Acest proces poate fi realizat atât de către nodul țintă (autocalizare), cât și de către un punct central care colectează informații de la mai multe stații de referință.[185]

De asemenea, în funcție de modul de determinare a locației folosind semnalele transmise între cele două noduri există două variante de implementare

- Estimare a poziției directă;
- Estimare a poziției în doi pași.

Localizarea directă se referă la procesul de determinare a poziției unui nod prin utilizarea informațiilor obținute doar din semnalele transmise între acest nod și

alte noduri de referință. Acest tip de localizare se bazează doar pe informațiile disponibile în sistem, fără a mai fi nevoie de alte informații externe.

Pe de altă parte, metoda localizării în două etape presupune estimarea poziției prin intermediul unui punct central care primește informații de la mai multe stații de referință, chiar dacă această abordare poate fi suboptimală și poate avea o performanță mai scăzută decât cea a localizării directe. Cu toate acestea, în cazul frecvențelor din benzile superioare sau cu rapoarte destul de mari ale raportului semnal-zgomot (SNR - *Signal to Noise Ratio*), această tehnică poate duce la o estimare a poziției suficient de precisă. Prin urmare, această metodă este utilizată frecvent în majoritatea sistemelor de determinare a locației radio [186].

În primul pas al acestui algoritm sunt estimați parametri de semnal, precum timpul de sosire (ToA - *Time of Arrival*) și puterea semnalului recepționat (RSS - *Received Signal Strength*), urmând ca apoi să fie folosite metode de punere în corespondență (mapare) sau statistice în funcție de cerințele de acuratețe și de constrângerile sistemului.

3.1.1 Parametrii utilizați pentru determinarea locației

Parametrii utilizați pentru determinarea locației reprezintă primul pas al algoritmului de determinare a locației și constă în estimarea parametrilor semnalului care este transmis între nodul țintă și unul sau mai multe noduri de referință.

În funcție de cerințele de acuratețe și de constrângerile sistemului, se evidențiază câțiva parametri de semnal de referință pentru estimarea locației radio. În general, aceștia sunt strâns legați de puterea, direcția și /sau timpul la recepție.

- Puterea semnalului recepționat (RSS)
- Azimutul (unghiul de recepție)
- Momentul de timp al recepției (TOA)
- Diferența de timp la sosire (TDOA)
- Alți parametri

În unele sisteme de determinare a poziției unei surse radio, pot fi utilizați doi sau mai mulți parametri menționați anterior pentru a obține o localizare mai precisă a nodului țintă. Dintre aceste scheme hibride, se pot da ca exemplu TOA/AOA, TOA/RSS și TDOA/AOA.

3.1.2 Estimarea poziției

Așa cum este precizat anterior cel de-al doilea pas al algoritmului de estimare se efectuează folosind parametrii estimați anterior, prin procedeele mai sus menționate. În funcție de prezența/lipsa unei baze de date se remarcă două tehnici de estimare:

- Tehnica mapării (punerii în corespondență)..
- Tehnici geometrice și statistice.

3.2 Analiza și descrierea algoritmilor de estimare a direcției radio

Comunicațiile wireless se remarcă drept unul dintre domeniile care ies în evidență în perspectiva progresului tehnologic din lumea ingineriei moderne. Pe măsură ce tehnologia în domeniul comunicațiilor wireless a progresat, s-a impus necesitatea dezvoltării de echipamente care să susțină această evoluție și să rezolve problemele generate de resursele limitate ale spectrului electromagnetic.

Coordonarea la nivel global este esențială pentru alocarea eficientă a resurselor de spectru electromagnetic. Această coordonare este realizată prin intermediul organizațiilor internaționale precum Uniunea Internațională de Telecomunicații (ITU – *International Telecommunication Unit*), care au stabilit standarde și regulamente pentru utilizarea spectrului electromagnetic.

Algoritmii DOA de tip quadratic, precum CAPON (*Minimum Variance Distortionless Response - MVDR*), se bazează pe descompunerea matricei de covarianță a semnalelor. Acești algoritmi sunt influențați de mărimea fizică a antenei, ceea ce poate duce la rezultate mai puțin precise și cu o rezoluție mai mică.

Algoritmii DOA bazați pe separarea în subspații au la bază descompunerea matricei de covarianță a semnalului în vectori proprii. Algoritmii reprezentativi pentru acest tip sunt MUSIC, ROOT MUSIC și ESPRIT. Aceștia oferă o precizie mai ridicată decât algoritmii de tip quadratic și nu sunt limitați de dimensiunile fizice ale antenelor.

În acest capitol, vom prezenta principiile de funcționare și vom evidenția performanțele celor mai des utilizați algoritmi de estimare a parametrilor caracteristici ai semnalului radio recepționat, cum ar fi MUSIC, ROOT MUSIC, ESPRIT și CAPON. Pentru a realiza acest lucru, vom utiliza mediul de simulare MATLAB, care ne va permite să implementăm și să evaluăm aceste algoritmi într-un mediu controlat.

3.2.1 Algoritmul de estimare DoA: MUSIC

Algoritmul MUSIC (*Multiple Signal Classification*) este unul dintre cei mai preciși algoritmi DOA bazat pe separarea în subspații. Acesta este utilizat pentru a estima numărul și direcția semnalelor care ajung la receptor. Algoritmul MUSIC se bazează pe descompunerea matricei de autocorelație în doi vectori proprii: unul pentru subspațiul de zgomot și unul pentru subspațiul de semnal. Vectorul fronturilor de undă incidente recepționate este inclus în subspațiul semnalului, ceea ce face ca subspațiul de zgomot să fie ortogonal pe acesta. Astfel, algoritmul MUSIC poate identifica direcția de sosire a semnalului cu o precizie ridicată. [200], [201].

3.2.2 Algoritmul de estimare DoA: Root MUSIC

Algoritmul ROOT-MUSIC (*Root Multiple Signal Classification*). Este o variantă a algoritmului MUSIC care oferă mai multe informații despre direcția de sosire a semnalului. Spre deosebire de algoritmul MUSIC, care implică reprezentarea grafică a pseudospectrului în funcție de unghiul de incidență al frontului de undă la recepție și identificarea vârfurilor, algoritmul ROOT-MUSIC folosește o metodă bazată pe căutarea de rădăcini polinomiale. Aceasta permite identificarea precisă a direcției semnalului prin determinarea rădăcinilor polinomului caracteristic asociat matricii de autocorelație a semnalului [200][201].

3.2.3 Algoritmul de estimare DoA: ESPRIT

Algoritmul de estimare ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique*) implică descompunerea unui șir de N elemente în două subșiruri identice, fiecare având câte S elemente, unde S reprezintă numărul de elemente ale matricii de antene. Scopul acestui algoritm este de a estima unghiul de incidență la recepție prin determinarea operatorului de rotație Φ care relatează cele două subșiruri.

Prin combinarea datelor provenite din perechile de antene, algoritmul estimează direcția de sosire a semnalului și utilizează aceste estimări pentru a determina poziția sursei de emisie. Acesta este eficient în situații în care aranjamentul matricii de antene este neuniformă și permite estimări precise ale direcției de sosire a semnalului în aceste cazuri.

3.2.4 Algoritmul de estimare DoA: MVDR / Capon

Algoritmul MVDR (*Minimum Variance Distortionless Response*) / Capon, implică estimarea subspațiului de zgomot din matricea de corelație bazată pe proiectarea unui șir de M vectori de direcție. Acești vectori de direcție reprezintă răspunsul ideal al receptorului la un șir de surse ideale.

Prin utilizarea acestor vectori de direcție, algoritmul Capon permite derivarea semnalului provenit de la surse prin proiecția ortogonală a vectorilor de direcție pe subspațiul zgomotului. Astfel, algoritmul Capon estimează direcția de sosire a semnalului și îl separă de zgomotul prezent în sistemul de recepție. Aceasta duce la o estimare mai precisă a semnalului dorit și la o îmbunătățire a performanțelor sistemului de comunicații [203] [205].

Unghiul de incidență al semnalului la recepție este estimat prin detecția vârfurilor din spectrul generat de acest algoritm.

3.3 Analiza performanței algoritmilor DoA

Analiza detaliată a algoritmilor de estimare DoA a unghiului de incidență radio își găsește utilitatea în activitățile de cercetare și dezvoltare a DDDS.

Eficiența sistemelor de contramăsuri depinde în mare măsură de performanța algoritmului de estimare implementat. Acest subcapitol abordează performanța a patru astfel de algoritmi (MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT și CAPON). Acești algoritmi vor fi analizați pe baza variațiilor erorii de spectru.

Identificarea celui mai potrivit algoritm de DoA pentru utilizare în sistemele de contracarare a UAV-urilor reprezintă un aspect critic al proiectării sistemului. Alegerea algoritmului DoA poate influența semnificativ capacitățile sistemului de detecție, localizare, urmărire și neutralizare. Este important de menționat că nu există un singur algoritm care să fie potrivit în mod universal pentru toate situațiile. În schimb, alegerea depinde de o varietate de factori, cum ar fi mediul (urban, rural, etc.), caracteristicile semnalului, constrângerile hardware și cerințele de performanță (precizie, rezoluție, complexitate de calcul, etc.) [206][207].

3.3.1 Determinarea DoA în mediul de simulare MATLAB

În acest scenariu implementat în mediul de simulare MATLAB, pentru a analiza performanța algoritmilor de estimare DoA MUSIC, Root-MUSIC, ESPRIT și MVDR/Capon's am simulat două cazuri distincte pentru o matrice de antene de 2,4,6 și 8 elemente astfel:

- un emițător plasat la azimutul de -20° față de orientarea matricii de antene;
- două emițătoare plasate azimutele de -30 și 70° față de orientarea antenei.

Simularea ne va permite să înțelegem cum numărul de elemente ai unei matrici de antene de recepție și numărul de surse influențează eroarea de determinare pentru fiecare algoritm.

Obiectivul nostru este să înțelegem cum funcționează fiecare dintre acești algoritmi în ceea ce privește eroarea spectrală.

Eroarea spectrală reprezintă devierea spectrului estimat față de spectrul real și este o măsură esențială, deoarece influențează direct precizia estimării DoA. O eroare spectrală mai mică duce în mod obișnuit la o estimare mai precisă a DoA, un lucru esențial în aplicații precum sistemele destinate combaterii dronelor.

3.3.2 Evaluarea performanțelor după simularea în MATLAB

MUSIC oferă estimări de înaltă rezoluție a DoA și este eficient atunci când numărul de surse este mai mic decât numărul de antene. Pentru matrici cu doar două

antene, MUSIC poate să nu fie cea mai bună opțiune dacă există mai mult de o sursă. Acest algoritm poate fi o alegere bună dacă se necesită estimări de înaltă rezoluție și resursele de calcul sunt suficiente.

Root-MUSIC de asemenea, necesită ca numărul de surse să fie mai mic decât numărul de antene, deci poate să nu fie potrivit pentru matrici cu doar două antene dacă există mai mult de două surse. Pentru matrici cu un număr mai mare de elemente (cu 4, 6 sau 8 antene), Root-MUSIC poate fi o alegere bună dacă se necesită estimări de înaltă rezoluție în care resursele de calcul nu reprezintă o constrângere majoră.

ESPRIT oferă, de asemenea, estimări de înaltă rezoluție. Cu toate acestea, necesită o geometrie specifică a matricii de antene (cum ar fi o matrice liniară uniformă cu o distanță de jumătate de undă între elementele anenei) și poate să nu fie potrivit pentru matrici cu mai puține antene (cum ar fi cele cu 2 antene). Cu 4, 6 sau 8 antene, ESPRIT poate fi o alegere bună, cu condiția ca cerința de geometrie a matricii de antene să fie îndeplinită.

MVDR/CAPON formează un fascicul îngust în direcția semnalului dorit. În timp ce pot fi eficiente cu un număr mic de antene, acestea necesită o estimare precisă a matricii de covarianță, ceea ce poate fi dificil în medii cu schimbări rapide sau non-staționare. Aceste metode pot oferi un echilibru bun între performanță și complexitatea computațională pentru matrici de antene cu dimensiuni de la 2 la 8.

3.3.3 Analiza rezultatelor

În concluzie, deoarece zborul unui UAV este foarte rapid și imprevizibil, algoritmul care trebuie utilizat trebuie să fie foarte rapid în calcul și precis.

În rezumat, pentru aplicații cu un număr de antene de dimensiuni mici până la moderate (2 până la 8 antene) în care este necesară o rezoluție înaltă și resursele de calcul nu reprezintă o constrângere, metodele precum MUSIC, Root-MUSIC sau ESPRIT pot fi mai potrivite.

3.4 Concluzii

În acest capitol au fost prezentați cei mai importanți algoritmi folosiți pentru determinarea locației radio. De asemenea, în cadrul acestei secțiuni s-au ilustrat performanțele acestor algoritmi, folosind aplicația software MATLAB, în funcție de variația erorii spectrale și a numărului de elemente ale matricii de antene folosiți pentru recepția semnalelor.

Astfel putem spune că cei patru algoritmi prezentați (MUSIC, ROOT MUSIC, ESPRIT și CAPON) sunt algoritmi de precizie ridicată. Această precizie fiind argumentată de eroare spectrală mică la recepție. De asemenea, în urma analizei celor patru algoritmi de estimare a direcției radio s-a constatat că aceștia prezintă o sensibilitate ridicată la eroare. Totodată, se constată că performanțele acestor

algoritmi cresc odată cu numărul de elemente ale matricii de antene folosiți pentru recepție și de numărul de surse.

Astfel, pentru implementarea unui DDDS al cărui scop este neutralizarea unei ținte a cărei versatilitate este mare conchid că cel mai bun algoritm pentru o astfel de implementare este MUSIC deoarece oferă performanțe relativ bune care necesită complexitate de calcul (viteză mare de determinare a unghiului de incidență radio).

Totodată, evaluarea performanțelor aloritmilor de estimare radio în [200,201, 203] prezintă algoritmul MUSIC ca potrinindu-se pentru aplicații în care este nevoie de localizarea unei singure surse.

De asemenea, acesta funcționează la un nivel mare al SNR ceea ce face ca decizia prezenței dronei să fie una mult mai sigură, având în vedere că în benzile de semnal ISM funcționează foarte multe alte echipamente.

4 Introducere, descriere și analiză a performanțelor SDR

4.1 Introducere în tehnologia SDR. Moduri de realizare a unui echipament SDR.

Într-un sistem radio definit prin software (Software Defined Radio - SDR), funcțiile tradiționale hardware ale unui sistem de comunicații, cum ar fi mixerele, filtrele, amplificatoarele sau modulatorile/demodulatorile, sunt implementate în domeniul software, folosind un calculator personal (PC) sau sisteme DSP (*Digital Signal Processing*) sau FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) încorporate.

Prin utilizarea tehnologiei SDR, se permite flexibilitatea și posibilitatea de reconfigurare a sistemului de comunicații prin software. Acest lucru înseamnă că funcțiile și parametrii sistemului de comunicații pot fi modificați sau actualizați prin intermediul software-ului, fără a fi necesare modificări hardware. Această abordare oferă avantaje precum adaptabilitatea la diferite standarde și protocoale de comunicații, reducerea costurilor de dezvoltare și întreținere, și creșterea eficienței și performanței sistemului.

Aceste beneficii reflectă avantajele oferite de conceptul SDR atât pentru producătorii de echipamente radio, cât și pentru utilizatorii finali, precum reducerea costurilor, flexibilitatea în utilizare și posibilitatea de personalizare și adaptabilitate.

4.2 Evoluția SDR

Într-un receptor clasic, semnalele radio recepționate sunt convertite în banda de bază prin procese de conversie. Acest proces implică utilizarea unor componente

analogice precum amplificatoare, mixere și oscilatoare. Scopul conversiei este de a aduce semnalul la o frecvență mai joasă, astfel încât să poată fi ulterior demodulat.

Funcționalitățile și performanțele acestor receptoare depind doar de componentele hardware ale acestora. În nomenclatura industriei SDR acest tip de receptor este denumit ca și nivelul zero (*Tier Zero*), adică un nivel la care nu sunt folosite componente software.

4.2.1 Prima generație de echipamente radio software

Sistemele de calcul și-au regăsit utilitatea din ce în ce mai mult în toate domeniile și, astfel, producătorii de platforme au găsit prin acestea un nou mod de implementare aducând mai multe beneficii platformelor radio clasice.

Pentru acest model, funcțiile de bază: filtrarea și demodularea, au rămas dependente de hardware, însă componenta software este reprezentată de interfețe grafice ușor de utilizat de către operator și procesarea semnalelor era realizată de către placa de sunet a calculatorului.

4.2.2 A doua generație de SDR

A doua generație de receptoare SDR, aduce integrarea platformelor radio și a sistemelor de calcul la un nivel superior, prin includerea unui convertor analog-digital (ADC) în structura de bază a receptorului. Acest lucru a avut drept urmare îmbunătățirea performanțelor de procesare a semnalelor (în comparație cu cea a procesoarelor unui PC). Totodată, creșterea puterii de procesare a sistemelor de calcul a făcut ca această fuziune dintre radio și PC să rivalizeze cu procesoarele de semnal digital dedicat (DSP – *Digital Signal Processing*).

Acest tip de receptor aparține unei clase superioare în nomenclatorul platformelor SDR, denumit și SDR de Nivel Doi (*SDR - tier two*) sau Echipament Radio Reconfigurabil prin Soft (*Software Reconfigurable Radio*). La această clasă de receptoare, componenta software este utilizată pentru a controla și redefini o varietate de tehnici de modulație, banda semnalului de interes, amplificarea, raportul semnal/zgomot, etc. [212].

4.3 Tehnologii derivate pe baza SDR

Platformele radio definit prin software (SDR) reprezintă cheia pentru o varietate de echipamente radio reconfigurabile, fiind deschizător de drumuri pentru acest tip de tehnologii.

Astfel, platformele SDR au fost implementate în mai multe tipuri de echipamente garantând o flexibilitate ridicată pentru a ajunge la potențialul maxim al echipamentului, cu beneficiile unui cost redus și o creștere a eficienței sistemelor realizate [210].

- Echipamente Radio adaptive (Adaptive Radio)

- Echipamente Radio cognitiv (Cognitive Radio)
- Echipamente Radio inteligente (Intelligent radio)

4.4 Funcțiile pe care trebuie să le îndeplinească SDR

Un SDR trebuie să îndeplinească una sau mai multe din următoarele caracteristici: [211]

- Benzi multiple(multiband);
- Purtătoare multiple (multicarrier);
- Funcționare multimod;
- Multirată;
- Lățime de bandă variabilă.

În plus, filtrele digitale au capacitatea de a realiza și alte caracteristici care nu sunt posibile în cazul filtrelor realizate în domeniul analogic. De asemenea, filtrele digitale pot fi adaptate pentru a reduce interferențele și pentru a compensa distorsiunea pe canalul de transmisie, ambele caracteristici fiind greu de realizat pentru filtrele analogice.

4.5 Analiza comparativă a unor platforme SDR

În această subsecțiune, vor fi făcute comparații între diverse platforme SDR, concentrându-ne asupra performanței de recepție a front-end-ului RF. Au fost efectuate diverse măsurători în diferite benzi de frecvență utilizând platformele SDR, cu un analizor de spectru folosit ca punct de referință. Rezultatele sunt analizate și discutate luând în considerare utilizarea unei astfel de platforme pentru implementarea aplicațiilor de detecție a spectrului - un aspect esențial în proiectarea echipamentelor.

Există mai multe platforme SDR disponibile pe piață, dintre care cea mai cunoscută este gama Universal Software Radio Peripheral (USRP), dezvoltată de Ettus Research. Pentru aplicațiile cu bandă îngustă și costuri reduse, sunt disponibile dispozitive accesibile, precum cele din gama RTL-SDR, cu prețuri ce nu depășesc 25 de dolari.

4.5.1 Detalierea platformelor SDR pentru care se aplică studiul

În scenariul experimental propus se compară performanța front-end-ului RF al patru platforme SDR diferite [221]. Trei dintre aceste platforme fac parte din familia USRP (USRP N210 [222] cu placa de bază RF WBX [223], USRP X310 [224] cu placa de bază RF CBX [13] și USRP B200 mini [226]), în timp ce a patra platformă este HackRF One [227], produsă de Great Scott Gadgets. Se oferă o descriere amănunțită a fiecărei interfețe RF, alături de un calcul teoretic al figurii de zgomot globale (NF – *Noise Figure*) pentru fiecare caz, luând în considerare parametrii de

performanță ai componentelor folosite. Se desfășoară o evaluare experimentală a performanțelor, bazându-se pe rezultatele măsurărilor efectuate în patru benzi de frecvență diferite, utilizând un analizor de spectru ca instrument de referință [213].

Pentru fiecare platformă SDR, vom prezenta o diagramă a bloc a front-endului RF, alături de un tabel care cuprinde performanțele fiecărui bloc utilizat. Pentru a calcula factorul global de zgomot pentru o platformă SDR cu n etape, am utilizat formula factorului de zgomot Friis [221].

Pentru a exprima diferențele de performanță ale fiecărei platforme SDR avute în vedere pentru acest studiu mai jos se găsesc o diagramă bloc pentru secțiunea de front-end RF, un tabel cu valorile NF respectiv câștigul fiecărui bloc în parte. În acest scenariu am considerat valorile de câștig la recepție la un nivel maxim.

USRP N210 echipat cu plăci de expansiune WBX RF

Platforma SDR USRP N210 [222] face parte din suita de produse USRP dezvoltată de Ettus Research (USA).

USRP X310 echipat cu plăci de expansiune CBX RF

Platforma SDR USRP X310 [222] oferă performanță scalabilă și este destinată proiectării și implementării sistemelor de comunicații wireless de următoare generație.

Arhitectura hardware este compatibilă cu două sloturi pentru plăci de expansiune cu lățime de bandă extinsă care poate ajunge până la frecvențe de până la 6 GHz și o lățime de bandă de bază de până la 120 MHz. De asemenea, aceasta dispune de mai multe opțiuni de interfețe de mare viteză (PCIe, Dual 1/10 GigE) și un FPGA Kintex-7 programabil de utilizator.

USRP B200-mini

USRP B200 mini [226] este o platformă SDR extrem de compactă și adaptabilă, cu dimensiuni reduse, care a fost concepută și fabricată de Ettus Research. USRP B200 Mini se potrivește pentru o multitudine de aplicații și suportă o diversitate mare de frecvențe, având la bază o arhitectură hardware care se bazează pe un FPGA Xilinx Spartan-6 ce poate fi programat de către utilizator.

Platforma SDR HackRF One

Platforma HackRF One [227], concepută și dezvoltată de Grand Scott Gadgets, este o platformă SDR care poate emite sau primi semnale radio în intervalul de frecvențe de la 1 MHz la 6 GHz.

Utilizând formulele formula factorului de zgomot total Friis pentru fiecare element al părților frontend ale fiecărei platforme SDR au rezultat următoarele valori ale factorului total de zgomot:

- SDR USRP N 210 (WBX RF): 1.62 dB (100 MHz), 1.45 (1GHz), 2.01 dB (2.5 GHz);
- SDR USRP X310 (CBX RF): 1.73 dB (2.5 GHz);
- SDR USRP B200-mini: 2.35 dB (100 MHz), 2.35 (1GHz), 3.35 dB (2.5 GHz);
- SDR HackRF One: 5.52 dB (sub 1 GHz), 5.84 (peste 1GHz).

4.5.2 Descrierea scenariului de măsurare

Setup-ul utilizat pentru realizarea măsurărilor descrise în secțiunea următoare a implicat cele patru platforme SDR prezentate în *Secțiunea 4.5.1*, împreună cu un analizor de spectru Agilent E4402B (9kHz-3GHz), care a fost folosit ca echipament de referință [213].

Trebuie precizat că pentru toate măsurătorile s-a folosit o singură antenă de bandă largă (MP 08-ANT-0861, 25MHz-6GHz), care a fost legată la intrările RF ale platformelor SDR printr-un divizor RF cu 4 porturi (Mini-Circuits ZN4PD1-63HP-S).

Fiecare platformă SDR a fost conectată la un computer gazdă, prin intermediul căruia am operat platforma și am colectat datele rezultate [213].

Pentru efectuarea funcțiilor amintite anterior au fost utilizate scripturi GNU Radio. Un amplificator cu zgomot redus (LNA – *Low Noise Amplifier*) (Mini-Circuits ZX60-V63+) a fost folosit doar pentru colectarea datelor RF pentru analizorul de spectru, pentru banda de frecvență de 2500-2690 MHz. Pentru fiecare bandă de frecvență și fiecare platformă SDR, s-au realizat 300 de măsurători, aferent unui timp de măsurare de aproximativ 5 minute. Aceleași proceduri de prelucrare digitală a semnalului au fost aplicate pentru toate dispozitivele testate.

4.5.3 Rezultatele și analiza măsurărilor

Setup-ul de măsurare experimental descris în secțiunea anterioară a fost utilizat pentru a efectua măsurători în benzile de frecvență menționate. Pentru fiecare dintre platformele SDR lățimea de bandă instantanee este limitată fie de front-end-ul RF, fie de interfața dintre platformă și computerul gazdă.

Dintre cele patru benzi menționate în *Tabelul 4.6*, doar banda 90-100 MHz este suficient de îngustă pentru a fi capturată într-o singură tranșă. Pentru toate celelalte benzi, scripturile GNU Radio au colectat informațiile necesare pentru întreaga lățime de bandă prin concatenarea a sub-benzi de frecvență de 10 MHz fiecare.

Deoarece performanța detectării și a alarmelor false în cadrul detecției spectrale depinde semnificativ de raportul semnal-zgomot, analizând valorile NF obținute și prezentate în *secțiunea 4.5.1*, putem concluziona că cea mai bună performanță ar trebui așteptată de la USRP N210 cu placa WBX, deoarece prezintă un NF global între 1,45 și 1,62 dB pentru benzile de frecvență 1-3 (vezi *Tabelul 4.6*) (frecvența benzii 4 a depășit intervalul plăcii WBX și nu a fost măsurată cu această platformă SDR).

4.6 Concluzii

În acest capitol am efectuat o comparație între patru platforme SDR diferite, având în vedere comportamentul acestor platforme atunci când sunt utilizate pentru

aplicații de detecție a spectrului. S-a efectuat un calcul teoretic a factorului de zgomot pentru partea de recepție a front-end-ului RF al fiecărei platforme. Au fost prezentate și discutate rezultatele măsurărilor efectuate în patru benzi de frecvență diferite. Cele mai mici valori ale factorului de zgomot dintre toate platformele a fost obținut pentru platformele SDR din familia USRP și astfel aceste platforme sunt recomandate ca soluții optimă pentru aplicații de detecție a spectrului.

Ca direcții viitoare de cercetare, intenționăm să aplicăm diferiți algoritmi de detecție a spectrului pe datele RF capturate cu diverse platforme SDR luate în considerare în acest articol și vom compara performanțele algoritmilor (probabilități de detecție și alarmă falsă) care pot fi obținute în fiecare caz. Pentru a avea posibilitatea de a controla raportul semnal-zgomot, vor fi utilizate semnale de test cunoscute. Deoarece există multe aplicații pentru care platformele SDR de cost redus sunt potrivite, intenționăm, de asemenea, să efectuăm o comparație a mai multor astfel de platforme în scenarii de bandă îngustă.

5. Proiectarea și implementarea unui sistem DDDS - DRONEND

Proiectul propus va folosi o platformă terestră sau aeriană în care se vor integra subsisteme de detecție, identificare, localizare și neutralizare (bruij) care folosesc tehnologii SDR. Trebuie precizat că realizarea acestui proiect a pornit de la stadiul actual al cercetărilor din acest domeniu și a încercat îmbunătățirea și optimizarea soluțiilor existente în vederea obținerii unei eficiențe sporite care să corespundă cerințelor de securitate actuale și viitoare.

Având în vedere considerentele prezentate mai sus, în activitatea mea de cercetare m-am implicat în realizarea unui proiect care a integrat într-un sistem de apărare împotriva dronelor. Sistemul a fost realizat folosind platforme SDR și va avea capacități de detecție, supraveghere, localizare și neutralizare a uneia sau mai multor drone ostile.

În acest capitol, vor fi prezentate două sisteme de detecție și apărare împotriva dronelor - DDDS, proiectate și implementate de către membri din cadrul comisiei de îndrumare, împreună cu o echipă de cercetare din cadrul companiei de securitate cibernetică Cyberwall [230]. Ambele variante ale sistemului au fost dezvoltate în cadrul proiectului de cercetare DronEnd [231]. Detaliile preliminare referitoare la proiect au fost prezentate în [232] și [233].

5.1 DRONEND - DDDS cu baza la sol

Scopul sistemului de apărare la sol DronEnd este de a asigura securitatea unei anumite zone împotriva prezenței neautorizate a dronelor. Pentru a atinge acest scop,

sistemul DronEnd scanează spectrul RF pentru a detecta prezența dronelor în zona supravegheată, identifică locația dronei utilizând algoritmi AoA și anihilează drona folosind metode de interferență RF. Diagrama bloc a sistemului de apărare la sol DronEnd implementat este prezentată în *Figura 5.1*.

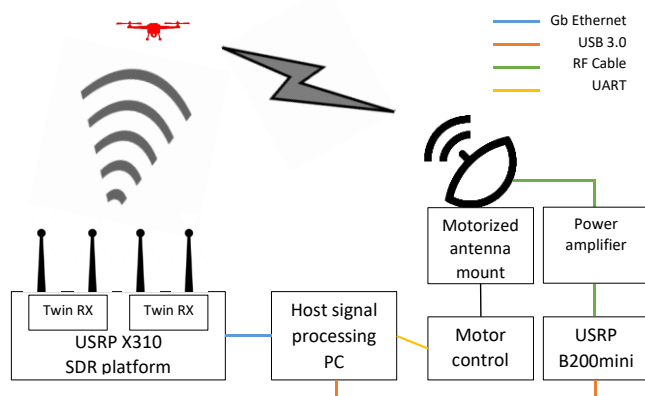


Figura 5.1 Diagrama bloc a DDDS DRONEND – cu baza la sol

În următoarele subsecțiuni, toate elementele sistemului vor fi detaliate, evidențiind etapele necesare pentru a realiza funcțiile de detecție, localizare și anihilare a dronei prin interferență.

5.1.1 Identificarea prezenței dronei folosind algoritmi de detecție spectrală

Primul pas necesar pentru identificarea prezenței unei drone în cazul sistemelor de apărare bazate pe radiofrecvență RF constă în monitorizarea spectrului radio prin intermediul unui proces de detecție spectrală pentru identificarea semnalelor transmise de dronă. [234]

În implementarea procesului de detecție spectrală în sistemul DronEnd, s-au utilizat algoritmi de detectare a energiei, precum 3EED (*Three-Event Energy Detection*) [235] și 3EED cu un prag adaptiv [236], care oferă performanțe îmbunătățite în comparație cu algoritmul clasic de detectare a energiei (CED – *Classic Energy Detection*) [237], și care au fost utilizați pentru identificarea prezenței dronelor în zona monitorizată.

Algoritmii menționați anterior au fost implementați pe platforme SDR din familia USRP USRP X310 [238] echipate cu plăci de expansiune RF Twin-RX [239], cu un interval de frecvențe de 10-6000 MHz).

Benzile de frecvență utilizate de dronele utilizate pentru testarea sistemului DronEnd - DJI Mavic Air [240], DJI Phantom 4 Pro v2.0 [241] și DJI Mini 2 [242]) au fost benzile ISM de 2,4 GHz (2400-2500 MHz) și 5 GHz (5730-5830 MHz), care pot fi acoperite utilizând platformele SDR menționate anterior, capabile să recepționeze semnale pe frecvențe de până la 6 GHz. Deoarece poziția dronelor țintă nu era inițial cunoscută, s-au utilizat antene omnidirecționale în acest pas.

Capturarea datelor RF a fost realizată utilizând un script Python GNU Radio. Deoarece lăţimea de bandă instantanee capturate folosind placa de expansiune RF Twin-RX este mai mică de 100 MHz, pentru a acoperi lăţimea de bandă de 100 MHz a benzilor ISM de 2,4 GHz și 5 GHz, mai multe sub-benzii au fost concatenate.

Odată ce semnalul transmis de drona țintă este detectat, se declanșează următorul pas, care constă în localizarea unghiului de sosire al semnalului recepționat, așa cum va fi discutat în următoarea subsecțiune.

5.1.2 Localizarea dronei folosind algoritmi AoA

După identificarea frecvenței de comunicație folosite de dronă, pasul următor necesar a fost colectarea datelor privind poziția dronei. Acest lucru a fost realizat folosind algoritmi AoA pentru a detecta unghiul de incidență al semnalului RF.

Platforma SDR utilizată ca hardware pentru a furniza partea frontală de recepție RF a fost USRP X310 [238], pe care au fost acroșate două plăci de expansiune RF Twin-RX [239] (domeniu de frecvență acoperit de la 10 la 6000 MHz, lăţime de bandă instantanee de 80 MHz). Fiecare din aceste module Twin-RX oferă două canale de recepție coerente, cu oscilatorul local care poate fi distribuit între cele două plăci, rezultând în total patru canale de recepție coerente aliniat în fază.

Sistemul de antene folosit a fost un sistem liniar de patru antene, distanțate la o distanță egală cu jumătate lungimii de undă aferentă frecvenței minime prin care comunică dronele (2,4 GHz). Estimarea diferenței inițiale de fază între cele patru canale de recepție a necesitat o etapă de calibrare după fiecare pornire a sistemului, implicând transmiterea unui semnal de test care va fi recepționat prin cabluri RF de lungime egală pe toate cele patru canale de recepție.

A fost folosit un splitter RF cu 5 porturi Mini-Circuits ZN4PD1-63HP-S+ [243] pentru a distribui semnalele.

După finalizarea etapei de calibrare, cele patru antene de tip - dipol VERT2450 [244] care fac parte din sistemul de antene au fost conectate la cele patru canale de recepție ale platformei SDR USRP X310 și, pe baza diferenței de fază a semnalelor recepționate, unghiul de incidență care corespunde poziției dronei a putut fi identificat utilizând algoritmi AoA. Am utilizat unul dintre algoritmii clasici AoA - algoritmul MUSIC.

Poziționarea obținută în acest mod a fost în planul azimutal, deoarece sistemul de antene utilizat a fost amplasat orizontal. Prin utilizarea unui al doilea sistem amplasat într-un plan vertical, a putut fi estimată și înălțimea dronei.

5.1.2 Neutralizarea unei drone folosind bruij RF

Următorul pas constă în transmiterea unui semnal de bruij către drona țintă, cu scopul de a întrerupe comunicațiile dintre dronă și operatorul de la sol. Deoarece semnalul de bruij trebuie transmis doar în direcția dronei țintă, pentru a evita interferența cu alte echipamente din zonă, s-a folosit o antenă direcțională.

După ce unghiul de incidență a fost detectat de algoritmul AoA, acesta a fost procesat (filtrat) folosind un script în mediul de simulare Matlab pentru a elimina orice indicii eronate legate de poziția dronei și a fost ulterior transmis prin intermediul unei interfețe seriale (UART - *Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*) către modulul de control al motoarelor (MCM – *Motor Control Module*), care controlează motoarele treaptă cu treaptă folosite pentru mișcarea suportului motorizat pentru poziționarea antenei de interferență.

Platforma SDR utilizată pentru generarea semnalului de interferență a fost USRP B200mini (domeniu de frecvență 70-6000 MHz) [245].

Deoarece puterea maximă care poate fi obținută la ieșirea platformei SDR este de 10 dBm, s-a utilizat un amplificator de putere Mini-Circuits ZHL-2W-63-S+ [246]) pentru a amplifica semnalul de interferență și a extinde raza sistemului, acesta oferind o amplificare de 42 dB și o putere maximă de ieșire de 2 W. Antena utilizată pentru transmiterea semnalului de interferență a fost o antenă direcțională Ubiquiti UMA-D [247], care acoperă benzile de frecvență 2.4-2.5 GHz și 5.1-5.9 GHz și oferă o amplificare de 10 dBi în benzile de 2.4 GHz și de 15 dBi în banda de 5.8 GHz.

Prin utilizarea unei antene direcționale care vizează locația dronei pentru transmiterea semnalului de interferență, interferențele produse altor sisteme de comunicație din vecinătate sunt minimizează. Mai mult, amplificarea de transmisie poate fi ajustată în funcție de dimensiunea zonei care trebuie protejată.

Testele au fost efectuate într-un scenariu suburban în aer liber folosind dronele DJI Mavic Air, DJI Phantom 4 Pro v2.0 și DJI Mini 2 ca ținte, iar anihilarea dronei, ceea ce a dus la o aterizare forțată în poziția în care se afla drona când semnalul de interferență a fost activat, a fost posibilă pentru distanțe de 40 de metri de la zona în care se afla sistemul terestru DronEnd.

5.2 DRONEND - DDDS aerial

Sistemul aerial DronEnd își propune să amplifice raza de acțiune și capacitățile platformei DronEnd GROUND, detaliată în profunzime în *Subsecțiunea 5.1*.

5.2.1 Descrierea platformei SDR USRP E-312

Pentru implementarea sistemului aerial DronEnd a fost utilizată o platformă standalone SDR USRP E312 [248].

5.2.2 Descrierea soluției și a funcțiilor DDDS – DRONEND aerial

O schemă bloc a arhitecturii de sistem propuse pentru platforma aeriană DronEnd este prezentată în *Figura 5.9*. Sistemul constă într-o platformă aeriană

propriu-zisă, evidențiată în negru, pe care este acroșată o platformă SDR autonomă de tip USRP E312.

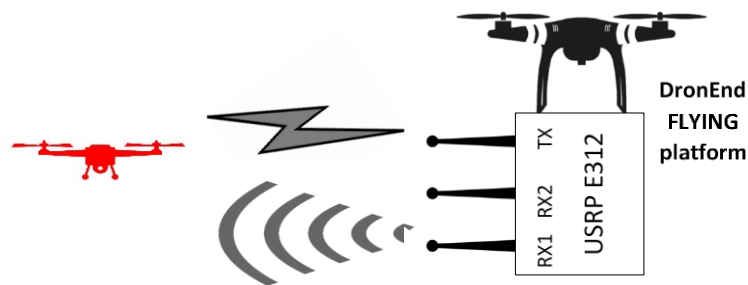


Figura 5.2 Schema bloc a DDS-aerial DRONEND

Sistemul trebuie să îndeplinească următoarele trei funcții principale:

- **Deteție:** Identificarea prezenței dronei-țintă bazată pe schimbul de date prin canalele radio între drona-țintă și un operator situat la sol. Pentru implementarea acestei funcții sunt folosiți algoritmi de deteție spectrală;
- **Localizare:** Determinarea direcției relative a dronei-țintă, având ca referință propria platformă aeriană. Algoritmi de determinare a AoA sunt utilizați pentru implementarea acestei funcții;
- **Apărare:** Neutralizarea dronei-țintă detectate prin transmisia unui semnal de bruij în banda de frecvență utilizată pentru comunicațiile dronei-țintă.

5.2.3 Detalierea funcțiilor DRONEND-aerial

Primul pas implică identificarea prezenței dronei prin monitorizarea benzilor de frecvență utilizate pentru comunicarea dintre drona-țintă și un operator situat la sol. Majoritatea dronelor comerciale se folosesc de benzile de frecvență industriale, științifice și medicale (ISM) de 2,4 GHz și 5 GHz, prin urmare aceste benzi au fost avute în vedere în proiectarea sistemului aerian DronEnd. Pentru a identifica semnalele transmise de drona-țintă, au fost utilizați algoritmi de deteție spectrală.

Din perspectiva hardware, a fost utilizată o antenă omnidirecțională dual-band VERT2450 [249] (2,4-2,5 și 4,9-5,9 GHz).

Rezultatul acestui pas (banda de frecvență în care a fost detectată drona-țintă) este transmis către modulul de identificare a direcției radio și către modulul de bruij, după cum se poate observa în *Figura 5.10*.

Al doilea pas constă în identificarea direcției relative a dronei-țintă. Acest proces se desfășoară prin analiza diferenței de fază a semnalelor primite pe cele două canale de recepție disponibile pe platforma SDR USRP E312.

Algoritmi pentru determinarea unghiului de incidență radio - AoA, precum MUSIC și ROOT MUSIC, pot fi utilizați pentru a obține o estimare a direcției relative.

Caracteristicile subsistemului de identificare a direcției relative sunt următoarele:

- Cele două antene de recepție ale platformei SDR pot localiza un singur UAV țintă într-un moment dat.
- Lungimile de undă (λ) corespunzătoare benzilor de frecvență utilizate pentru controlul dronelor comerciale sunt cuprinse între 10 și 20 cm, ceea ce implică amplasarea antenelor de recepție la distanțe egale cu multiplii de $\lambda/2$.

Pasul al treilea constă în utilizarea datelor obținute în urma proceselor descrise anterior pentru a emite un semnal de bruij în banda de frecvență în care a fost identificată drona țintă. Scopul acestui semnal de bruij este să întrerupă legătura radio prin care este controlată drona țintă, să inducă o pierdere a controlului asupra acesteia și să o forțeze să aterizeze.

Ținând cont de faptul că puterea maximă pe care o poate emite platforma USRP E312 SDR este sub 10 dBm, semnalul de perturbare emis are capacitatea de a interfera cu legătura radio dintre operator și drona vizată, având în vedere distanța dintre propria noastră platformă aeriană de apărare și drona țintă, care este de ordinul zecilor de metri.

5.2.4 Detalii privind implementarea hardware a DRONEND - aerial

Arhitectura hardware constă din următoarele componente:

- UAV-ul propriu, care poate fi fie o platformă de apărare DJI Phantom 4 v2.0 (*Figura 5.13*), fie DJI Matrice 600 Pro (*Figura 5.14*).
- platforma SDR USRP E312 echipată cu două antene VERT2450.
- un sistem de acroșare realizat prin intermediul unei imprimante 3D, conceput pentru a asigura conexiunea între UAV și SDR.

Testele au fost realizate cu succes într-un mediu rural, unde comunicarea dintre drona vizată și operatorul de la sol a fost întreruptă când drona noastră de apărare s-a apropiat la o distanță de câțiva zeci de metri de drona țintă. Inițial, comunicarea video între drona țintă și operator a fost perturbată, iar ulterior drona țintă a fost obligată să aterizeze. Pe pagina de web a proiectului, <https://dronend.ro>, puteți viziona o înregistrare video în care sunt ilustrate aceste teste.

5.3 Concluzii

În urma activităților efectuate în cadrul proiectului DronEnd, au fost create două prototipuri, unul pentru sistemul terestru DronEnd și celălalt pentru sistemul

aerian DronEnd. Aceste prototipuri au demonstrat eficacitatea în detectarea, localizarea și bruiajul dronelor țintă care au intrat în zona supravegheată.

Aceste prototipuri au validat scopurile proiectului, adică detectarea și localizarea dronelor țintă care pătrund în zona monitorizată, precum și neutralizarea lor prin utilizarea tehnicilor de bruiaj, toate acestea realizându-se fără a necesita investiții semnificative, prin utilizarea platformelor radio definite prin software (SDR). Un alt avantaj al acestei abordări este flexibilitatea și scalabilitatea sistemului, care poate fi adaptat în funcție de diversele cerințe specifice diferitelor scenarii de utilizare.

6. Concluzii

În această teză de doctorat am evidențiat variante de folosire a principalelor metode de localizare a unei surse radio în sisteme de detecție, localizare și combatere a dronelor. De asemenea, în urma cercetării efectuate am determinat cele mai potrivite metode și sisteme pentru proiectarea unui sistem de combatere a utilizării neautorizate a dronelor.

Această cercetare este justificată de folosirea neautorizată, în creștere, a dronelor care a dus, inevitabil, la apariția unor amenințări și potențiale breșe de securitate care decurg din folosirea acestor tehnologii.

Astfel, pentru protejarea obiectivelor strategice și a celor care țin de siguranța națională se impune abordarea cercetării în acest domeniu prin folosirea unor mijloace și metode adecvate.

În acest sens, în această teză am implementat, împreună cu membri din cadrul proiectului DRONEND un sistem terestru și unul aerian care înglobează subsisteme de detecție, identificare, localizare și neutralizare (bruiaj) care folosesc tehnologii SDR.

Trebuie precizat că realizarea acestui proiect a pornit de la stadiul actual al cercetărilor din acest domeniu și a avut ca scop îmbunătățirea și optimizarea soluțiilor existente în vederea obținerii unei eficiențe sporite care să corespundă cerințelor de securitate actuale și viitoare.

Se constată că, în activitatea de cercetare legată de algoritmi de localizare a surselor de semnale radio și folosirea echipamentelor SDR – USRP pentru detecția și prelucrarea semnalelor și, în final, pentru realizarea și validarea sistemelor de combatere a dronelor cu intenții ostile am realizat obiectivele stipulate în începutul lucrării, atât **obiectivelor principale**:

- contribuții la perfecționarea algoritmilor de localizare a obiectelor care sunt surse de semnale radio; studiul lor prin simulare și experimental prin folosirea tehnologiei SDR – USRP;
- contribuții la utilizarea unor astfel de algoritmi în aplicații legate de identificarea, localizarea și combaterea unor obiecte zburătoare cum sunt dronele.

cât și obiectivele secundare:

- realizarea un studiu extins cu privire la stadiul actual al cercetării în domeniul metodelor folosibile pentru localizarea unei surse de semnal radio și utilizarea acestora în sistemele destinate luptei împotriva sistemelor UAV folosite în mod neautorizat;
- realizarea unei analize comparative prin simulare și experimental a algoritmilor de localizare a surselor radio în vederea identificării algoritmului optim pentru implementarea unui sistem utilizabil în localizarea dronelor;
- folosirea unor medii de programare cum ar fi: MATLAB și GNU-radio, Labview pentru analiza de la obiectivul precedent;
- conceperea, realizarea (ca model experimental) și validarea unui sistem pentru detecția, localizarea și combaterea dronelor.

6.1 Rezultate obținute

Teza de doctorat are o structură logică alcătuită din șase capitole care descriu în detaliu procesele, stadiul actual al cercetării, metodologia de cercetare și exemple de implementare ale acestora. În partea introductivă a tezei este prezentat un breviar succint a domeniului de cercetare, respectiv scopul, motivația, obiectivele și conținutul tezei de doctorat.

În capitolul doi este expus stadiul actual al cercetării din domeniul luptei împotriva folosirii neautorizate a sistemelor UAV.

Din cercetarea aferentă capitolului doi am realizat o revizie sistematică a literaturii folosind metodologia PRISMA în vederea obținerii cât mai precise a stadiului curent al sistemelor de detecție și apărare împotriva dronelor.

În cadrul analizei au fost avute în vedere:

- clasificare a sistemelor de detecție a dronelor bazată pe tipul de senzori utilizați;
- descriere detaliată a sistemelor de detecție și apărare a dronelor bazate pe RF, punând accent pe utilizarea platformelor SDR pentru implementarea acestor sisteme;
- o listă cu incidente raportate provocate de utilizarea nereglementată a sistemelor UAV;
- aspecte privind reglementările internaționale din domeniu.

Din această revizie sistematică a literaturii de specialitate reiese scopul, rolul și necesitatea concepării sistemului de detecție, localizare și combatere a dronelor – DRONEND.

În capitolul trei sunt trecute în revistă principalele metode și parametri de semnal folosiți pentru localizarea surselor de semnal radio.

În cadrul acestui capitol au fost trecuți în revistă cei mai importanți algoritmi folosiți pentru determinarea locației radio:

- MUSIC;

- ROOT MUSIC;
- ESPRIT;
- CAPON.

Acești algoritmi au fost analizați în aplicația software MATLAB în funcție de variația erorii de spectru și a numărului de elemente ale matricii de antene folosite pentru recepția semnalelor.

De asemenea, în cadrul acestei secțiuni s-au ilustrat performanțele acestor algoritmi, folosind aplicația software MATLAB.

Astfel, putem spune că cei patru algoritmi prezentați (MUSIC, ROOT MUSIC, ESPRIT și CAPON) sunt algoritmi de precizie ridicată.

Rezultatele au arătat că cei patru algoritmi de estimare a direcției radio că prezintă o sensibilitate ridicată la eroare. Se constată că performanțele acestor algoritmi cresc odată cu numărul de elemente ale matricii de antene folosite pentru recepție.

În urma simulărilor a rezultat că cei mai buni algoritmi pentru sistemul de detecție, localizare și combatere a dronelor – DRONEND sunt MUSIC deoarece oferă performanțe relativ bune cu o complexitate de calcul scăzută (viteză mare de determinare a unghiului de incidență radio) în contextul în care drona țintă prezintă o versatilitate foarte ridicată în mișcări.

În capitolul patru sunt prezentate principalele moduri de realizare a unei soluții integrate pe o platformă SDR. Aici este prezentată evoluția și necesitatea dezvoltării echipamentelor de tip SDR și o clasificare a acestora.

De asemenea, aici sunt prezentate o comparație și analiză rezultate în urma unor implementări practice pentru mai multe platforme SDR.

În acest capitol:

- am efectuat o comparație între patru platforme SDR diferite, având în vedere comportamentul acestor platforme atunci când sunt utilizate pentru aplicații de detecție a spectrului;
- a fost efectuat un calcul teoretic al factorului de zgomot pentru partea de recepție a front-end-ului RF al fiecărei platforme.
- au fost prezentate și discutate rezultatele măsurătorilor efectuate în patru benzi de frecvență diferite.

Cel mai mic factor de zgomot dintre toate platformele a fost obținut pentru USRP N210 cu placa WBX RF, astfel încât această platformă este recomandată ca soluție optimă pentru aplicații de detecție a spectrului.

Am ținut cont de rezultatele măsurătorilor și, astfel, pentru implementarea sistemului de localizare, detecție și combatere a dronelor am folosit USRP X-310 cu plăci CBX RF care acoperă benzile ISM folosite pentru controlul și comunicațiile dronelor la performanțe ridicate.

Capitolul cinci constă în descrierea activităților legate de implementarea unor sisteme integrate bazate pe tehnologii SDR pentru identificarea, localizarea și anihilarea activităților unor drone ostile în două variante constructive: una cu baza la

sol și alta cu baza aeropurtată. Aceste activități s-au desfășurat în cadrul proiectului DronEnd și s-au materializat în dezvoltarea celor două prototipuri, unul pentru sistemul terestru și unul pentru sistemul aerian. Aici trebuie să precizez că activitatea mea de cercetare din stagiul doctoral a fost mult potențată de implicarea mea în proiectul DRONEND coordonat de către domnul prof.dr.ing. Alexandru Marțian.

Proiectul DRONEND a fost realizat cu fonduri din ale Ministerului Român pentru Educație și Cercetare - CCCDI-UEFISCDI, numărul proiectului: PN-III-P2-2.1-PED-2019-1951 din cadrul PNCDI III.

Au contribuit la realizarea celor două prototipuri care au confirmat funcționalitățile de detectare, localizare și bruij pentru dronele țintă care au intrat în zona monitorizată. S-a verificat că se pot realiza astfel de echipamente fără a necesita costuri ridicate, prin utilizarea platformelor radio definite prin software (SDR). Un alt avantaj al acestei abordări constă în flexibilitatea și scalabilitatea sistemului, care poate fi adaptat în funcție de diverse cerințe specifice diferitelor scenarii de utilizare.

Am participat alături de membrii echipei de cercetare de la Universitatea Politehnica din București, la analiza realizată împreună cu partenerii de la Cyberwall SRL, cu privire la perspectivele de producție a unor variante ale sistemului care să poată fi comercializate. Există numeroase cazuri în care un astfel de sistem ar putea fi solicitat, precum securizarea evenimentelor sportive ce au loc pe stadioane/arene, protecția spațiului aerian deasupra locuințelor private, securizarea aeroporturilor sau a corporațiilor, protecția infrastructurilor critice sau a închisorilor.

În capitolul șase sunt prezentate cele mai semnificative concluzii rezultate în urma elaborării acestei teze de doctorat.

6.2 Contribuții personale

1. Am realizat o sinteză teoretică cu privire la stadiul evoluției aplicațiilor destinate combaterii dronelor folosind modelul PRISMA pentru realizarea reviziilor sistematice ale literaturii utilizând cuvinte cheie precum „drone”, „counter-drone”, „counter-UAS”, „UAV” [13].

Rezultatele au fost interpretate și diseminate în jurnalul Sensors [13] – factor de impact 3.9 (Q1 la momentul respectiv)

2. Am evidențiat necesitatea sistemelor de combatere a dronelor prin evidențierea incidentelor recente care au la bază utilizarea neautorizată și/sau neglijentă a dronelor [13].

3. Am studiat și pus în evidență cadrul legislativ din România privind utilizarea dronelor, respectiv a contramăsurilor de bruij radio [13].

4. În urma reviziei sistematice a literaturii am clasificat sistemele de combatere a dronelor în funcție de tipurile de senzori folosiți, respectiv a contramăsurilor care pot fi folosite cu accent pe cele care folosesc detecția RF și bruij de radiofrecvență [13];

5. Am participat la un stagiu de pregătire și am obținut licența pentru utilizarea dronelor în zone urbane A1 și A3 necesar pentru pilotarea în condiții de test a dronei – aferent proiectului DRONEND;

6. Am realizat un breviar teoretic pentru descrierea modului în care se poate realiza localizarea unei surse radio

Rezultatele au fost raportate în primul raport de cercetare și în [234];

7. Am sintetizat și evidențiat cei mai importanți algoritmi pentru estimarea DoA – MUSIC, ROOT MUSIC, ESPRIT și CAPON;

8. Am realizat o analiză a performanțelor din punct de vedere al spectrului pentru algoritmi de estimare DoA descriși anterior folosind mediul de simulare MATLAB.

Această analiză a dus decizia de a folosi algoritmul MUSIC pentru implementarea DRONEND terestru și aerian;

9. Am realizat o sinteză privind evoluția și modurile de realizare a platformelor SDR.

Aceste rezultate au fost raportate în primul raport de cercetare.

10. Am colaborat la realizarea unei analize a performanțelor între mai multe platforme SDR într-un scenariu de laborator folosind MATLAB și GNU RADIO. Criteriile de performanță au fost evaluate în funcție de calculul factorului de zgomot totală (NF) a părții de front-end al recepției pentru fiecare SDR.

Rezultatele au fost publicate în [215] și cel de-al doilea raport de cercetare.

11. Am participat activ la realizarea constructivă a DRONEND în cele două variante constructive: DRONEND – terestru și aerian.

Rezultatele au fost prezentate în [13, 233], respectiv rapoartele de cercetare 3 și 4.

12. Am participat activ la scrierea codului necesar în limbaj Python -necesar pentru programarea platformelor SDR ale DRONEND [13, 233]:

13. Am contribuit la obținerea rezultatelor preliminare de laborator pentru platformele SDR care au fost folosite [13, 215, 233].

14. Colectivul de proiect a depus o cerere de brevet cu titlul: „Sistem de detecție, localizare și bruieră a unei drone țintă de către o altă dronă de apărare și de către o stație de la sol (DronEnd) la Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci (OSIM).

6.3 Lista lucrărilor originale

Rapoarte de cercetare:

- a) **Primul raport de cercetare** - Contribuții privind metodele de localizare a unei surse radio;
- b) **Al doilea raport de cercetare** – Analiza comparativă a platformelor SDR pentru aplicații de detecție spectrală;
- c) **Al treilea raport de cercetare** – Aspecte privind proiectarea și realizarea unui sistem de apărare împotriva dronelor bazat pe platforme SDR (DronEnd-Ground);
- d) **Al patrulea raport de cercetare** - Aspecte privind proiectarea și realizarea unui sistem de apărare împotriva dronelor bazat pe platforme SDR (DronEnd -Flying)

Lista lucrărilor publicate:

1. A. Martian, **F. Lucian Chiper**, O. Mohammed Khodayer Al-Dulaimi, M. Jalal Ahmad Al Sammarraie, C. Vladeanu and I. Marghescu, "Comparative Analysis of Software Defined Radio Platforms for Spectrum Sensing Applications," 2020 13th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 2020, pp. 369-374, doi: 10.1109/COMM48946.2020.9142024.
(Accession Number: WOS:000612723900065, IEEEXplore)
2. A. Martian, **F. -L. Chiper**, R. Craciunescu, C. Vladeanu, O. Fratu and I. Marghescu, "RF Based UAV Detection and Defense Systems: Survey and a Novel Solution," 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527871.
(Accession Number: WOS: 000892556200069, IEEEXplore)
3. **Chiper, F.-L.**; Martian, A.; Vladeanu, C.; Marghescu, I.; Craciunescu, R.; Fratu, O. Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution. Sensors 2022, 22, 1453. <https://doi.org/10.3390/s22041453>
(ISIThompson, WOS:000765140800001)
4. **Florin-Lucian Chiper**, Alexandru Martian, Daniel-Ionut Muscalu, Calin Vladeanu and Ion Marghescu. Aerial Drone Defense System Based on Software Defined Radio Platforms) to 2022 14th International Conference on Communications (COMM) doi: 10.1109/COMM54429.2022.9817314.
5. Omer Mohammed Khodayer Al-Dulaimi, **Florin-Lucian Chiper**, Călin Vladeanu and Alexandru Martian Triple-Threshold Energy Detection With Adaptive Intermediate Threshold for Cooperative Spectrum Sensing to 2022 14th International Conference on Communications (COMM) doi: 10.1109/COMM54429.2022.9817314.

6.4 Perspective de dezvoltare a activității de cercetare

Ca direcții de continuare a activității de cercetare, intenționez să continui compararea performanțelor diferiților algoritmi de detecție a dronelor folosind analiza spectrului radio (probabilități de detecție și alarmă falsă). Voi explora posibilitatea îmbinării mai multor algoritmi de detecție (video, radar, RF) pentru a crește fiabilitatea și a reduce cazurile în care detecția nu poate avea loc.

De asemenea, doresc să continui cercetarea pentru implementarea unui sistem autonom de combatere a dronelor care să îndeplinească cele trei funcții: detecție, localizare și neutralizare.

Bibliografie

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, May 2016, pp. 36–42.
- [2] J. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, July 2005.
- [3] G. Yang, X. Shi, L. Feng, S. He, Z. Shi and J. Chen, "CEDAR: A Cost-effective Crowdsensing System for Detecting and Localizing Drones," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Early Acces Article, 2019, doi: 10.1109/TMC.2019.2921962.
- [12] J. J. Caffery, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [13] Chiper, F.-L.; Martian, A.; Vladeanu, C.; Marghescu, I.; Craciunescu, R.; Fratu, O. Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution. *Sensors* 2022, 22, 1453. <https://doi.org/10.3390/s22041453>
- [14] World Economic Forum. Drones and Tomorrow's Airspace. 2020. Available online: <https://www.weforum.org/communities/drones-and-tomorrow-s-airspace> (accessed on 11 February 2022).
- [16] Germen, M. Alternative cityscape visualisation: Drone shooting as a new dimension in urban photography. In *Proceedings of the Electronic Visualisation and the Arts (EVA)*, London, UK, 12–14 July 2016; pp. 150–157.
- [17] Kaufmann, E.; Gehrig, M.; Foehn, P.; Ranftl, R.; Dosovitskiy, A.; Koltun, V.; Scaramuzza, D. Beauty and the beast: Optimal methods meet learning for drone racing. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Montreal, QC, Canada, 20–24 May 2019; pp. 690–696.
- [18] Kaufmann, E.; Loquercio, A.; Ranftl, R.; Dosovitskiy, A.; Koltun, V.; Scaramuzza, D. Deep drone racing: Learning agile flight in dynamic environments. In *Proceedings of the Conference on Robot Learning (CoRL)*, Zürich, Switzerland, 29–31 October 2018; pp. 133–145.
- [19] Ahmad, A.; Cheema, A.A.; Finlay, D. A survey of radio propagation channel modelling for low altitude flying base stations. *Comput. Netw.* 2020, 171, 107122.
- [20] Tozer, T.; Grace, D.; Thompson, J.; Baynham, P. UAVs and HAPs potential convergence for military communications. In *Proceedings of the IEEE Colloquium on Military Satellite Communications*, London, UK, 6 June 2000; pp. 10-1–10-6.
- [21] Schneiderman, R. Unmanned drones are flying high in the military/aerospace sector. *IEEE Signal Process. Mag.* 2012, 29, 8–11.
- [22] Chen, J.Y.C. UAV-guided navigation for ground robot tele-operation in a military reconnaissance environment. *Ergonomics* 2010, 53, 940–950.

- [23] Coffey, T.; Montgomery, J.A. The emergence of mini UAVs for military applications. *Def. Horiz.* 2002, 22, 1.
- [25] Iscold, P.; Pereira, G.A.S.; Torres, L.A.B. Development of a hand launched small UAV for ground reconnaissance. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2010, 46, 335348.
- [26] Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tezlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Available online: <http://www.prisma-statement.org/> (accessed on 11 February 2022).
- [27] Butt, A.; Shah, S.I.A.; Zaheer, Q. Weapon launch system design of anti-terrorist UAV. In *Proceedings of the International Conference on Engineering Technology (ICEET)*, Lahore, Pakistan, 21–12 February 2019; pp. 1–8.
- [28] EY India. What's the Right Strategy to Counter Rogue Drones? Available online: https://www.ey.com/en_in/emergingtechnologies/whats-the-right-strategy-to-counter-rogue-drones (accessed on 12 January 2022).
- [31] Drone Hits Plane at Heathrow Airport, Says Pilot. Available online: <https://www.theguardian.com/uk-news/2016/apr/17/drone-plane-heathrow-airport-british-airways> (accessed on 12 January 2022).
- [32] Alex Silverman, Drone Hits Army Helicopter Flying Over Staten Island. Available online: <https://newyork.cbslocal.com/2017/09/22/drone-hits-army-helicopter/> (accessed on 12 January 2022).
- [33] Drone Collides with Commercial Aeroplane in Canada. Available online: <https://www.bbc.com/news/technology-41635518> (accessed on 12 January 2022).
- [34] Boeing 737 Passenger Jet Damaged in Possible Mid-Air Jet. Available online: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-12-13/aeromexico-737-jetliner-damaged-in-possible-midair-drone-strike> (accessed on 12 January 2022).
- [35] Plane Damaged after Being Hit by York Police Drone at Buttonville Airport. Available online: <https://toronto.ctvnews.ca/plane-damaged-after-being-hit-by-york-police-drone-at-buttonville-airport-1.5554617> (accessed on 12 January 2022).
- [36] Drone's Operator Detained for Flying Near Chinese Airplane. Available online: <https://edition.cnn.com/2017/01/17/asia/china-drone-passenger-plane-near-miss/> (accessed on 12 January 2022).
- [37] Air New Zealand Calls for Drone Legislation after Near Miss. Available online: <https://www.bbc.com/news/world-asia-43551373.amp> (accessed on 12 January 2022).
- [38] Gatwick Drones: As it Happened. Available online: <https://www.bbc.com/news/live/uk-england-sussex-46564814> (accessed on 12 January 2022).
- [39] Ripley, C.W. Drone with Radioactive Material Found on Japanese Prime Minister's Roof. 2015. Available online: <https://edition.cnn.com/2015/04/22/asia/japan-primeminister-rooftop-drone/index.html> (accessed on 12 January 2022).

- [40] Gibbons-Neff, T. ISIS Used an Armed Drone to Kill Two Kurdish Fighters and Wound French Troops, Report Says. 2016. Available online: <https://www.washingtonpost.com/news/checkpoint/wp/2016/10/11/isis-used-an-armed-drone-to-kill-twokurdish-ghters-and-wound-french-troops-report-says/> (accessed on 12 January 2022).
- [41] BBC. Venezuela President Maduro Survives Drone Assassination Attempt. 2018. Available online: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-45073385> (accessed on 12 January 2022).
- [42] Drone Incident Management at Aerodromes. Available online: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/drone_incident_management_at_aerodromes_part1_website_suitable.pdf (accessed on 12 January 2022).
- [43] FCC Enforcement Advisory, Cell Jammers, GPS Jammers, and Other Jamming Devices, document FCC RCD 1329(4.2); FCC: Washington, DC, USA, 2011.
- [44] Radiocommunications Exemption Arrangements for Drone Jamming Devices. Available online: <https://www.acma.gov.au/sites/default/files/2019-08/IFC-4-2019-Consultation%20Paper%20-%20Radiocommunications%20exemption%20arrangements%20for%20drone%20jamming%20devices.docx> (accessed on 12 January 2022).
- [45] Markarian, G.; Staniforth, A. Countermeasures for Aerial Drones; ARTECH HOUSE: Norwood, MA, USA, 2021, ISBN 13: 978-1-63081-801-2.
- [46] Michel, A.H. Counter-Drones Systems, 2nd ed.; Report from the Center of the Study of the Drone at Bard College: Annandale-On-Hudson, NY, USA, 2019. Available online: <https://dronecenter.bard.edu/files/2018/02/CSD-Counter-Drone-Systems-Report.pdf> (accessed on 11 February 2022).
- [47] Brust, M.R.; Danoy, G.; Stolfi, D.H.; Pascal B. ; Swarm-based counter UAV defense system. *Discov Internet Things* 2021, 1, 2. <https://doi.org/10.1007/s43926-021-00002-x>.
- [48] Alsok. 2020. Available online: <https://www.alsok.co.jp/en/> (accessed on 12 January 2022).
- [49] Ottoy, G.; de Strycker, L. An improved 2D triangulation algorithm for use with linear arrays. *IEEE Sens. J.* 2016, 16, 8238–8243.
- [50] Shi, Z.; Chang, X.; Yang, C.; Wu, Z.; Wu, J. An Acoustic-Based Surveillance System for Amateur Drones Detection and Localization. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 2731–2739. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2964110>.
- [51] Mezei, J.; Fiaska, V.; Molnar, A. Drone sound detection. In Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), Budapest, Hungary, 19–21 November 2015; pp. 333–338.
- [52] Hilal, A.A.; Mismar, T. Drone Positioning System Based on Sound Signals Detection for Tracking and Photography. In Proceedings of the 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, 4–7 November 2020; pp. 0008–0011. <https://doi.org/10.1109/IEMCON51383.2020.9284851>.

- [53] Kim, J.; Kim, D. Neural network based real-time UAV detection and analysis by sound. *J. Adv. Inf. Technol. Converg.* 2018, 8, 43–52.
- [54] Busset, J.; Perrodin, F.; Wellig, P.; Ott, B.; Heutschi, K.; Rühl, T.; Nussbaumer, T. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras. *Unmanned/Unattended Sensors Sensor Netw. XI. Adv. Free- Space Opt. Commun. Techn. Appl.* 2015, 9647, 96470F.
- [55] Christnacher, F.; Hengy, S.; Laurenzis, M.; Matwyschuk, A.; Naz, P.; Schertzer, S.; Schmitt, G. Optical and acoustical UAV detection. *Electro-Opt. Remote Sens. X* 2016, 9988, 99880B.
- [56] Seo, Y.; Jang, B.; Im, S. Drone detection using convolutional neural networks with acoustic STFT features. In *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signals-based Surveillance (AVSS)*, Auckland, New Zealand, 27–30 November 2018; pp. 1–6.
- [57] Bernardini, A.; Mangiatordi, F.; Pallotti, E.; Capodiferro, L. Drone detection by acoustic signature identification. *Electron. Imag.* 2017, 2017, 60–64.
- [58] Hauzenberger, L.; Ohlsson, E.H. Drone Detection Using Audio Analysis. Master's Thesis, Department of Electrical and Information Technology..., Faculty of Engineering, departments at LTHLund, Sweden, 2015.
- [59] Harvey, B.; O'Young, S. Acoustic detection of a xed-wing UAV. *Drones* 2018, 2, 4–22.
- [60] Yang, C.; Wu, Z.; Chang, X.; Shi, X.; Wo, J.; Shi, Z. DOA Estimation Using Amateur Drones Harmonic Acoustic Signals. In *Proceedings of the 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, Sheffield, South Yorkshire, 8–11 July 2018; pp. 587–591. <https://doi.org/10.1109/SAM.2018.8448797>.
- [61] Kim, J.; Park, C.; Ahn, J.; Ko, Y.; Park, J.; Gallagher, J.C. Real-time UAV sound detection and analysis system. In *Proceedings of the 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Glassboro, NJ, USA, 13–15 March 2017; pp. 1–5.
- [62] Siriphun, N.; Kashihara, S.; Fall, D.; Khurat, A. Distinguishing Drone Types Based on Acoustic Wave by IoT Device. In *Proceedings of the 2018 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, Chiang Mai, Thailand, 21–24 November 2018; pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSEC.2018.8712755>.
- [63] Droneshield. Dronesentry. 2020. Available online: <https://www.droneshield.com/sentry> (accessed on 11 February 2022).
- [64] Chang, X.; Yang, C.; Wu, J.; Shi, X.; Shi, Z. A surveillance system for drone localization and tracking using acoustic arrays. In *Proceedings of the IEEE 10th Sensor Array Multichannel Signal Process Workshop (SAM)*, Sheffield, UK, 8–11 July 2018; pp. 573–577.
- [65] Al-Emadi, S.; Al-Ali, A.; Mohammad, A.; Al-Ali, A. Audio based drone detection and identification using deep learning. In *Proceedings of the 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, 24–28 June 2019; pp. 459–464.

- [116] Shi, X.; Yang, C.; Xie, W.; Liang, C.; Shi, Z.; Chen, J. Anti-drone system with multiple surveillance technologies: Architecture, implementation, and challenges. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 68–74.
- [126] Robin Radar Systems. Available online: <https://www.robinradar.com/press/blog/9-counter-drone-technologies-to-detect-and-stop-drones-today?fbclid=IwAR2Mnxqbl1JLYmQJ5FXOe-UCKHfoi9jf8T6HbXW7b-LNzX4YkEphGqigEM>, (accessed on 2 February 2022).
- [141] Lin, J.; Singer, P. Drones, Lasers, and Tanks: China Shows Off Its Latest Weapons. 2017. Available online: <https://www.popsci.com/china-new-weapons-lasers-drones-tanks/> (accessed on 12 January 2022).
- [142] Josh Spires, Dubai-Made Magnetic Counter-Drone System to Launch Soon. 2021. Available online: https://dronedj.com/2021/01/04/dubai-made-magnetic-counter-drone-system-to-launch-soon/?fbclid=IwAR3e5Lk5TQZzxU_ovMRYqJ6rDm2XU4_T247rZSH9rJINotDHMQQQkWQIByU (accessed on 12 January 2022).
- [143] Atherton, K.D. Trained Police Eagles Attack Drones on Command. 2016. Available online: <https://www.popsci.com/eagles-attackdrones-at-police-command/> (accessed on 12 January 2022).
- [158] Directive 2014/53/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014. Available online: https://www.ancom.ro/en/uploads/links_files/Directive_RED_2014_53_UE.pdf (accessed on 12 January 2022).
- [159] Hotărâre Privind Punerea la Dispoziție pe Piață a Echipamentelor Radio. Available online: https://www.ancom.ro/uploads/articles/file/industrie/Echipamente%20radio/HG_740_2016_privind_punerea_la_dispozitie_pe_piata_a_echipamentelor_radio_in_vigoare_din_08_08_2019EN.pdf (accessed on 12 January 2022).
- [178] Skorobogatov, G.; Barrado, C.; Salamí, E. Multiple UAV systems: A survey. *Unmanned Syst.* 2020, 8, 149–169.
- [184] J. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, July 2005.
- [185] A. J. Weiss, "Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 513–516, May 2004.
- [186] Y. Qi, H. Kobayashi, and H. Suda, "Analysis of wireless geolocation in a non-line-of-sight environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 3, pp. 672–681, Mar. 2006.
- [200] A. Vesa, "Direction of arrival estimation using music and root-music algorithm," in 18th Telecommunication forum TELFOR, November 2010.
- [201] X. Gu and Y. H. Zhang, "Resolution threshold analysis of music algorithm in radar range imaging," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 31, pp. 297–321, 2011.

- [203] C. R. Dongarsane, A. N. Jadhav, and S. M. Hirikude, "Performance analysis of esprit algorithm for smart antenna system," *International Journal of Communication Networks and Security*, vol. 1, pp. 34–37, 2012.
- [204] G. Tsoulos, "Smart Antennas for Mobile Communication Systems: Benefits and Challenges", *IEE Electron. Commun Eng. Journal*, 11(4.2): pp. 84-94, Apr. 1999.
- [205] J. Capon, "High-resolution frequency-wave number spectrum analysis, *IEEE Proc*, 57, pp. 1408-1418, 1969.
- [206] R. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143830.
- [207] L. C. Godara, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 7, pp. 1031-1060, July 1997, doi: 10.1109/5.611107.
- [210] <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>, accesat la data de 14.05.2023.
- [211] <http://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=783#7> accesat la data de 13.06.2023
- [213] <https://spectrum5g.radio.pub.ro> , accesat la data de 28.04.2023
- [214] A. Martian, "Evaluation of Spectrum Occupancy in Urban and Rural Environments of Romania", in *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique*, no. 1, pp 87-96, Jan.-Mar. 2014.
- [215] A. Martian, F. Lucian Chiper, O. Mohammed Khodayer Al-Dulaimi, M. Jalal Ahmad Al Sammarraie, C. Vladeanu and I. Marghescu, "Comparative Analysis of Software Defined Radio Platforms for Spectrum Sensing Applications," 2020 13th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 2020, pp. 369-374, doi: 10.1109/COMM48946.2020.9142024.
- [221] H. T. Friis, "Noise Figures of Radio Receivers," in *Proceedings of the IRE*, vol. 32, no. 7, pp. 419-422, July 1944.
- [222] Ettus Research USRP N210 SDR platform, available online at: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>, accessed in Mar. 2020.
- [223] Ettus Research WBX RF daughterboard, available online at: <https://www.ettus.com/all-products/wbx/>, accessed in Mar. 2020.
- [224] Ettus Research USRP X310 SDR platform, available online at: <https://www.ettus.com/all-products/x310-kit/>, accessed in Mar. 2020.
- [225] Ettus Research CBX RF daughterboard, available online at: <https://www.ettus.com/all-products/cbx/>, accessed in Mar. 2020.
- [226] Ettus Research USRP B200-mini SDR platform, available online at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/>, accessed in Mar. 2020.
- [227] Great Scott Gadgets HackRF One SDR platform, available online at: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>, accessed in Mar. 2020.

- [228] 5G Strategy for Romania, available at: http://www.ancom.org.ro/uploads/links_files/Strategia_5G_pentru_Romania.pdf, accessed in Mar. 2020.
- [229] E. Dobre, A. Marțian and C. Vlădeanu, "USRP-based experimental platform for energy detection in cognitive radio systems," 2016 International Conference on Communications (COMM), Bucharest, 2016, pp. 185-188.
- [230] Cyberwall. Available online: <http://cyberwall.ro> (accessed on 12 January 2022).
- [231] DronEnd Research Project. Available online: <http://dronend.ro> (accessed on 12 January 2022).
- [232] Martian, A.; Chiper, F.-L.; Craciunescu, R.; Vladeanu, C.; Fratu, O.; Marghescu, I. RF Based UAV Detection and Defense Systems: Survey and a Novel Solution. In Proceedings of the 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Bucharest, 16-18 June, 2021; pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527871>.
- [233] F. -L. Chiper, A. Martian, D. -I. Muscalu, C. Vladeanu and I. Marghescu, "Aerial Drone Defense System based on Software Defined Radio Platforms," 2022 14th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/COMM54429.2022.9817314.
- [234] Omer Mohammed Khodayer Al-Dulaimi, Florin-Lucian Chiper, Călin Vladeanu and Alexandru Martian Triple-Threshold Energy Detection With Adaptive Intermediate Threshold for Cooperative Spectrum Sensing to 2022 14th International Conference on Communications (COMM) doi: 10.1109/COMM54429.2022.9817314.
- [235] Vlădeanu, C.; Nastase, C.; Martian, A. Energy Detection Algorithm for Spectrum Sensing Using Three Consecutive Sensing Events. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2016, 5, 284–287.
- [236] Martian, A.; Al Sammarraie, M.J.A.; Vlădeanu, C.; Popescu, D.C. Three-Event Energy Detection with Adaptive Threshold for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems. *Sensors* 2020, 20, 3614. <https://doi.org/10.3390/s20133614>.
- [237] Urkowitz, H. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals. *Proc. IEEE* 1967, 55, 523–531.
- [238] Ettus Research USRP X310. Available online: <https://www.ettus.com/all-products/x310-kit/> (accessed on 12 January 2022).
- [239] Ettus Research Twin-RX RF Daughterboard. Available online: <https://www.ettus.com/all-products/twinrx/> (accessed on 12 January 2022).
- [240] DJI Mavic Air Drone. Available online: <https://www.dji.com/mavic-air> (accessed on 12 January 2022).
- [241] DJI Phantom 4 Pro v2.0 Drone. Available online: <https://store.dji.com/product/phantom-4-pro-v2/> (accessed on 12 January 2022).
- [242] DJI Mini 2 Drone. Available online: <https://store.dji.com/product/mini-2> (accessed on 12 January 2022).

- [243] Mini-Circuits ZN4PD1-63HP-S+ 4 Ways DC Pass Power Splitter. Available online: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZN4PD1-63HP-S%2B> (accessed on 12 January 2022).
- [244] Ettus Research VERT2450 Antenna. Available online: <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/> (accessed on 12 January 2022).
- [245] Ettus Research B200mini SDR Platform. Available online: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/> (accessed on 12 January 2022).
- [246] Mini-Circuits ZHL-2W-63-S+ Power Amplifier. Available online: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZHL-2W-63-S%2B> (accessed on 12 January 2022).
- [247] Ubiquiti UMA-D Antenna. Available online: https://dl.ubnt.com/datasheets/unifi/UMA-D_DS.pdf (accessed on 12 January 2022).
- [248] Ettus Research USRP E312 SDR platform. Available online: <https://www.ettus.com/allproducts/usrp-e312/> (accessed on 02 April 2022).
- [249] Ettus Research VERT2450 antenna. Available online: <https://www.ettus.com/allproducts/vert2450/> (accessed on 22 March 2022).
- [250] DJI Mavic Air Drone. Available online: <https://www.dji.com/mavic-air> (accessed on 22 March 2022).