

Liviu GĂINĂ

Mihai-Alin MECLEA



Radiolocație și Război Electronic

Ghid de pregătire al examenului de licență

Editura Academiei Forțelor Aeriene „Henri Coandă” Brașov
2024

Editura Academiei Forțelor Aeriene "Henri Coandă"

Str. Mihai Viteazul, nr. 160, Brașov, 500183

Telefon: 0268/423 421 int. 338

e-mail: editura@afahc.ro

***Editură cu prestigiu recunoscut A2 - C.N.A.T.D.C.U. - în domeniile
"Științe sociale", "Științe militare, informații și ordine publică"***

Radiolocație și Război Electronic:

Ghid de pregătire a examenului de licență-

Liviu GĂINĂ, Mihai-Alin MECLEA

Referenți științifici:

Dr.ing. Constantin STRÎMBU

Academia Forțelor Aeriene „Henri Coandă”

Dr.ing. Laurian GHERMAN

Academia Forțelor Aeriene „Henri Coandă”

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

GĂINĂ, LIVIU

Radiolocație și război electronic : ghid de pregătire a examenului de licență / Liviu Găină, Mihai-Alin Meclea. - Brașov : Editura Academiei Forțelor Aeriene "Henri Coandă", 2024

Conține bibliografie

ISBN 978-630-6507-26-9

I. Meclea, Mihai-Alin

621.39

Nr. comandă: 202/2024

Tiraj: 45 exemplare

Viza: 0574/dec 2024

Cuvânt înainte

Lucrarea de față, dedicată în special studenților Academiei Forțelor Aeriene „Henri Coandă” de la toate armele și specializările tehnice, își propune să ofere un suport complet pentru înțelegerea și aprofundarea conceptelor fundamentale din domeniul radiolocației și războiului electronic.

Concepută ca un ghid de pregătire pentru examenul de licență, lucrarea integrează informații teoretice esențiale cu aplicații practice și exemple concrete, urmărind structura examenului și acoperind integral tematica acestuia. Parcurgerea conținutului va permite studenților să-și consolideze cunoștințele despre principiile radiolocației, sistemele și stațiile de radiolocație, protecția împotriva bruiajului, precum și despre tehnicile de război electronic și contramăsurile electronice.

Mai mult decât o simplă compilație de informații, această lucrare oferă o perspectivă integrată asupra domeniului, evidențiind interconexiunile dintre radiolocație și războiul electronic în contextul militar modern. Sperăm că acest ghid va fi un instrument util de autoevaluare și de pregătire sistematică a studenților pentru examenul de licență și le va oferi o bază solidă pentru viitoarea lor carieră în domeniul apărării naționale.

Mulțumim celor ce ne-au sprijinit în realizarea prezentei lucrări și celor care vor identifica și vor semnala eventualele greșeli de formă și conținut.

Autorii

- Pagină albă -

CUPRINS

GLOSAR termeni de specialitate	7
1 INTRODUCERE – noțiuni generale	15
1.1 Importanța radiolocației și războiului electronic în contextul militar modern	15
1.2 Structura și obiectivele examenului de licență	16
1.3 Sfaturi generale de pregătire (planificare, managementul timpului, tehnici de învățare).....	17
2 RADIOLOCAȚIE.....	21
2.1 Principiile Radiolocației	21
2.1.1 Definirea și scopul radiolocației	21
2.1.2 Misiunile radiolocației.....	22
2.1.3 Principii fundamentale: reflexia undelor, propagarea rectilinie, interferența undelor electromagnetice.	23
2.1.4 Propagarea undelor electromagnetice în radiolocație	26
2.1.5 Ecuația Radiolocației	28
2.1.6 Determinarea poziției obiectelor în spațiu	33
2.2 Sisteme și Stații de Radiolocație.....	39
2.2.1 Parametrii tehnici și tactici.....	39
2.2.2 Stații de radiolocație în impuls.....	41
2.2.3 Radiolocația cu undă continuă (CW – Continuous Wave)	47
2.2.4 Radiolocația monoimpuls.....	51
2.2.5 Sisteme moderne de radiolocație	56
2.3 Protecția împotriva Bruiajului	59
2.3.1 Introducere în bruiaj și contramăsuri.....	59
2.3.2 Efectul Doppler și selecția țintelor mobile	61
2.3.3 Metode de protecție împotriva bruiajului activ.....	65
2.4 Aplicații teoretico-practice	67
2.4.1 Probleme de calcul și aplicații	67
2.4.2 Exemple aplicative.....	69

3	RĂZBOI ELECTRONIC	73
3.1	Introducere în Războiul Electronic	73
3.1.1	Definiții și domenii de aplicare	73
3.1.2	Domenii de aplicare:.....	74
3.2	Tehnici de bruiaj și protecție	75
3.2.1	Contramăsuri Electronice (ECM)	75
3.2.2	Contra-Contramăsuri Electronice (ECCM)	77
3.3	Integrarea Războiului Electronic și Radiolocației	81
3.3.1	Supravegherea electronică	81
3.3.2	Aplicații militare	85
4	Pregătirea pentru Examenul scris și Prezentarea lucrării de licență.....	87
4.1	Structura examenului	87
4.2	Sfaturi pentru o prezentare de succes	88
	BIBLIOGRAFIE	91

GLOSAR termeni de specialitate

Absorbție: Procesul prin care energia undelor electromagnetice este atenuată la trecerea printr-un mediu, datorită conversiei energiei electromagnetice în alte forme de energie, cum ar fi căldura. Absorbția depinde de proprietățile materialului, de frecvența undelor și de grosimea mediului traversat. De exemplu, apa absoarbe puternic undele radio cu frecvențe înalte, limitând utilizarea acestora în radiolocația submarină.

Altimetru radar: Instrument care măsoară altitudinea unei aeronave față de sol utilizând unde radio. Acesta emite unde radio în jos și măsoară timpul necesar pentru ca undele reflectate de sol să se întoarcă la receptor. Cunoscând viteza de propagare a undelor radio, se poate calcula distanța până la sol și, implicit, altitudinea aeronavei.

Amplitudine: Valoarea maximă a unei unde electromagnetice, măsurată de la nivelul de referință la vârful undei. Amplitudinea este direct proporțională cu intensitatea undei și se măsoară în unități de câmp electric (V/m) sau câmp magnetic (A/m).

Antenă: Dispozitiv care emite sau recepționează unde radio. Antenele convertesc semnalele electrice în unde electromagnetice și invers. Există o varietate de tipuri de antene, fiecare cu caracteristici specifice de radiație și recepție.

Apertura sintetică (SAR): Tehnică radar care utilizează mișcarea antenei pentru a crea imagini de înaltă rezoluție. Prin procesarea semnalelor recepționate de antenă în diferite poziții, se poate obține o rezoluție echivalentă cu cea a unei antene mult mai mari. SAR este utilizată în diverse aplicații, cum ar fi cartografierea terenului, monitorizarea culturilor agricole și detectarea schimbărilor în mediul înconjurător.

Azimet: Unghiul măsurat în plan orizontal, în sensul acelor de ceasornic, între direcția nord și proiecția unei linii pe planul orizontal. Azimetul este utilizat în radiolocație pentru a indica direcția unei ținte în plan orizontal.

Bandă de frecvență: Interval de frecvențe alocate unui anumit scop, cum ar fi radiocomunicații, televiziune, radiolocație etc. Benzile de frecvență sunt reglementate de autorități naționale și internaționale pentru a preveni interferențele între diferite servicii.

Bruiaj: Semnal emis intenționat pentru a perturba funcționarea unui sistem radar. Bruiajul poate fi activ (emisia de semnale puternice care maschează semnalul util) sau pasiv (utilizarea unor materiale care reflectă sau absorb undele radar).

Clutter: Ecouri radar nedorite provenite de la sol, vegetație, precipitații, valuri etc. Clutter-ul poate masca țintele de interes și poate îngreuna procesarea semnalelor radar. Se utilizează diverse tehnici pentru a reduce efectul clutter-ului, cum ar fi filtrarea Doppler și procesarea adaptivă.

Coordonate polare: Sistem de coordonate care utilizează distanța radială (r) și unghiul polar (θ) față de o origine pentru a defini poziția unui punct în plan.

Contramăsuri electronice (ECCM): Tehnici utilizate pentru a proteja sistemele electronice de bruiaj. Acestea includ utilizarea unor frecvențe variabile, a unor coduri de răspândire a spectrului, a unor antene directive și a unor algoritmi de procesare a semnalului care pot discrimina între semnalul util și bruiaj.

Câștigul antenei: Măsură a capacității antenei de a concentra energia radiată într-o anumită direcție. Câștigul antenei este exprimat în decibeli (dB) și este comparat cu câștigul unei antene izotrope (care radiază uniform în toate direcțiile).

Decibel (dB): Unitate logaritmică de măsură a raportului dintre două puteri. Decibelul este utilizat pe scară largă în radiolocație și comunicații pentru a exprima rapoarte de putere, câștigul antenei, atenuarea semnalului etc.

Decepție/decoy/momeală: Tehnică de război electronic care induce în eroare inamicul prin crearea unor ținte false sau prin mascarea țintelor reale. Decepția poate fi realizată prin diverse metode, cum ar fi utilizarea unor reflectoare radar, a unor generatoare de semnale false sau a unor aeronave stealth.

Detectare: Procesul de identificare a prezenței unui obiect, în radiolocație, detectarea se face prin analiza semnalului recepționat de la țintă.

Difracție: Fenomenul de curbare a undelor în jurul obstacolelor. Difracția este mai pronunțată atunci când dimensiunea obstacolului este comparabilă cu lungimea de undă a unde. În radiolocație, difracția poate permite detectarea țintelor aflate în spatele unor obstacole.

Discriminare: Capacitatea de a distinge între două ținte apropiate. Discriminarea depinde de rezoluția radarului, care este influențată de lățimea de bandă a semnalului și de lățimea fasciculului antenei.

Distanță de descoperire: Distanța maximă la care un radar poate detecta o țintă.

Distanța de descoperire este influențată de o serie de factori, inclusiv puterea de emisie, sensibilitatea receptorului, suprafața efectivă de reflexie (SER) a țintei și condițiile de propagare.

Diversitate de frecvență: Tehnică de transmitere a aceluiași semnal pe mai multe frecvențe. Diversitatea de frecvență este utilizată pentru a reduce efectul fadingului, care este cauzat de propagarea multipath.

Doppler, efect: Schimbarea aparentă a frecvenței unei unde datorită mișcării relative dintre sursă și receptor. În radiolocație, efectul Doppler este utilizat pentru a măsura viteza radială a țintelor.

Durată a impulsului: Timpul cât un impuls radar este emis. Durata impulsului influențează rezoluția în distanță a radarului. Un impuls mai scurt permite o rezoluție mai bună, dar reduce energia transmisă și implicit distanța de descoperire.

Ecuția radiolocației: Formulă matematică care descrie relația dintre puterea transmisă, puterea recepționată și parametrii radarului și ai țintei. Ecuția radiolocației este utilizată pentru a calcula distanța de descoperire și pentru a evalua performanța radarului.

Elevație: Unghiul dintre o linie/direcție și planul orizontal. În radiolocație, elevația este utilizată pentru a indica înălțimea unei ținte față de orizont.

Emitător: Dispozitiv care generează unde radio. Emitătorul este o componentă esențială a unui sistem radar, fiind responsabil de generarea semnalului radar.

Energie electromagnetică: Energie propagată sub formă de unde electromagnetice. Undele electromagnetice sunt generate de oscilația sarcinilor electrice și se propagă cu viteza luminii.

Fascicul/ CD – caracteristică de directivitate: Concentrare a energiei radiate de o antenă într-o anumită direcție. Lățimea fasciculului influențează rezoluția unghiulară a radarului.

Filtru: Dispozitiv care selectează anumite frecvențe dintr-un semnal. Filtrele sunt utilizate în radiolocație pentru a elimina zgomotul și interferențele și pentru a extrage informațiile utile din semnalul recepționat.

Frecvență: Numărul de oscilații ale unei unde pe secundă. Frecvența este măsurată în Hertz (Hz). În radiolocație, frecvența de operare influențează rezoluția, distanța de descoperire și atenuarea semnalului.

Frecvență Doppler: Diferența dintre frecvența emisă și frecvența recepționată datorită efectului Doppler. Frecvența Doppler este proporțională cu viteza radială a țintei.

Frecvența de repetiție a impulsurilor (PRF): Numărul de impulsuri transmise pe secundă de un radar. PRF influențează distanța maximă neambiguă de măsurare și viteza Doppler maximă neambiguă.

Ghidare: Dirijarea unui proiectil către o țintă utilizând unde radio. Sistemele de ghidare radar sunt utilizate în diverse aplicații militare, cum ar fi rachetele ghidate și bombele inteligente.

Hertz (Hz): Unitate de măsură a frecvenței, egală cu o oscilație pe secundă.

Ionosferă: Strat din atmosfera superioară care reflectă undele radio. Ionosfera este utilizată în radiocomunicații pentru a transmite semnale la distanțe mari. În radiolocație, reflexia în ionosferă poate fi utilizată pentru a detecta ținte aflate la distanțe mari (radare cu vedere peste orizont).

Interferență: Suprapunerea a două sau mai multe unde. Interferența poate fi constructivă (când undele sunt în fază) sau distructivă (când undele sunt în antifază).

Localizare: Determinarea poziției unui obiect în spațiu. În radiolocație, localizarea se face prin determinarea distanței, azimutului și elevației țintei.

Lob lateral: Maxim secundar în diagrama de radiație a unei antene. Lobii laterali pot duce la erori de detecție și localizare a țintelor.

Lungime de undă: Distanța dintre două puncte consecutive ale unei unde aflate în aceeași fază. Lungimea de undă este invers proporțională cu frecvența.

Modulație: Procesul de modificare a unui semnal purtător pentru a transmite informații. În radiolocație, se utilizează diverse tipuri de modulație, cum ar fi modulația în impulsuri și modulația în frecvență.

Monoimpuls: Tehnică radar care utilizează un singur impuls pentru a determina coordonatele unghiulare ale unei ținte; aceasta se bazează pe compararea semnalelor recepționate de două sau mai multe antene.

Multipath: Propagarea unui semnal radio pe mai multe căi. Multipath-ul poate duce la fading și la erori de detecție și localizare.

Navigație: Ghidarea unui vehicul utilizând unde radio. Sistemele de navigație radar sunt utilizate în aviație, navigație maritimă și ghidarea autovehiculelor.

Orizont radar: Distanța maximă la care un radar poate detecta o țintă la o anumită altitudine, limitată de curbura Pământului. Orizontul radar poate fi extins prin utilizarea unor radare cu vedere peste orizont.

Polarizare: Orientarea câmpului electric al unei unde electromagnetice. Polarizarea poate fi liniară, circulară sau eliptică. În radiolocație, polarizarea poate fi utilizată pentru a discrimina între diferite tipuri de ținte.

Puterea de vârf: Valoarea maximă a puterii unui semnal radar. Puterea de vârf influențează distanța de descoperire a radarului.

Radar: Sistem care utilizează unde radio pentru a detecta și localiza obiecte. Radarele sunt utilizate într-o varietate de aplicații, de la apărare și securitate națională la aviație civilă, navigație și meteorologie.

Radar bistatic: Radar cu emițătorul și receptorul situate în locații diferite. Radarele bistatice oferă o serie de avantaje față de radarele monostatice, cum ar fi o mai bună detectare a țintelor stealth.

Radar Doppler: Radar care utilizează efectul Doppler pentru a măsura viteza radială a țintelor. Radarele Doppler sunt utilizate pentru a detecta țintele mobile și pentru a filtra clutter-ul.

Radar multistatic: Radar cu multiple emițătoare și receptoare. Radarele multistatice oferă o mai bună acoperire și o mai bună rezistență la bruiaj.

Radar pasiv: Radar care detectează țintele prin interceptarea emisiilor electromagnetice ale acestora. Radarele pasive sunt dificil de detectat și pot fi utilizate pentru a localiza emițătoare radar inamice.

Radar primar: Radar care detectează țintele prin reflexia undelor radio, fără voința țintei. Majoritatea radarelor sunt radare primare.

Radar secundar: Radar care interoghează transponderele țintelor pentru a obține informații suplimentare, cum ar fi identificarea și altitudinea. Radarele secundare sunt utilizate în controlul traficului aerian.

Radiolocație: Tehnologie de detectare și localizare a obiectelor utilizând unde radio. Radiolocația este utilizată într-o varietate de aplicații, de la apărare și securitate națională la aviație civilă, navigație și meteorologie.

Raport semnal-zgomot (SNR – signal noise ratio): Raportul dintre puterea semnalului util și puterea zgomotului. SNR este un parametru important în radiolocație, deoarece influențează capacitatea de detecție a țintelor.

Receptor: Dispozitiv care recepționează și procesează unde radio. Receptorul este o componentă esențială a unui sistem radar, fiind responsabil de amplificarea, filtrarea și demodularea semnalului recepționat.

Reflexie: Fenomenul de întoarcere a unei unde la suprafața de separație dintre două medii. Reflexia este principiul fundamental pe care se bazează radiolocația.

Refracție: Fenomenul de schimbare a direcției de propagare a unei unde la trecerea dintr-un mediu în altul. Refracția este cauzată de schimbarea vitezei de propagare a undei și determină reconsiderarea Razei Pământului la o valoare efectivă egală cu $4/3$ din Raza fizică a acestuia.

Rezoluție: Capacitatea de a distinge între două ținte apropiate. Rezoluția poate fi unghiulară sau în distanță.

Rezoluție unghiulară: Capacitatea de a distinge între două ținte aflate la unghiuri apropiate. Rezoluția unghiulară este influențată de lățimea fasciculului antenei.

Rezoluție în distanță: Capacitatea de a distinge între două ținte aflate la distanțe apropiate. Rezoluția în distanță este influențată de lățimea impulsului de sondaj.

Secțiune transversală radar/ Suprafața efectivă de reflexie – SER (RCS – Radar Cross Section): Măsură a capacității unui obiect de a reflecta undele radar. RCS este exprimată în metri pătrați și depinde de o serie de factori, inclusiv forma, dimensiunea, materialul și orientarea obiectului.

Semnal: Variație a unei mărimi fizice care poartă informații. În radiolocație, semnalul este reprezentat de undele radio reflectate de țintă.

Stealth: Tehnologie care reduce vizibilitatea unui obiect la radar. Stealth-ul se bazează pe reducerea secțiunii transversale radar a obiectului prin utilizarea unor forme speciale, a unor materiale absorbante de radar și a unor acoperiri speciale.

Supraveghere: Monitorizarea continuă a unei zone pentru a detecta ținte. Supravegherea radar este utilizată în diverse aplicații, cum ar fi controlul traficului aerian, apărarea aeriană și monitorizarea frontierelor.

Telemetrie: Măsurarea distanței față de un obiect. În radiolocație, telemetria se realizează prin măsurarea timpului necesar undelor radio pentru a parcurge distanța până la țintă și înapoi.

- Timp de zbor:** Timpul necesar unei unde radio pentru a parcurge distanța până la țintă și înapoi la radar. Timpul de zbor este utilizat pentru a calcula distanța până la țintă.
- Transmițător:** Dispozitiv care emite unde radio. Transmițătorul generează semnalul radar și îl amplifică la o putere suficientă pentru a fi emis de antenă.
- Transponder:** Dispozitiv care emite un semnal ca răspuns la un semnal de interogare. Transponderele sunt utilizate în aviație pentru a identifica aeronavele și a furniza informații despre altitudine și viteză.
- Unde electromagnetice:** Perturbații ale câmpului electromagnetic care se propagă cu viteza luminii. Undele electromagnetice sunt caracterizate de frecvență, lungime de undă și polarizare.
- Unde radio:** Unde electromagnetice cu frecvențe între 3 kHz și 300 GHz. Undele radio sunt utilizate în radiocomunicații, radiolocație, televiziune etc.
- Viteză Doppler:** Viteza radială a unei ținte, măsurată cu ajutorul efectului Doppler. Viteza Doppler este proporțională cu diferența dintre frecvența emisă și frecvența recepționată.
- Viteză radială:** Componenta vitezei unei ținte de-a lungul liniei de vizibilitate a radarului. Viteza radială este pozitivă dacă ținta se apropie de radar și negativă dacă ținta se îndepărtează.
- Zgomot:** Semnale nedorite care perturbă recepția semnalului util. Zgomotul poate fi generat de diverse surse, cum ar fi componentele electronice ale radarului, atmosfera sau interferențele de la alte emițătoare.
- Zgomot termic:** Zgomot generat de agitația termică a electronilor în componentele electronice ale radarului. Zgomotul termic este un factor limitativ în sensibilitatea receptorului radar.
- Zonă de acoperire:** Zona în care un radar poate detecta ținte. Zona de acoperire este determinată de caracteristicile antenei, de puterea de emisie a radarului și de condițiile de propagare.

1 INTRODUCERE – noțiuni generale

1.1 Importanța radiolocației și războiului electronic în contextul militar modern

Radiolocația și războiul electronic s-au impus ca elemente definitorii ale peisajului militar contemporan, influențând în mod decisiv strategiile, tacticile și operațiunile militare. Aceste tehnologii de vârf joacă un rol esențial în asigurarea supravegherii, a detectării țintelor, a coordonării forțelor și a protecției împotriva amenințărilor, contribuind la menținerea unui avantaj strategic pe câmpul de luptă modern.

Radiolocația, prin capacitatea sa de a detecta și localiza obiecte la distanță utilizând undele radio, oferă o perspectivă clară asupra spațiului aerian și maritim. Această tehnologie permite identificarea cu precizie a țintelor aeriene și de la sol, facilitând ghidarea rachetelor, coordonarea operațiunilor militare și reacția rapidă la amenințări. Sistemele radar moderne furnizează informații detaliate despre poziția, viteza și direcția țintelor, oferind forțelor militare o conștientizare situațională sporită și o capacitate superioară de a lua decizii informate.

Războiul electronic, la rândul său, se concentrează pe exploatarea spectrului electromagnetic pentru a afecta, neutraliza sau utiliza în avantaj propriu sistemele electronice ale inamicului. Aceasta include bruiatul sistemelor radar și de comunicații, interceptarea și analizarea semnalelor inamice, precum și protejarea propriilor sisteme electronice împotriva atacurilor. Prin utilizarea tehnicilor de război electronic, forțele militare pot degrada capacitățile de luptă ale adversarului, își pot proteja propriile sisteme și pot obține un avantaj informațional esențial. Contextul militar modern se caracterizează printr-o dependență crescândă de tehnologie, iar radiolocația și războiul electronic se află în centrul acestei evoluții. Importanța lor este amplificată de proliferarea tehnologiilor avansate, de amenințările asimetrice reprezentate de actorii non-statali și de complexitatea crescândă a mediului operațional. Teatrele de operațiuni moderne sunt caracterizate de un mediu electromagnetic aglomerat și contestat, ceea ce face esențială capacitatea de a opera eficient în condiții de bruiat și interferență.

Radiolocația și războiul electronic au un impact semnificativ asupra operațiunilor militare, contribuind la supravegherea și avertizarea timpurie, la controlul spațiului aerian, la ghidarea armelor, la apărarea antiaeriană, la neutralizarea amenințărilor electronice și la protecția forțelor proprii. Sistemele radar de supraveghere oferă o imagine cuprinzătoare a spațiului aerian, permițând detectarea timpurie a amenințărilor și avertizarea forțelor. Radiolocația este esențială pentru identificarea și interceptarea aeronavelor neautorizate, protejând spațiul aerian național și contribuind la menținerea securității frontierelor. În domeniul *apărării antiaeriene*, radiolocația joacă un rol esențial în detectarea și urmărirea rachetelor balistice, permițând activarea sistemelor de interceptare și protejarea teritoriului național. De asemenea, războiul electronic permite bruiatul sistemelor radar și de comunicații ale inamicului, limitându-i capacitatea de a desfășura operațiuni eficiente și protejând forțele proprii de atacuri.

Astfel, radiolocația și războiul electronic sunt instrumente indispensabile în arsenalul militar modern. Capacitatea de a detecta, identifica și neutraliza amenințările într-un mediu electromagnetic complex este esențială pentru succesul operațiunilor militare și pentru asigurarea securității naționale. Pe măsură ce tehnologia continuă să evolueze, importanța acestor domenii va crește și mai mult, modelând viitorul războiului și influențând strategiile militare ale statelor.

1.2 Structura și obiectivele examenului de licență

Examenul de licență la specializarea Radiolocație și Război Electronic are ca obiectiv principal evaluarea competențelor și cunoștințelor acumulate de studenți pe parcursul studiilor, urmărind să verifice înțelegerea profundă a conceptelor fundamentale, capacitatea de aplicare a acestora în rezolvarea problemelor practice și abilitatea de a integra informațiile din cele două domenii cheie ale specializării.

Structura examenului este concepută pentru a acoperi atât aspectele teoretice, cât și cele practice ale radiolocației și războiului electronic. Prima parte a examenului se concentrează pe principiile radiolocației, inclusiv reflexia undelor, propagarea rectilinie, interferența undelor electromagnetice și ecuația radiolocației. Studenții vor trebui să demonstreze cunoștințe solide despre sistemele și stațiile de radiolocație, de la stațiile de radiolocație în impuls la

radiolocația monoimpuls și sistemele moderne de radiolocație, precum radarul cu vedere peste orizont și radarul cognitiv. De asemenea, aceștia vor fi evaluați asupra capacității de a aplica metode de protecție împotriva bruiajului, inclusiv înțelegerea categoriilor de bruiaj, a efectului Doppler și a tehnicilor de selecție a țintelor mobile.

Cea de-a doua parte a examenului vizează cunoștințele studenților despre războiul electronic, începând cu definițiile și domeniile de aplicare și continuând cu categoriile de operațiuni (ECM, ECCM, ESM). Se va pune accent pe înțelegerea tehnicilor de bruiaj activ și pasiv, precum și pe capacitatea de a aplica contramăsuri electronice (ECCM). Un aspect important al acestuia îl reprezintă integrarea războiului electronic cu radiolocația, inclusiv supravegherea electromagnetică și aplicațiile militare ale acestora.

În examen se vor combina întrebări teoretice, care verifică cunoștințele conceptuale din ambele domenii, cu probleme practice, care solicită aplicarea cunoștințelor în rezolvarea situațiilor concrete. De asemenea, un aspect al examinării în reprezintă evaluarea capacității de analiză și sinteză a informațiilor, precum și abilitatea de a formula argumente. Prin această abordare complexă, examenul de licență urmărește să evalueze nu doar cunoștințele acumulate, ci și capacitatea studenților de a gândi critic, de a integra informațiile și de a le aplica în contextul militar modern.

1.3 Sfaturi generale de pregătire (planificare, managementul timpului, tehnici de învățare)

Atingerea unui nivel optim de pregătire pentru examenul de licență presupune o abordare structurată și conștiincioasă, bazată pe planificarea riguroasă a studiului, gestionarea eficientă a timpului și implementarea unor tehnici de învățare adecvate. Aceste elemente se întrepătrund și se potențează reciproc, contribuind la asimilarea temeinică a cunoștințelor și la dezvoltarea abilităților necesare pentru o performanță de succes la examen.

Planificarea riguroasă constituie un prim pas esențial în procesul de pregătire. Aceasta implică definirea clară a obiectivelor pe care studenții doresc să le atingă, pe termen lung și pe termen scurt. Obiectivele trebuie să fie realiste și măsurabile, pentru a putea monitoriza progresul și a menține motivația. Elaborarea

unui program de studiu personalizat, care să țină cont de disponibilitatea individuală și de volumul de informații de parcurs, este esențială pentru a acoperi întreaga materie într-un mod organizat și eficient. Programul trebuie să fie flexibil și adaptabil, permițând ajustări în funcție de nevoi și de progresul înregistrat. Organizarea materialelor de studiu într-un mod logic și accesibil, prin utilizarea unor metode de clasificare și arhivare, facilitează accesul rapid la informații și contribuie la o învățare mai eficientă. De asemenea, explorarea unor resurse suplimentare, precum cărți de specialitate, articole științifice, tutoriale online sau simulări de examen, poate completa informațiile din materialele de curs și poate oferi o perspectivă mai largă asupra subiectelor abordate.

Managementul eficient al timpului este o componentă cheie a procesului de pregătire. Studenții trebuie să învețe să își prioritizeze sarcinile, acordând prioritate celor mai importante și alocând timp suficient pentru rezolvarea lor. Eliminarea distragerilor și crearea unui mediu de studiu adecvat sunt esențiale pentru menținerea concentrării și a productivității. Utilizarea tehnicilor de time management, precum **tehnica Pomodoro și/sau matricea Eisenhower**, poate ajuta la organizarea timpului și la creșterea eficienței studiului. De asemenea, este important să se acorde importanță pauzelor regulate, pentru a permite minții să se odihnească și a preveni epuizarea.

Implementarea unor tehnici de învățare eficiente este esențială pentru asimilarea și retenția informațiilor. Învățarea activă, prin realizarea de rezumate, scheme, fișe de noțiuni sau explicarea conceptelor cu propriile cuvinte, stimulează înțelegerea profundă a materialului și favorizează memorarea pe termen lung. Repetiția periodică a noțiunilor învățate consolidează cunoștințele și ajută la fixarea lor în memorie. Testarea cunoștințelor prin intermediul testelor și simulărilor de examen permite evaluarea progresului, identificarea punctelor slabe și adaptarea strategiei de învățare în consecință. Învățarea în grup poate fi benefică, oferind oportunitatea de a interacționa cu alți colegi, de a discuta diverse aspecte ale materiei și de a vă motiva reciproc. Utilizarea reprezentărilor vizuale, cum ar fi imagini, diagrame sau grafice, facilitează înțelegerea conceptelor complexe și stimulează memoria vizuală.

Așadar, o pregătire eficientă pentru examenul de licență implică o combinație armonioasă de planificare riguroasă, management eficient al timpului și implementarea unor tehnici de învățare adecvate. Prin adoptarea unei abordări structurate și disciplinate, studenții își pot maximiza șansele de succes la examen și își pot consolida baza de cunoștințe necesară pentru viitoarea voastră carieră în domeniul radiolocației și războiului electronic.

2 RADIOLOCAȚIE

2.1 Principiile Radiolocației

2.1.1 Definirea și scopul radiolocației

Radiolocația se definește ca o tehnologie ce exploatează proprietățile undelor radio pentru a detecta și localiza obiecte situate la distanță, indiferent de condițiile de vizibilitate. Acest proces se bazează pe principiul fundamental al reflexiei undelor electromagnetice: o undă radio emisă de un transmițător este reflectată de un obiect aflat în calea sa, iar o parte din energia undei reflectate este captată de un receptor. Prin analiza atentă a semnalului recepționat, se pot extrage informații valoroase despre obiectul care a generat reflexia, precum distanța față de acesta, viteza sa, direcția de deplasare și chiar dimensiunile aproximative.

Scopul primordial al radiolocației este de a furniza informații precise despre obiecte situate în afara razei vizuale directe, extinzând astfel capacitatea de percepție a mediului înconjurător. Această capacitate excepțională își găsește aplicabilitate într-o gamă largă de domenii, de la cel militar la cel civil, contribuind la siguranța, eficiența și progresul în diverse sectoare de activitate.

Termenul "radar" este un acronim provenit din limba engleză, format din inițialele expresiei "**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging", care se traduce prin "detectie și telemetrie radio". Acest acronim a fost inventat în 1940 de către Marina Statelor Unite ale Americii, în contextul celui de-al Doilea Război Mondial, când tehnologia radar a început să fie utilizată pe scară largă pentru detectarea aeronavelor și navelor inamice. Cu timpul, termenul "radar" a fost adoptat și de alte țări, devenind un termen internațional pentru a desemna această tehnologie. Astăzi, "radar" este considerat un substantiv comun și este utilizat în majoritatea limbilor lumii. Este interesant de menționat că, deși acronimul provine din limba engleză, termenul "radar" se pronunță la fel în majoritatea limbilor, inclusiv în română.

În domeniul militar, radiolocația joacă un rol important în asigurarea apărării, permițând detectarea și urmărirea cu precizie a aeronavelor, rachetelor, navelor și a altor potențiale ținte inamice. Datele obținute prin intermediul

sistemelor radar sunt esențiale pentru ghidarea sistemelor de apărare antiaeriană, coordonarea operațiunilor militare și asigurarea unei supravegheri eficiente a spațiului aerian și maritim. În aviația civilă, radiolocația este indispensabilă pentru controlul traficului aerian, ghidarea aeronavelor în condiții de vizibilitate redusă și prevenirea coliziunilor, contribuind la siguranța și fluența transportului aerian. De asemenea, în navigația maritimă, radiolocația permite navelor să navigheze în siguranță, să detecteze obstacole, să evite coliziunile și să se orienteze cu precizie pe mare, indiferent de condițiile meteorologice. Meteorologia beneficiază de aportul radiolocației prin utilizarea sistemelor radar specializate pentru detectarea precipitațiilor, monitorizarea furtunilor și prognozarea fenomenelor meteo severe, contribuind la avertizarea populației și la prevenirea dezastrelor naturale. Pe lângă aceste domenii, radiolocația își găsește aplicații și în diverse alte sectoare, precum geologia, arheologia, monitorizarea mediului și controlul vitezei autovehiculelor, demonstrând versatilitatea și importanța sa în societatea modernă.

Așadar, radiolocația reprezintă o tehnologie esențială pentru obținerea de informații despre mediul înconjurător și pentru luarea deciziilor informate într-o varietate de situații. Capacitatea sa de a "vedea" dincolo de limitele vizibilității directe o consacră ca o tehnologie indispensabilă în lumea modernă, contribuind la siguranța, eficiența și progresul în diverse domenii de activitate.

2.1.2 Misiunile radiolocației

Radiolocația, datorită capacității sale de a detecta și localiza obiecte la distanță, îndeplinește o varietate de misiuni esențiale. Acestea se extind în diverse domenii, de la cel militar, unde asigură supravegherea spațiului aerian și ghidarea armelor, până la cel civil, unde contribuie la siguranța navigației și la prognoza meteo.

Una dintre cele mai importante misiuni ale radiolocației este **supravegherea**. Sistemele radar de supraveghere monitorizează continuu spațiul aerian și maritim, detectând și identificând obiecte de interes, precum aeronave, nave sau vehicule terestre. Acestea furnizează informații despre poziția, viteza și direcția de deplasare a obiectelor, contribuind la controlul traficului aerian, apărarea aeriană, supravegherea frontierelor și siguranța navigației. O altă misiune esențială este **detectarea și urmărirea țintelor**. Sisteme radar specializate sunt

utilizate pentru a detecta și urmări cu precizie ținte specifice, oferind informații detaliate despre caracteristicile acestora. Aceste informații sunt esențiale pentru ghidarea armelor, interceptarea țintelor și apărarea antirachetă.

Radiolocația are un rol important și în **cartografiere și navigație**. Sisteme radar specializate pot penetra prin obstacole, cum ar fi vegetația densă sau straturile de gheață, pentru a obține informații despre relieful ascuns. Aceste informații sunt utilizate în cartografie, geologie și arheologie. **Observațiile meteorologice** reprezintă o altă misiune importantă a radiolocației. Sistemele radar meteorologice detectează și monitorizează fenomenele meteo, cum ar fi precipitațiile, furtunile și ciclonii, contribuind la prognoza meteo și la avertizarea populației în cazul unor fenomene severe.

Pe lângă aceste misiuni principale, radiolocația are și o serie de **aplicații specializate**, cum ar fi controlul vitezei autovehiculelor, senzori de parcare și sisteme de ghidare pentru persoane nevăzătoare. Misiunile radiolocației sunt diverse și acoperă o gamă largă de domenii. Această tehnologie versatilă joacă un rol esențial în lumea modernă, contribuind la siguranța, eficiența și progresul în numeroase sectoare de activitate.

2.1.3 Principii fundamentale: reflexia undelor, propagarea rectilinie, interferența undelor electromagnetice.

Funcționarea radiolocației se bazează pe o serie de principii fundamentale ale fizicii undelor, esențiale pentru înțelegerea modului în care undele radio interacționează cu mediul înconjurător și permit detectarea și localizarea obiectelor la distanță.

Unul dintre aceste principii este **reflexia undelor**. Undele electromagnetice, inclusiv undele radio utilizate în radiolocație, au proprietatea de a se reflecta atunci când întâlnesc o suprafață de separație între două medii cu proprietăți electrice diferite, cum ar fi aerul și un obiect solid. Această reflexie este exploatată în radiolocație pentru a detecta obiecte, prin analiza undelor reflectate de acestea. Cantitatea de energie reflectată depinde de o serie de factori, inclusiv unghiul de incidență al undei, proprietățile electrice ale materialului din care este alcătuit obiectul, precum și forma și dimensiunea acestuia. Un alt principiu fundamental

este **propagarea rectilinie a undelor**. În condiții ideale, undele radio se propagă în linie dreaptă, ceea ce permite determinarea direcției din care provin undele reflectate și, implicit, direcția în care se află obiectul detectat. Totuși, propagarea rectilinie poate fi influențată de fenomene precum refracția, difracția și reflexia multiplă, care pot modifica traiectoria undelor.

Interferența undelor electromagnetice este un alt fenomen important ce trebuie luat în considerare în radiolocație. Undele electromagnetice se pot suprapune și interfera constructiv sau destructiv, în funcție de faza lor. Interferența constructivă are loc atunci când două unde sunt în fază, rezultând o undă cu amplitudine mai mare, în timp ce interferența destructivă are loc atunci când două unde sunt în antifază, rezultând o undă cu amplitudine mai mică sau chiar nulă. În radiolocație, interferența poate fi utilizată pentru a îmbunătăți semnalul recepționat sau pentru a elimina semnalele nedorite. În final, un principiu fundamental utilizat în radiolocație este **viteza constantă a luminii (c)**. Undele electromagnetice, inclusiv undele radio, se propagă cu o viteză constantă în vid, aproximativ egală cu 3×10^8 m/s. Această constantă, notată cu "c", este utilizată în radiolocație pentru a calcula distanța până la obiectul detectat, prin măsurarea timpului necesar undelor radio să parcurgă distanța dintre transmițător, obiect și receptor.

Înțelegerea acestor principii fundamentale este esențială pentru o bună cunoaștere a funcționării sistemelor radar și pentru interpretarea corectă a informațiilor obținute prin intermediul radiolocației.

Tipuri de Radiolocație

Radiolocația spre deosebire de Radiocomunicații folosește antene directive a căror caracteristici de directivitate (evantai, pencil/stilou) sunt clar delimitate în spațiu. Radiolocația poate fi clasificată în funcție de principala metodă de operare și scopul său. În funcție de modul în care sunt emise și recepționate semnalele, radarele pot fi împărțite în două mari categorii: **radar activ** și **radar pasiv**. Fiecare dintre acestea se poate subîmpărți în tipuri suplimentare, în funcție de tehnologia utilizată și de aplicațiile pentru care sunt destinate.

Radarul activ emite semnale electromagnetice care sunt reflectate de obiecte sau ținte, iar semnalul reflectat este recepționat și procesat de sistemul radar. Aceasta este metoda de radiolocație cea mai folosită pentru detectarea și urmărirea obiectelor.

Radarul primar(PSR - Primary Surveillance Radar) este un tip de radar activ care emite semnale și măsoară timpul necesar ca acestea să ajungă la țintă și să se întoarcă. Acesta poate detecta orice obiect care reflectă semnalele radarului, inclusiv avioane, nave, vehicule și chiar obiecte de pe sol. Radarul primar nu depinde de niciun răspuns emis de ținta detectată, fiind capabil să funcționeze independent de natura obiectului. Radarul primar este folosit pentru detecția de bază a obiectelor și este folosit în **aplicații de supraveghere aeriană și monitorizare maritimă**. De asemenea, este folosit în **sisteme de apărare antiaeriană** pentru detectarea avioanelor inamice. Principala limitare a radarului primar este că nu oferă informații suplimentare despre țintă (cum ar fi identitatea acesteia). De asemenea, poate fi afectat de interferențele sau de clutter-ul din mediu.

Radarul secundar(SSR - Secondary Surveillance Radar) este un tip de radar activ care, pe lângă semnalele proprii emise de sistem, interacționează cu un **transponder** instalat pe ținta/ aeronava detectată. Acest transponder răspunde la semnalul radarului, furnizând informații suplimentare despre țintă, cum ar fi **identitatea acesteia, altitudinea și viteza**. Radarul secundar este folosit în sistemele de **identificare prieten/dușman (IFF)**, în **controlul traficului aerian** și în **aplicații de monitorizare a avioanelor și navelor**. Prezintă avantaje căci spre deosebire de radarul primar, radarul secundar poate oferi informații suplimentare, cum ar fi identificarea țintelor, ceea ce îl face mult mai eficient în gestionarea traficului aerian și în apărările aeriene. Dependența de transponder poate fi considerată o **limitare**, deoarece radarul nu poate detecta țintele care nu sunt echipate cu un transponder funcțional.

Radarul IFF(Identification Friend or Foe) este o formă specializată de radar secundar care permite distingerea între **ținte prietene și ținte inamice**. Acesta funcționează prin emiterea unui semnal către o țintă, care răspunde cu un cod specific, indicând dacă este prietenoasă sau inamică. Acest tip de radar este utilizat

în **operațiuni militare** pentru a preveni atacurile asupra propriilor aeronave și pentru a îmbunătăți eficiența apărarea aeriană.

Radarul pasiv nu emite semnale proprii, ci detectează semnalele electromagnetice care sunt deja emise de obiectele din mediu. Aceste semnale pot proveni de la surse externe, cum ar fi semnalele de la altele radare sau semnalele naturale (de exemplu, semnalele de la vreme). Această tehnologie are avantajul principal de a fi **invizibilă** pentru inamic, deoarece radarul nu emite semnale detectabile.

Radarul pasiv de supraveghere se bazează pe detectarea semnalelor de la alte surse, cum ar fi radarele inamice sau semnalele de comunicații emise de aeronave sau nave. Aceasta poate fi o metodă eficientă de a urmări ținte care nu doresc să fie detectate, întrucât radarul nu emite semnale proprii care ar putea fi interceptate de către inamic. Este folosit pentru **supravegherea discreționară** a unui teritoriu sau a unui spațiu aerian, în scopuri de **război electronic** sau de **monitorizare a traficului neautorizat**. Principalele **avantaje** sunt **discreția** și **siguranța**, deoarece radarul pasiv nu poate fi detectat de inamic. Este eficient în situațiile în care radarele active pot dezvălui locația operatorului. Principala limitare a radarului pasiv este că depinde de semnalele existente în mediu și nu poate detecta ținte care nu emit semnale de natură electromagnetică.

Clasificarea radarului în **activ** și **pasiv** reflectă diferențele fundamentale între aceste tehnologii și scopurile pentru care sunt utilizate. Radarele active sunt folosite pentru detectarea și urmărirea directă a obiectelor, în timp ce radarele pasive sunt mai discrete și mai greu de detectat, dar nu pot funcționa fără semnale externe. Radarul primar și secundar sunt două tipuri de radare active, fiecare având aplicații specifice, în timp ce radarul IFF reprezintă un caz specializat de radar secundar, esențial pentru identificarea prietenului sau inamicului în contextul operațiunilor militare.

2.1.4 Propagarea undelor electromagnetice în radiolocație

Aceasta este un proces fundamental ce influențează în mod semnificativ performanțele sistemelor radar, având un impact direct asupra capacității de detecție, preciziei de localizare și fiabilității acestora. Factorii care afectează

propagarea undelor radar sunt diversificați și pot modifica considerabil razele de acțiune ale radarului în funcție de mediul prin care acestea se deplasează.

Unul dintre cei mai importanți factori care influențează propagarea undelor electromagnetice este **absorbția atmosferică**. Atmosfera absoarbe o parte din energia semnalului radar, iar acest fenomen variază în funcție de frecvența undelor și de compoziția atmosferei. Vaporii de apă și moleculele de oxigen sunt principalii contributory la acest proces, iar absorbția crește semnificativ la frecvențe mai mari, peste 10 GHz, reducând astfel raza de detecție a radarului.

Difracția este un alt fenomen important care afectează propagarea undelor. Aceasta se manifestă atunci când undele electromagnetice se curbează în jurul obstacolelor sau pătrund prin deschideri mici, oferind posibilitatea de a detecta obiecte aflate în spatele unor structuri. Difracția este mai pronunțată la frecvențele joase, când lungimea de undă este mai mare, iar acest fenomen poate genera semnale secundare sau ecouri multiple, afectând astfel precizia sistemului radar.

Reflecția este un alt mecanism cheie în radiolocație. Când undele radar întâlnesc o suprafață cu proprietăți electrice diferite, cum ar fi solul, apa sau construcțiile, acestea sunt reflectate înapoi spre receptor. Reflexiile pot fi speculare, atunci când **unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie**, sau difuze, atunci când energia se disipează în mai multe direcții. În timp ce reflecția este un **fenomen esențial pentru detectarea și localizarea țintelor**, reflexiile multiple pot duce la apariția de ecouri parazite care pot complica procesul de identificare a obiectului țintă.

Efectele atmosferice joacă un rol major în detecția țintelor, iar un fenomen notabil în acest sens este **super-refracția**. Acesta se produce atunci când stratificarea atmosferică provoacă o deviere anormală a undelor radar către sol, extinzând astfel distanța maximă de detecție. Super-refracția este frecvent întâlnită în condiții meteorologice stabile, cum ar fi inversiunile termice, și poate duce la detectarea falsă a obiectelor aflate la distanțe mult mai mari decât cele normale.

Un alt fenomen asociat propagării undelor electromagnetice este **ducting-ul, sau canalizarea undelor**, care apare atunci când undele radar sunt blocate între straturi atmosferice cu indici de refracție diferiți. Acest fenomen permite undelor să se propaga pe distanțe mari cu pierderi minime. Ducting-ul este comun în

regiunile litorale sau la altitudini joase, unde stratificarea temperaturii și umidității favorizează această canalizare. Deși ducting-ul poate extinde raza de detecție, poate, de asemenea, genera detecții false și poate complica interpretarea corectă a ecourilor radar.

Efectele precipitațiilor sunt, de asemenea, semnificative în radiolocație. Ploaia, zăpada sau grindina pot atenua semnificativ semnalul radar, iar particulele de apă pot reflecta, absorbi sau dispersa undele electromagnetice, scăzând astfel performanțele radarului. Aceste efecte pot reduce raza de detecție și pot introduce **zgomot suplimentar**, generând ecouri parazite. În anumite cazuri, acest fenomen este utilizat în radarul meteorologic pentru a detecta precipitațiile, însă în alte aplicații, efectele ploii pot limita semnificativ eficiența sistemului radar.

Propagarea undelor electromagnetice în radiolocație depinde de o serie de fenomene fizice complexe, iar înțelegerea detaliată a acestora este esențială pentru proiectarea și utilizarea eficientă a sistemelor radar în condiții variate de mediu. Fiecare dintre aceste fenomene – absorbția, difracția, reflexia, super-refracția, ducting-ul și efectele ploii – joacă un rol semnificativ în determinarea performanței unui sistem radar, iar cunoașterea lor detaliată permite optimizarea acestora pentru o detecție mai precisă și fiabilă.

2.1.5 Ecuația Radiolocației

2.1.5.1 Obiectele de Radiolocație și SER

În radiolocație, **ținta** reprezintă orice obiect capabil să reflecte undele radio emise de un sistem radar. Aceste obiecte pot fi extrem de diverse, de la aeronave, nave și vehicule, la elemente naturale precum munți, păduri sau nori, și chiar structuri artificiale cum ar fi clădiri sau poduri. Caracteristicile țintei joacă un rol esențial în determinarea semnalului radar recepționat și a performanței sistemului de radiolocație. Printre cele mai importante se numără suprafața efectivă de reflexie a țintei, care cuantifică capacitatea de reflexie a undelor radar, viteza radială, distanța față de radar și altitudinea.

Țintele pot fi clasificate în funcție de mai multe criterii. În funcție de modul de interacțiune cu radarul, avem ținte cooperative, care emit semnale ca răspuns

la interogarea radarului, și ținte non-cooperative, care sunt detectate prin simpla reflexie a undelor. De asemenea, țintele pot fi fixe sau mobile, în funcție de starea lor de mișcare. Identificarea și clasificarea țintelor sunt etape importante în procesarea semnalelor radar, permițând operatorilor să ia decizii informate în funcție de natura și caracteristicile țintelor detectate.

Suprafața efectivă de reflexie (SER)/ Secțiunea transversală radar (RCS), notată cu σ , cuantifică capacitatea unui obiect de a reflecta undele radar. Aceasta reprezintă aria echivalentă a unei suprafețe plane, fictive dispuse perpendicular pe direcția unei plane incidente, care se comportă ca o sursă ideală și izotropă de radiație secundară și care fiind dispusă în punctul în care se află ținta, creează în antena stației de radiolocație aceeași densitate de putere ca și ținta reală. Cu alte cuvinte, SER reflectă aceeași cantitate de energie radar ca și obiectul în cauză, atunci când este iluminat din aceeași direcție. Exprimată în metri pătrați (m^2), SER depinde de mai mulți factori, printre care forma și dimensiunea obiectului, materialul din care este fabricat, unghiul de incidență al undelor radar și frecvența acestora. Obiectele cu forme complexe și dimensiuni mari tind să aibă o SER mai mare, la fel ca și cele fabricate din materiale conductoare, cum ar fi metalele. Unghiul de incidență al undelor radar joacă, de asemenea, un rol important în determinarea SER, iar aceasta poate varia semnificativ în funcție de frecvența undelor utilizate.

SER este un parametru esențial în ecuația radiolocației, deoarece influențează direct puterea semnalului reflectat de țintă și, implicit, distanța maximă de detecție. În domeniul militar, reducerea SER este o prioritate, realizată prin tehnologii stealth care includ proiectarea cu forme speciale și utilizarea materialelor absorbante de radar. Aceste măsuri fac obiectele mai dificil de detectat de către radare, contribuind la creșterea capacității de supraviețuire în cazul unui conflict.

2.1.5.2 Definire și deducere matematică

Ecuația radiolocației este o formulă matematică fundamentală care descrie relația dintre distanța maximă de descoperire, puterea semnalului transmis, puterea semnalului recepționat și diverși parametri ai sistemului radar și ai țintei.

Această ecuație este esențială pentru a înțelege performanța unui sistem radar și pentru a calcula distanța maximă de detecție a unei ținte.

Ecuația radiolocației poate fi dedusă matematic printr-o serie de etape, pornind de la principiile de bază ale propagării undelor electromagnetice.

1. **Densitatea de putere a semnalului transmis** la o distanță R de antenă este dată de relația:

$$S_t = \frac{P_t * G_t}{4 * \pi * R^2}$$

unde:

- S_t este densitatea de putere a semnalului transmis (în W/m²)
- P_t este puterea de vârf a semnalului transmis (în W)
- G_t este câștigul antenei de transmisie

2. **Puterea reflectată de țintă** este dată de relația:

$$P_s = S_t * \sigma$$

unde:

- P_s este puterea reflectată de țintă (în W)
- σ este SER (RCS) a țintei (în m²)

3. **Densitatea de putere a semnalului reflectat** este dată de relația:

$$S_r = \frac{P_s}{4 * \pi * R^2}$$

unde:

- S_r este densitatea de putere a semnalului reflectat (în W/m²)

4. **Puterea recepționată de antenă** este dată de relația:

$$P_r = S_r * A_e$$

unde:

- P_r este puterea recepționată de antenă (în W)
- A_e este aria efectivă a antenei de recepție (în m²)

5. **Ecuația intermediară** este obținută combinând ecuațiile de mai sus, astfel:

$$P_r = \frac{P_t * G_t * A_e * \sigma}{(4 * \pi)^2 * R^4}$$

Această ecuație poate fi exprimată și în funcție de câștigul antenei de recepție (G_r) și lungimea de undă a semnalului radar (λ):

$$A_e = \frac{G_r * \lambda^2}{4 * \pi}$$

Ținând cont de expresia ariei efective a antenei, ecuația poate fi scrisă:

$$P_r = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2 * \sigma}{(4 * \pi)^3 * R^4}$$

Ecuația radiolocației arată că puterea recepționată este direct proporțională cu puterea transmisă, câștigul antenelor și SER a țintei și invers proporțională cu pătratul distanței până la țintă. Ținând cont că la radarul monostatic, antena este folosită atât la emisie cât și la recepție, câștigurile G_t și G_r au aceeași valoare.

6. Ecuația finală obținută prin izolarea distanței R:

Pentru a obține distanța R, izolăm termenul R^4 în ecuație:

$$R^4 = \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_r * (4 * \pi)^3}$$

Aplicând radicalul de ordin 4 pentru a obține relația pentru distanța R:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_r * (4 * \pi)^3}}$$

Observații:

- Ecuația radiolocației este o formulă idealizată, care nu ține cont de toți factorii care pot influența performanța unui sistem radar, cum ar fi pierderile de propagare în atmosferă, zgomotul termic sau bruiatul. În practică, se utilizează o formă extinsă a ecuației radiolocației, care include și acești factori.
- Ecuația radiolocației este un instrument esențial pentru proiectarea și evaluarea performanței sistemelor radar.
- Se observă că pentru dublarea distanței de descoperire se impune mărirea de 16 (2^4) ori a puterii de emisie/transmisie, sau mărirea de 4 (2^2) ori a câștigului antenei ori a lungimii de undă folosite.

2.1.5.3 Parametrii care influențează distanța de descoperire: atmosferă, curbura terestră, absorbție.

Distanța maximă la care un sistem radar poate detecta o țintă, denumită și distanță de descoperire, este o caracteristică esențială ce depinde de o multitudine de factori, atât intrinseci sistemului radar, cât și extrinseci, legați de mediul de propagare (vezi și **subcapitolul 2.1.4**) și de caracteristicile țintei.

Un prim factor important îl constituie **atmosfera terestră**, care influențează propagarea undelor radio prin fenomene precum atenuarea, refracția și difuzia. Atenuarea se manifestă prin absorbția unei părți din energia undelor radio, fenomen accentuat la frecvențe înalte și în prezența precipitațiilor. Refracția, determinată de variația indicelui de refracție al atmosferei cu altitudinea, curbează traiectoria undelor radio, afectând precizia de localizare a țintelor. Difuzia, cauzată de prezența particulelor în atmosferă, reduce puterea semnalului recepționat. Un alt factor important este **curbura Pământului**. Undele radio emise de un radar se propagă de-a lungul unei linii curbe, limitând distanța de descoperire la orizontul radar. Pentru a depăși această limitare, se utilizează radare cu vedere peste orizont, care exploatează reflexia undelor radio în ionosferă. **Absorbția** undelor radio de către diverse materiale, cum ar fi apa, solul sau vegetația, reprezintă un alt factor limitativ. Acest fenomen, mai pronunțat la frecvențe înalte și în cazul materialelor cu conductivitate electrică mare, reduce puterea semnalului recepționat și limitează distanța de descoperire.

Pe lângă acești factori, distanța de descoperire este influențată și de puterea de emisie a radarului, sensibilitatea receptorului, secțiunea transversală radar a țintei și frecvența de operare. O putere de emisie mai mare, un receptor mai sensibil și SER a țintei mai mare contribuie la creșterea distanței de descoperire. Frecvențele joase sunt mai puțin afectate de atenuarea atmosferică și de absorbție, permițând o distanță de descoperire mai mare, în timp ce frecvențele înalte oferă o rezoluție mai bună și o precizie de localizare mai mare.

Astfel, proiectarea unui sistem radar performant necesită o analiză atentă a tuturor factorilor care influențează distanța de descoperire, pentru a optimiza parametrii sistemului și a asigura o detecție eficientă a țintelor, în concordanță cu misiunea radarului.

2.1.6 Determinarea poziției obiectelor în spațiu

2.1.6.1 Sisteme de coordonate (sferic și cilindric)

Determinarea poziției obiectelor în spațiu este esențială în radiolocație. Pentru aceasta, se utilizează diverse sisteme de coordonate, care permit reprezentarea precisă a poziției unui obiect în raport cu un punct de referință (O – punct de stație). Două dintre cele mai utilizate sisteme de coordonate în radiolocație sunt sistemul sferic și sistemul cilindric.

Sistemul de coordonate sferice utilizează trei coordonate pentru a defini poziția unui punct în spațiu:

- **Distanța înclinată/radială (D):** Reprezintă distanța de la origine până la punctul considerat. În radiolocație, aceasta corespunde distanței de la radar la țintă.
- **Unghiul azimutal (β):** Reprezintă unghiul dintre proiecția razei vectoriale pe planul orizontal și o direcție de referință (de obicei, nordul). În radiolocație, aceasta indică direcția țintei în plan orizontal.
- **Unghiul de elevație (ϵ):** Reprezintă unghiul dintre raza vectorială și planul orizontal. În radiolocație, aceasta indică înălțimea țintei față de orizont.

Sistemul de coordonate cilindrice utilizează, de asemenea, trei coordonate pentru a defini poziția unui punct în spațiu:

- **Distanța orizontală (D_o):** Reprezintă distanța de la origine până la proiecția punctului pe planul orizontal. În radiolocație, aceasta corespunde distanței orizontale de la radar la țintă.
- **Unghiul azimutal (β):** Similar cu sistemul sferic, reprezintă unghiul dintre proiecția razei vectoriale pe planul orizontal și o direcție de referință.
- **Înălțimea (H):** Reprezintă distanța de la punctul considerat la planul orizontal. În radiolocație, aceasta corespunde altitudinii țintei față de sol.

Alegerea sistemului de coordonate depinde de specificul aplicației și de tipul de informații care trebuie reprezentate. Sistemul sferic este util pentru reprezentarea poziției țintelor în spațiul tridimensional, în timp ce sistemul cilindric este mai potrivit pentru reprezentarea țintelor aflate la altitudini joase, unde

curbura Pământului poate fi neglijată. Sistemele de coordonate(**Figura1**) sferice și cilindrice sunt instrumente esențiale în radiolocație, permițând reprezentarea precisă a poziției obiectelor în spațiu și facilitând analiza și interpretarea datelor radar.

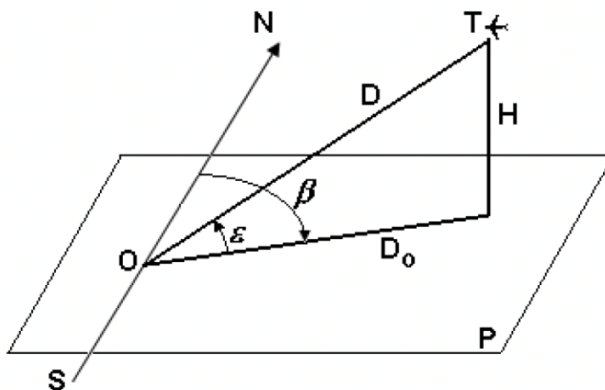


Figura1: Coordonate folosite în radiolocație

În radiolocație, este adesea necesar să se convertească coordonatele unei ținte dintr-un sistem de coordonate în altul, în funcție de necesitățile specifice ale aplicației. Cele mai comune **conversii sunt între sistemul de coordonate sferice și cel cilindrice**. Având în vedere coordonatele sferice (D, β, ε) ale unui punct, coordonatele cilindrice corespunzătoare (D_0, β, H) pot fi calculate astfel:

$$D_0 = D * \sin \varepsilon$$

$$H = D * \cos \varepsilon$$

Aceste relații matematice permit o conversie rapidă și precisă între cele două sisteme de coordonate, facilitând analiza și interpretarea datelor radar.

Observații:

- Este important să se acorde atenție unităților de măsură utilizate pentru unghiuri (grade sau radiani).
- În anumite aplicații, pot fi necesare și conversii între alte sisteme de coordonate, cum ar fi sistemul cartezian.

Cunoașterea relațiilor de trecere între coordonate este esențială în radiolocație, permițând o reprezentare flexibilă și o analiză eficientă a poziției țintelor în spațiu.

2.1.6.2 Metode de determinare a coordonatelor unghiulare

Determinarea precisă a coordonatelor unghiulare, reprezentate de azimut și elevație, este o funcție critică a oricărui sistem radar, permițând localizarea tridimensională a țintelor. Diversitatea metodelor utilizate în radiolocație pentru estimarea acestor coordonate reflectă complexitatea problemei și necesitatea adaptării la specificul fiecărei aplicații. În continuare, vom analiza în detaliu trei dintre cele mai răspândite metode, evidențiind principiile de funcționare, avantajele, dezavantajele și exemplele de aplicare.

Metoda semnalului maxim, cunoscută și sub denumirea de "metoda lobului principal", această metodă se bazează pe un principiu intuitiv: identificarea direcției din care semnalul recepționat de la țintă atinge amplitudinea maximă. Implementarea acestei metode presupune rotirea mecanică sau scanarea electronică a antenei radar, cu măsurarea concomitentă a intensității semnalului recepționat pentru fiecare direcție. Direcția corespunzătoare valorii maxime a semnalului este atribuită țintei.

Avantaje:

- **Simplitate conceptuală și implementare facilă:** Metoda se distinge prin simplitatea sa conceptuală și prin faptul că nu necesită calcule complexe sau echipamente sofisticate, fiind relativ ușor de implementat în sisteme radar cu cerințe modeste de precizie.
- **Eficiență în cazul țintelor izolate:** În situațiile în care ținta se află izolată, fără prezența altor obiecte reflectante în apropiere, metoda semnalului maxim poate oferi o estimare rapidă și acceptabilă a direcției țintei.

Dezavantaje:

- **Precizie limitată de factori perturbatori:** Precizia metodei este afectată în mod semnificativ de prezența zgomotului, de caracteristicile lobilor secundari ai antenei și de interferențele generate de alte surse de semnal. Lobii secundari, reprezentând direcții de radiație nedorite ale antenei, pot genera maxime locale în diagrama de radiație, ceea ce poate duce la erori de determinare a direcției țintei.

- **Vulnerabilitate la tehnicile de bruijaj:** Metoda semnalului maxim prezintă o vulnerabilitate pronunțată la tehnicile de bruijaj electronic, care pot crea semnale false cu amplitudine mare, inducând în eroare sistemul radar și compromițând capacitatea de determinare a coordonatelor unghiulare.

Exemple de aplicare:

- Sisteme radar de supraveghere cu cerințe reduse de precizie, utilizate în aplicații civile sau militare unde nu este necesară o localizare foarte precisă a țintelor.
- Radare de control al vitezei autovehiculelor, unde se urmărește în principal măsurarea vitezei radiale a vehiculelor, iar determinarea precisă a direcției nu este critică.

Metoda semnalului minim / diferență, cunoscută și sub denumirea de "metoda lobilor laterali" sau "metoda monoimpuls", se bazează pe utilizarea a două antene sau a două fascicule ale aceleiași antene, orientate ușor diferit în spațiu. Prin măsurarea diferenței de fază sau de amplitudine între semnalele recepționate de cele două antene, se poate determina direcția țintei cu o precizie superioară metodei semnalului maxim. Există două variante principale ale acestei metode:

- **Metoda diferenței de amplitudine:** Această variantă presupune compararea amplitudinilor semnalelor recepționate de cele două antene. Direcția țintei este determinată prin identificarea direcției în care diferența de amplitudine între cele două semnale este minimă.
- **Metoda diferenței de fază:** În această variantă, se compară fazele semnalelor recepționate de cele două antene. Direcția țintei este determinată prin identificarea direcției în care diferența de fază între cele două semnale este nulă.

Avantaje:

- **Precizie îmbunătățită:** Metoda semnalului minim/diferență oferă o precizie superioară metodei semnalului maxim, deoarece utilizează informații din doi lobi ai antenei, ceea ce permite o mai bună discriminare a direcției țintei.

- **Robustețe la zgomot și interferențe:** Comparativ cu metoda semnalului maxim, această metodă este mai puțin sensibilă la zgomot și interferențe, deoarece diferența dintre semnale este mai puțin afectată de acești factori perturbatori.

Dezavantaje:

- **Complexitate crescută:** Implementarea acestei metode necesită echipamente mai complexe, inclusiv două antene sau un sistem de comutare între două fascicule ale aceleiași antene, precum și algoritmi de procesare a semnalului mai sofisticăți.

Exemple de aplicare:

- Sisteme radar de urmărire cu precizie ridicată, utilizate în aplicații militare sau științifice unde este necesară o localizare foarte precisă a țintelor.
- Radare de ghidare a rachetelor, unde precizia de determinare a coordonatelor unghiulare este esențială pentru dirijarea precisă a rachetelor către țintă.

Metoda semnalului egal, cunoscută și sub denumirea de "metoda comparării lobilor", această metodă utilizează, de asemenea, două antene sau două fascicule ale aceleiași antene. Direcția țintei este determinată prin identificarea direcției în care semnalele recepționate de cele două antene prezintă amplitudini egale.

Avantaje:

- **Precizie bună:** Metoda semnalului egal oferă o precizie comparabilă cu cea a metodei semnalului minim/diferență, fiind o alternativă atractivă în anumite aplicații.
- **Sensibilitate redusă la variațiile de amplitudine:** Un avantaj important al acestei metode este sensibilitatea redusă la variațiile de amplitudine ale semnalului recepționat, deoarece se bazează pe egalitatea amplitudinilor semnalelor recepționate de cele două antene.

Dezavantaje:

- **Complexitate crescută:** Similar cu metoda semnalului minim/diferență, această metodă necesită echipamente mai complexe decât metoda semnalului maxim, inclusiv două antene sau un sistem de comutare între două fascicule ale aceleiași antene.
- **Sensibilitate la zgomot:** Comparativ cu metoda semnalului minim/diferență, metoda semnalului egal poate fi mai sensibilă la zgomot, ceea ce poate afecta precizia de determinare a coordonatelor unghiulare.

Exemple de aplicare:

- Sisteme radar de navigație, unde este necesară o determinare precisă a direcției pentru ghidarea navelor sau aeronavelor.
- Radare de cartografiere a terenului, unde se urmărește obținerea unor imagini de înaltă rezoluție a suprafeței terestre.

Alegerea metodei optime de determinare a coordonatelor unghiulare într-un sistem radar este un proces complex care necesită o analiză atentă a cerințelor aplicației, a caracteristicilor țintelor, a mediului de propagare și a resurselor disponibile. Fiecare dintre cele trei metode prezentate prezintă avantaje și dezavantaje specifice, iar selecția trebuie să țină cont de factori cum ar fi precizia necesară, complexitatea echipamentului, sensibilitatea la zgomot și interferențe, precum și costurile de implementare. În practică, se pot utiliza și combinații ale acestor metode pentru a obține performanțe optime și a satisface cerințele specifice ale aplicației.

2.2 Sisteme și Stații de Radiolocație

2.2.1 Parametrii tehnici și tactici

Performanța și capabilitățile sistemelor și stațiilor de radiolocație sunt determinate de o serie de parametri tehnici și tactici, a căror înțelegere este esențială pentru evaluarea, compararea și selecția sistemelor radar în funcție de cerințele specifice ale fiecărei aplicații.

Parametrii tehnici:

Frecvența de operare reprezintă frecvența undelor electromagnetice utilizate de sistemul radar, având un impact direct asupra rezoluției, distanței de descoperire și atenuării semnalului. Selecția frecvenței de operare se face în funcție de cerințele specifice ale aplicației, ținând cont de compromisurile dintre rezoluție, distanța de descoperire și atenuare. **Puterea de emisie** definește puterea semnalului transmis de radar, influențând direct distanța maximă la care pot fi detectate țintele. O putere de emisie mai mare permite detectarea țintelor la distanțe mai mari, însă poate duce la o complexitate crescută a sistemului și la un consum energetic mai ridicat. **Lățimea de bandă** reprezintă intervalul de frecvențe ocupat de semnalul radar, având un impact direct asupra rezoluției în distanță. O lățime de bandă mai mare permite o rezoluție mai bună, însă necesită o procesare a semnalului mai complexă.

Durata impulsului definește durata fiecărui impuls transmis de radar, influențând rezoluția în distanță. Un impuls mai scurt permite o rezoluție mai bună, însă reduce energia transmisă și implicit distanța de descoperire. **Frecvența de repetiție a impulsurilor (PRF)** reprezintă numărul de impulsuri transmise pe secundă, având un rol important în determinarea distanței maxime neambiguă de măsurare și a vitezei Doppler maxime neambiguă. **Sensibilitatea receptorului** definește capacitatea receptorului de a detecta semnale slabe, influențând capacitatea de detecție a țintelor cu secțiune transversală radar mică. O sensibilitate mai mare permite detectarea unor ținte mai mici sau mai îndepărtate.

Câștigul antenei reprezintă o măsură a capacității antenei de a concentra energia radiată într-o anumită direcție, influențând raza de acțiune și rezoluția unghiulară. Un câștig mai mare permite o concentrare mai eficientă a energiei, ceea ce duce la o rază de acțiune mai mare și o rezoluție unghiulară mai bună. **Lățimea fasciculului antenei** reprezintă unghiul solid calculat cu limite acolo unde puterea este la jumătatea valorii maxime (respectiv atenuare de 3dB), în care este concentrată energia radiată de antenă, influențând rezoluția unghiulară (**capacitatea de separare în azimut/elevație, CS α /CS β**). Un fascicul mai îngust oferă o rezoluție unghiulară mai bună, permițând o mai bună discriminare a țintelor apropiate. **Tipurile de antenă** utilizate în radiolocație și RE sunt variate, fiecare cu caracteristici specifice (antene parabolice, antene phased array, etc.). Alegerea tipului de antenă depinde de cerințele aplicației, de frecvența de operare și de constrângerile de spațiu și greutate.

Tipul de modulație - modul în care este modulat semnalul radar (modulație în impulsuri, modulație în frecvență, etc.) influențează performanța radarului în termeni de rezoluție, distanță de descoperire și rezistență la bruijaj. **Tipul de procesare a semnalului** - tehnicile utilizate pentru a extrage informațiile utile din semnalul recepționat (filtrare, corelație, etc.) joacă un rol esențial în performanța radarului, permițând detectarea și localizarea țintelor în prezența zgomotului și a interferențelor.

Parametrii tactici:

Distanța de descoperire reprezintă distanța maximă la care radarul poate detecta o țintă, fiind un parametru critic în majoritatea aplicațiilor. Distanța de descoperire este influențată de o serie de factori, inclusiv puterea de emisie, sensibilitatea receptorului, secțiunea transversală radar a țintei și condițiile de propagare. **Precizia de măsurare** definește acuratețea cu care radarul poate determina coordonatele țintei (distanță, unghiuri, viteză), fiind un parametru important în aplicațiile care necesită o localizare precisă a țintelor. **Rezoluția** reprezintă capacitatea radarului de a distinge între două ținte apropiate, fiind influențată de lățimea de bandă a semnalului radar și de lățimea fasciculului antenei.

Rata de baleiere definește viteza cu care radarul scanează spațiul înconjurător, fiind importantă în aplicațiile de supraveghere care necesită o acoperire rapidă a unei zone largi. **Timpul de reacție** reprezintă timpul necesar radarului pentru a detecta o țintă și a furniza informațiile necesare, fiind un parametru critic în aplicațiile care necesită o reacție rapidă la apariția țintelor. **Mobilitatea** definește capacitatea radarului de a fi deplasat și utilizat în diferite locații, fiind importantă în aplicațiile militare și civile care necesită o flexibilitate operațională.

Fiabilitatea reprezintă probabilitatea ca radarul să funcționeze corect într-un interval de timp dat, fiind un parametru important în orice aplicație. **Mentenanța** definește efortul necesar pentru a menține radarul în stare de funcționare, fiind un factor important în costul total de proprietate. **Costul (LCC)** reprezintă costul de achiziție, operare și mentenanță a radarului, precum și cel de scoatere din activitate și de reutilizare a componentelor și materialelor rezultate, fiind un factor important în decizia de selecție a unui sistem radar.

Parametrii tehnici și tactici ai unui sistem radar sunt interdependenți, influențându-se reciproc. De exemplu, frecvența de operare afectează atât distanța de descoperire, cât și rezoluția. Puterea de emisie influențează distanța de descoperire și probabilitatea de detecție. Alegerea parametrilor tehnici se face în funcție de cerințele tactice ale aplicației, ținând cont de compromisurile dintre diferiți parametri. Cunoașterea parametrilor tehnici și tactici ai sistemelor radar este esențială pentru înțelegerea performanțelor, limitărilor și potențialului acestora. Acești parametri constituie un instrument valoros pentru evaluarea, compararea și selecția sistemelor radar potrivite pentru o gamă largă de aplicații, de la apărare și securitate națională la aviație civilă, navigație, meteorologie și alte domenii.

2.2.2 Stații de radiolocație în impuls

Reprezintă o categorie fundamentală de sisteme radar, a căror funcționare se bazează pe emisia unor impulsuri scurte de energie electromagnetică și recepționarea ulterioară a ecourilor provenite de la țintele interceptate de aceste impulsuri. Prin analiza acestor ecouri, se pot determina cu precizie parametri esențiali ai țintelor, cum ar fi distanța, viteza radială și direcția, informații vitale într-

o multitudine de aplicații, de la navigație și controlul traficului aerian la apărare și meteorologie.

Schema bloc generală

O stație de radiolocație în impuls este un sistem complex, alcătuit din mai multe blocuri funcționale interconectate, fiecare cu un rol specific în procesul de detecție și localizare a țintelor.

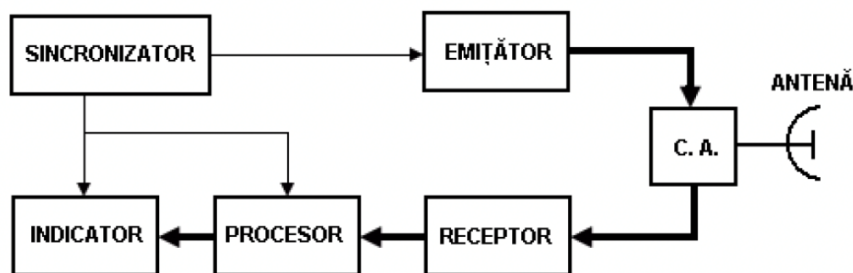


Figura2: Schema bloc generală a radarului în impuls

În general (**Figura2**) blocurile funcționale sunt după cum urmează:

Emițătorul este responsabil cu generarea impulsurilor scurte de energie electromagnetică de înaltă frecvență, care constituie semnalul radar. **Modulatorul** controlează cu precizie durata și frecvența de repetiție a impulsurilor emise. Modulatorul este esențial pentru a asigura o emisie controlată a semnalului radar, conform cerințelor aplicației. Durata impulsului influențează rezoluția în distanță a radarului, iar frecvența de repetiție a impulsurilor (stabilită în **sincronizator**) influențează distanța maximă neambiguă de măsurare și viteza Doppler maximă neambiguă. Emițătorul include un oscilator care **generează semnalul de înaltă frecvență (GFFI)** și un amplificator de putere care mărește amplitudinea semnalului la un nivel adecvat pentru a fi emis în spațiu.

Comutatorul de antenă este un dispozitiv electronic care îndeplinește o funcție **dublă**: direcționează impulsurile emise de emițător către antenă și dirijează semnalele recepționate de la antenă către receptor. Comutatorul antenă este esențial pentru a **proteja receptorul** (extrem de sensibil) de puterea mare a semnalului emis, care l-ar putea deteriora. **Antena** este elementul cheie al

sistemului radar, responsabil cu emisia impulsurilor în spațiu și recepționarea ecourilor reflectate de ținte. Antena convertește semnalele electrice în unde electromagnetice și invers, având un rol esențial în determinarea caracteristicilor de radiație și recepție ale radarului. Caracteristicile antenei, cum ar fi câștigul, lățimea fasciculului și diagrama de radiație, influențează direct performanța radarului.

Receptorul este responsabil cu recepționarea semnalelor slabe reflectate de ținte și amplificarea acestora la un nivel adecvat pentru procesare. Receptorul include un amplificator de joasă frecvență (LNA) care amplifică semnalul recepționat fără a introduce zgomot excesiv, un mixer care transformă semnalul de înaltă frecvență într-un semnal de frecvență intermediară (FI) mai ușor de procesat, și un amplificator FI care amplifică semnalul FI la un nivel adecvat pentru detecție. **Procesorul** sau unitatea centrală de procesare a semnalelor radar, responsabilă cu extragerea informațiilor utile din semnalele recepționate. Procesorul realizează o serie de operații de procesare a semnalului, cum ar fi filtrarea, corelația și analiza spectrală, pentru a determina distanța, viteza radială și direcția țintelor. În sistemele radar moderne, procesorul poate implementa și algoritmi avansați de procesare, cum ar fi filtrarea adaptivă și recunoașterea automată a țintelor.

Indicatorul reprezintă dispozitivul care afișează informațiile despre ținte într-un format ușor de interpretat de către operatorul radar. Indicatorul poate fi un afișaj analogic sau digital, prezentând informațiile sub formă de hărți, grafice sau date numerice. În sistemele radar moderne, indicatorul poate fi integrat într-un sistem de comandă și control, permițând o monitorizare centralizată a spațiului aerian și o coordonare eficientă a operațiunilor.

Principiul de funcționare al unei stații de radiolocație în impuls se desfășoară într-o succesiune de etape bine definite: **Emisia impulsului** unde emițătorul generează un impuls scurt de energie electromagnetică, de obicei cu o durată de **ordinul microsecundelor**. Acest impuls este amplificat la o putere ridicată și transmis de către antenă în spațiu, într-o direcție specifică datorită antenei directive. **Propagarea impulsului**: impulsul emis se propagă în linie dreaptă cu viteza luminii, conform principiilor opticii geometrice. În timpul propagării, impulsul suferă o atenuare datorită absorbției și difuziei în atmosferă. **Reflexia impulsului** se

realizează când impulsul întâlnește un obiect; o parte din energia sa este reflectată înapoi către radar. Cantitatea de energie reflectată depinde de o serie de factori, inclusiv de SER a țintei, de unghiul de incidență al undelor și de proprietățile materialului din care este alcătuită ținta.

Recepționarea ecoului se realizează prin antena radar care recepționează ecoul reflectat de țintă. Acest semnal este de obicei mult mai slab decât impulsul emis, datorită atenuării suferite în timpul propagării și a faptului că doar o fracțiune din energia incidentă este reflectată. **Procesarea semnalului** recepționat de antenă se realizează în receptor, unde este amplificat și filtrat pentru a elimina zgomotul și interferențele. Apoi, semnalul este transmis procesorului, care extrage informațiile utile despre țintă, cum ar fi distanța, viteza radială și direcția.

Afișarea informațiilor extrase de procesor se realizează cu ajutorul indicatorului, care le afișează într-un format ușor de interpretat de către operatorul radar. Aceste informații pot fi utilizate pentru o varietate de scopuri, cum ar fi controlul traficului aerian, apărarea aeriană, navigația sau monitorizarea condițiilor meteo.

Parametrii energetici și de timp ai semnalului emis

Performanța unui radar în impuls depinde de anumiți parametri esențiali ai semnalului, care influențează direct capacitatea de detecție și precizia sistemului. Acești parametri sunt definiți în funcție de caracteristicile energetice și temporale ale impulsurilor radar, fiecare având un rol crucial în performanțele sistemului.

Puterea de emisie (Pt) reprezintă cantitatea totală de energie transmisă de radar într-un singur impuls. Aceasta este determinată de amplificatorul de putere și de eficiența acestuia în generarea impulsurilor de înaltă frecvență. Puterea de emisie este direct proporțională cu distanța maximă de detecție a radarului, iar creșterea acesteia permite detectarea țintelor aflate la distanțe mai mari.

Durata impulsului (τ) reprezintă intervalul de timp într-un ciclu radar în care semnalul este emis. Acest parametru determină rezoluția în distanță a radarului. Impulsurile scurte permit o precizie ridicată în separarea țintelor aflate la distanțe

apropiate, în timp ce impulsurile mai lungi oferă o rază de acoperire mai mare.

Rezoluția în distanță (capacitatea de separare în distanță) este dată de relația:

$$CSD = \frac{c * \tau}{2}$$

unde:

- c este viteza luminii
- τ este durata impulsului.

Frecvența de repetiție a impulsurilor (F_r sau PRF) definește numărul de impulsuri transmise pe secundă și are un impact direct asupra distanței maxime neambigue a radarului. F_r ridicată permite o actualizare rapidă a datelor, dar poate duce la ambiguități în determinarea distanței, în timp ce un F_r scăzut permite detectarea precisă a obiectelor la distanțe mari. Inversul frecvenței de repetiție se numește perioadă de repetiție impulsurilor T_r și reprezintă durata dintre două impulsuri de sincronizare succesive. Se observă că frecvența de repetiție este un parametru al **sincronizatorului**. Relația dintre distanța maximă neambiguă și T_r este:

$$D_{max} = \frac{c * T_r}{2}$$

Lățimea de bandă a semnalului (B) determină capacitatea radarului de a discrimina țintele apropiate și de a oferi o rezoluție în distanță mai mare. O lățime de bandă mai mare permite radarului să distingă detalii fine ale țintei, în timp ce o bandă mai restrânsă limitează capacitatea de separare a țintelor apropiate.

Factorul de umplere (Q - Duty Cycle) este raportul dintre durata impulsului și perioada totală a ciclului radar. Acesta influențează eficiența energetică a sistemului radar, un factor de umplere ridicat indicând un consum mai mare de energie și o posibilă supraîncălzire a componentelor.

$$Q = \frac{\tau}{T_r} * 100\% = \tau * F_r * 100\%$$

Parametrii energetici și de timp ai semnalului emis joacă un rol esențial în performanțele unui radar în impuls, influențând factorii cheie precum raza de detecție, precizia și capacitatea de separare a țintelor. Optimizarea acestor parametri este esențială pentru maximizarea eficienței și fiabilității sistemului radar

în diverse aplicații, de la navigație aeriană și maritimă la aplicații militare și meteorologice.

Determinarea coordonatelor țintelor

Distanța până la țintă este determinată prin măsurarea timpului de zbor al impulsului, adică timpul necesar impulsului pentru a parcurge distanța dintre radar și țintă și înapoi. Cunoscând viteza de propagare a undelor electromagnetice (aproximativ egală cu viteza luminii în vid), se poate calcula distanța până la țintă cu o precizie ridicată.

$$D = \frac{c * t}{2}$$

Se poate astfel calcula distanța pentru: $t=1\mu s$, $D=150m$, respectiv $t=1ms$, $D=150km$

Viteza radială a țintei, adică componenta vitezei sale de-a lungul liniei de vizibilitate a radarului, este determinată prin măsurarea deplasării Doppler a frecvenței ecoului recepționat. Efectul Doppler produce o schimbare aparentă a frecvenței unei unde datorită mișcării relative dintre sursă și receptor. În cazul radarului, dacă ținta se apropie de radar, frecvența ecoului recepționat este mai mare decât frecvența semnalului emis, iar dacă ținta se îndepărtează, frecvența ecoului este mai mică. Prin măsurarea acestei diferențe de frecvență, se poate determina viteza radială a țintei.

Direcția țintei este determinată prin analiza direcției din care este recepționat ecoul, utilizând caracteristicile de directivitate ale antenei. Antenele radar sunt proiectate să emită și să recepționeze semnale într-un anumit sector unghiular, numit lob principal. Prin rotirea antenei sau prin utilizarea unor tehnici de scanare electronică, se poate determina direcția din care este recepționat semnalul maxim, care corespunde direcției țintei. Pentru determinarea direcției, respectiv a coordonatelor unghiulare, β și ε , se utilizează metode specifice explicate în **subcapitolul 2.1.6.2.**

Stațiile de radiolocație în impuls reprezintă sisteme complexe care exploatează principiile fundamentale ale fizicii undelor pentru a detecta, localiza și caracteriza ținte la distanță. Aceste sisteme joacă un rol esențial într-o varietate de

domenii, de la apărare și securitate națională la aviație civilă, navigație și meteorologie, oferind informații critice despre mediul înconjurător și contribuind la siguranța și eficiența operațiunilor în aceste domenii.

Avantajele sistemelor radar în impuls

Comparativ cu alte tipuri de radar, sistemele în impuls oferă mai multe avantaje, inclusiv:

- **Capacitatea de a detecta obiecte la distanțe mari** datorită emiterii de impulsuri de putere mare.
- **Precizie ridicată în determinarea distanței** prin utilizarea timpului de zbor al semnalului.
- **Imunitate sporită la interferențe** (mediu electromagnetic ostil) datorită utilizării unei game largi de frecvențe.
- **Capabilitatea de a opera în condiții meteo dificile**, cum ar fi ploaia, ceața sau ninsoarea.

2.2.3 Radiolocația cu undă continuă (CW – Continuous Wave)

Radiolocația cu undă continuă (CW) se distinge în peisajul sistemelor radar printr-o caracteristică fundamentală: emisia unui semnal continuu, **nemodulat în amplitudine**. Această abordare contrastează cu radiolocația în impulsuri, unde energia electromagnetică este emisă sub formă de impulsuri scurte, discrete. Această diferență fundamentală în modul de emisie a semnalului are implicații profunde asupra principiului de funcționare, a capabilităților și a domeniilor de aplicabilitate ale radarului CW.

Un sistem radar CW generează un semnal continuu de înaltă frecvență, care este radiat în spațiu prin intermediul antenei. Atunci când acest semnal întâlnește o țintă mobilă, frecvența undei reflectate suferă o modificare datorită **efectului Doppler**. Această modificare de frecvență, cunoscută sub denumirea de **frecvență Doppler**, este direct proporțională cu viteza radială a țintei, adică componenta vitezei țintei orientată de-a lungul liniei de vizibilitate dintre radar și țintă. Prin măsurarea cu precizie a frecvenței Doppler, radarul CW poate determina cu acuratețe viteza radială a țintei. Această capacitate de a măsura viteza face ca

radarele CW să fie potrivite pentru o serie de aplicații specifice, cum ar fi măsurarea vitezei vehiculelor, altimetria radar și radiolocația Doppler pentru studiul fenomenelor meteorologice.

Distincția dintre CW și radiolocația în impulsuri se manifestă la mai multe niveluri:

Emisia semnalului: Radarele CW se caracterizează prin emisia unui semnal continuu, neîntrerupt, în timp ce radarele în impulsuri emit trenuri de impulsuri scurte, separate de perioade de repaus. Această diferență fundamentală are implicații asupra consumului de energie, a complexității sistemului și a capacităților de detecție. Radarele CW au, în general, un consum de energie mai redus și o complexitate mai mică, dar pot avea dificultăți în a detecta ținte la distanțe mari sau în a discrimina între ținte apropiate.

Determinarea distanței: Radarele în impulsuri determină distanța până la țintă prin măsurarea timpului de zbor al impulsului, adică a timpului necesar impulsului pentru a parcurge distanța până la țintă și înapoi. Radarele CW simple, care emit un semnal continuu nemedulat, nu pot măsura direct distanța, ci doar viteza radială. Pentru a permite măsurarea distanței, se utilizează tehnici de modulație a frecvenței, cum ar fi modulația în frecvență cu undă continuă (FMCW).

Complexitatea: În general, radarele CW sunt mai simple din punct de vedere constructiv decât radarele în impulsuri, deoarece nu necesită generarea și procesarea de impulsuri de înaltă putere. Această simplitate se traduce printr-un cost mai redus și o fiabilitate mai mare.

Aplicații: Datorită caracteristicilor lor specifice, radarele CW sunt utilizate în principal pentru măsurarea vitezei radiale a țintelor, în timp ce radarele în impulsuri sunt utilizate pentru o gamă mai largă de aplicații, inclusiv detectarea, localizarea, urmărirea și clasificarea țintelor.

Pentru a extinde capacitățile radarelor CW și a le permite să măsoare și distanța până la țintă, se utilizează **tehnici de modulație a frecvenței**. Una dintre cele mai utilizate tehnici este modulația în frecvență cu undă continuă (FMCW). În FMCW, frecvența semnalului emis este variată continuu în timp, de obicei liniar sau

în trepte. Prin compararea frecvenței semnalului recepționat cu cea a semnalului emis la momentul recepției, se poate determina timpul de zbor al semnalului și, implicit, distanța până la țintă. Această tehnică permite radarelor CW să măsoare atât viteza radială, cât și distanța până la țintă, extinzându-le domeniul de aplicabilitate.

Radarele CW prezintă o serie de **avantaje** care le fac atractive în anumite aplicații:

Simplitate și cost redus: Radarele CW sunt relativ simple din punct de vedere constructiv, având un număr mai mic de componente și o complexitate redusă a circuitului electronic. Aceasta se traduce printr-un cost de producție mai mic și o mentenanță mai ușoară.

Consum redus de energie: Datorită faptului că emit un semnal continuu de putere relativ mică, radarele CW au un consum de energie mai redus decât radarele în impulsuri, ceea ce le face potrivite pentru aplicații cu autonomie limitată sau cu restricții de consum energetic.

Măsurare precisă a vitezei: Radarele CW oferă o măsurare precisă a vitezei radiale a țintelor, datorită utilizării efectului Doppler. Această capacitate le face potrivite pentru aplicații care necesită o măsurare precisă a vitezei, cum ar fi controlul traficului rutier sau altimetria radar.

Imunitate la bruijul în impulsuri: Radarele CW sunt mai puțin sensibile la bruijul în impulsuri decât radarele în impulsuri, deoarece semnalul continuu emis nu este afectat în mod semnificativ de impulsurile de bruij.

Pe lângă avantajele, radarele CW prezintă și o serie de **dezavantaje** care trebuie luate în considerare:

Incapacitatea de a măsura direct distanța (în cazul radarelor CW simple): Radarele CW simple, care emit un semnal continuu nemedulat, nu pot măsura direct distanța până la țintă, ci doar viteza radială. Această limitare poate fi depășită prin utilizarea tehnicilor de modulație a frecvenței, cum ar fi FMCW.

Sensibilitate la clutter: Radarele CW pot fi mai sensibile la clutter decât radarele în impulsuri, deoarece semnalul continuu emis poate fi reflectat de o varietate de obiecte staționare sau cu mișcare lentă, cum ar fi clădiri, vegetație sau precipitații. Acest lucru poate îngreuna detectarea și urmărirea țintelor mobile în medii aglomerate.

Dificultăți în detectarea țintelor staționare: Radarele CW sunt mai puțin eficiente în detectarea țintelor staționare, deoarece nu se produce o deplasare Doppler în cazul acestora. Această limitare face ca radarele CW să fie mai puțin potrivite pentru aplicații cum ar fi cartografierea terenului sau detectarea obiectelor staționare.

Radarele CW își găsesc **aplicabilitate** într-o varietate de domenii, printre care:

Măsurarea vitezei vehiculelor: Radarele CW sunt utilizate pe scară largă pentru măsurarea vitezei vehiculelor, în aplicații precum controlul traficului rutier și radarele de viteză utilizate de poliție. Aceste radare emit un semnal continuu către vehiculele în mișcare și măsoară deplasarea Doppler a semnalului reflectat pentru a determina viteza.

Altimetre radar: Radarele CW pot fi utilizate și în altimetre radar pentru a măsura altitudinea unei aeronave față de sol. Aceste altimetre emit un semnal continuu în jos și măsoară timpul necesar semnalului reflectat de sol pentru a se întoarce la receptor, permițând calcularea altitudinii.

Detectarea mișcării: Radarele CW pot fi utilizate pentru a detecta mișcarea în diverse aplicații, cum ar fi sistemele de alarmă și senzorii de prezență. Aceste sisteme detectează mișcarea prin analiza modificărilor în semnalul radar reflectat de obiectele în mișcare.

Radiolocație Doppler: Radarele CW sunt utilizate în radiolocația Doppler pentru a studia mișcarea norilor, precipitațiilor și a altor fenomene meteorologice. Aceste radare emit un semnal continuu către formațiunile meteorologice și analizează deplasarea Doppler a semnalului reflectat pentru a determina viteza și direcția vântului.

Aplicații industriale: Radarele CW își găsesc aplicabilitate și în diverse aplicații industriale, cum ar fi măsurarea nivelului lichidelor în rezervoare, detectarea obiectelor pe benzile transportoare și monitorizarea proceselor industriale.

Radiolocația cu undă continuă (CW) reprezintă o tehnică distinctă în domeniul radiolocației, cu aplicații specifice în măsurarea vitezei și detectarea mișcării. Deși prezintă anumite limitări, cum ar fi incapacitatea de a măsura direct distanța în cazul radarelor CW simple, această tehnică oferă o serie de avantaje, cum ar fi simplitatea, consumul redus de energie și precizia în măsurarea vitezei. Selecția acestei tehnici pentru o anumită aplicație trebuie să se bazeze pe o analiză atentă a cerințelor specifice și a caracteristicilor sistemului radar.

2.2.4 Radiolocația monoimpuls

Radiolocația monoimpuls reprezintă o tehnică avansată în domeniul sistemelor radar, utilizată pentru determinarea coordonatelor țintelor într-un singur impuls de semnal. Această metodă permite obținerea unor măsurători precise ale poziției țintelor (atât unghiulare, cât și de distanță) într-un timp extrem de scurt, fără a fi necesare mai multe măsurători succesive, cum se întâmplă în cazul altor tehnici radar tradiționale. Principalele avantaje ale radiolocației monoimpuls sunt acuratețea ridicată în urmărirea țintelor și capacitatea de a reacționa rapid în condiții de mișcare dinamică a acestora, fiind folosită în special în aplicații militare și civile pentru detecția și urmărirea țintelor în mișcare rapidă.

2.2.4.1 Principii Funcționale ale Radiolocației Monoimpuls

Radiolocația monoimpuls funcționează pe baza unui sistem radar special conceput pentru a determina coordonatele țintelor într-un singur impuls de semnal. Acest sistem utilizează o configurație de antenă direcțională sau cu loburi multiple, capabilă să recepționeze semnalele reflectate de ținte din mai multe unghiuri simultan. Astfel, în loc să fie necesare multiple rotații ale antenei pentru a colecta informațiile necesare determinării poziției unei ținte, în radiolocația monoimpuls se colectează datele relevante pentru calcularea poziției unghiulare a țintei într-o singură rotație a antenei.

Un alt principiu esențial al radiolocației monoimpuls este măsurarea diferențelor de amplitudine și fază ale semnalului reflectat, care sunt folosite pentru a calcula unghiurile de azimut și înălțare ale țintei. Aceasta permite radarului să localizeze ținta într-o manieră extrem de rapidă și precisă. Această metodă este deosebit de eficientă în condiții de medii aglomerate sau de mișcare rapidă a țintelor, unde alte tehnici radar ar putea întâmpina dificultăți din cauza erorilor acumulate prin multiple măsurători.

2.2.4.2 Tipuri de Semnale Utilizate în Radiolocația Monoimpuls

În cadrul radiolocației monoimpuls, semnalele utilizate sunt concepute pentru a permite determinarea precisă a poziției țintelor. Cele mai frecvent utilizate tipuri de semnale sunt cele de amplitudine și fază, fiecare având rolul său specific în procesul de localizare a țintelor.

Semnalele de amplitudine sunt utilizate pentru a determina direcția țintei prin compararea amplitudinii semnalului reflectat pe două canale separate ale antenei. Aceste semnale sunt utile pentru determinarea coordonatelor unghiulare ale țintei, în special azimutul, prin analiza diferenței de intensitate a semnalului între canalele de recepție. Diferite valori ale amplitudinii reflectate permit calcularea unghiului sub care ținta este detectată de către radar, iar semnalele de amplitudine sunt esențiale pentru evaluarea direcției țintei fără a fi necesară o rotație completă a antenei.

Semnalele de fază, pe de altă parte, sunt folosite pentru a măsura cu precizie unghiurile de azimut și înălțare ale țintelor. Diferențele de fază între semnalele reflectate de la diverse elemente ale antenei permit determinarea cu exactitate a direcției din care provine semnalul reflectat. Această metodă este foarte precisă, însă sensibilitatea la anumite perturbări ale semnalului, precum interferențele sau bruiatul, poate afecta performanța sa. În ciuda acestor sensibilități, semnalele de fază sunt extrem de utile în determinarea poziției precise a țintelor într-un interval foarte scurt de timp.

Pentru a spori precizia și eficiența sistemului, multe sisteme radar monoimpuls folosesc **semnale hibride**, adică o combinație între semnalele de amplitudine și cele de fază. Prin combinarea acestor două tipuri de semnale,

sistemul radar poate obține o măsurătoare mult mai precisă a poziției țintelor, având avantajul de a compensa eventualele erori ale fiecărui tip de semnal în parte.

2.2.4.3 Determinarea Coordonatelor prin Metoda Amplitudinii și Fazei

Determinarea coordonatelor țintelor în radiolocația monoimpuls se realizează prin analiza semnalelor de amplitudine și fază, fiecare metodă având un rol specific în calcularea poziției unghiulare. Aceste tehnici permit identificarea rapidă și precisă a unghiurilor de azimut și înălțare ale țintei într-un singur impuls de semnal.

Metoda de amplitudine implică compararea amplitudinii semnalelor reflectate de țintă pe canale diferite ale antenei. Diferențele de amplitudine între semnalele primite permit determinarea unghiului de azimut al țintei, iar prin utilizarea unui algoritm adecvat, se poate calcula cu precizie direcția în care se află ținta. Această metodă are avantajul de a fi rapidă și eficientă, fiind utilă mai ales în condiții de mișcare rapidă a țintelor.

Metoda de fază se bazează pe măsurarea diferențelor de fază între semnalele reflectate de la diferite părți ale antenei. Aceasta permite determinarea unghiului de înălțare al țintei, având o precizie mai mare decât metoda de amplitudine în ceea ce privește coordonatele verticale. Diferențele de fază permit o măsurare fină a poziției țintei, iar datorită sensibilității ridicate a acestei metode, poate oferi rezultate precise chiar și în condiții de medii electromagnetice complexe.

În combinație, aceste două metode oferă o soluție completă pentru determinarea poziției precise a țintelor, fără a fi necesare multiple măsurători succesive. Rezultatul este o măsurare rapidă și precisă a coordonatelor țintelor, esențială pentru aplicațiile radar în domeniul militar și în sistemele de apărare aeriană.

2.2.4.4 Canalele în Radiolocației Monoimpuls

Radiolocația monoimpuls este o tehnologie avansată utilizată pentru determinarea precisă a poziției și direcției unei ținte prin utilizarea simultană a mai multor canale de recepție. Printre **canalele folosite în radiolocația monoimpuls** se numără canalul de sumă (SUM), canalul diferențial de azimut (AZ), canalul

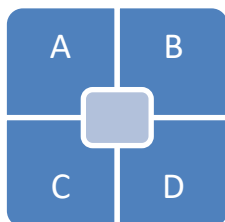
diferențial de elevație (DEL) și canalul auxiliar (AUX). Aceste canale lucrează împreună pentru a furniza informații precise despre locația și mișcarea țintei, reducând erorile și maximizând performanța sistemului radar.

Canalul de sumă (SUM) este canalul principal al sistemului monoimpuls, responsabil pentru colectarea semnalului total reflectat de țintă. Acesta este utilizat pentru a determina distanța față de țintă și pentru a asigura un raport semnal-zgomot optim. Semnalul SUM este rezultatul adunării coerente a semnalelor recepționate de la toate antenele radarului, oferind astfel o imagine clară și de mare precizie a poziției țintei.

Canalul diferențial de azimut (DAZ) este utilizat pentru a estima deviația unghiulară a țintei în plan orizontal față de axa principală a radarului. Acesta funcționează prin compararea fazelor și amplitudinilor semnalelor recepționate de elementele antenei radar dispuse pe orizontală. Prin utilizarea acestui canal, sistemul poate determina cu o precizie ridicată poziția azimutală a țintei, ceea ce este esențial pentru urmărirea și interceptarea obiectivelor mobile.

Canalul diferențial de elevație (DEL) are un rol similar cu DAZ, dar operează în plan vertical. Acest canal furnizează informații despre unghiul de elevație al țintei față de radar. Prin analizarea diferențelor de fază și amplitudine între semnalele primite de elementele antenei dispuse pe verticală, radarul poate determina altitudinea exactă a țintei. Canalul DEL este foarte important în aplicațiile aeronautice și de apărare, unde precizia altitudinală este esențială.

Considerând că împărțim antena în 4 zone distincte (A, B, C, D), și utilizând **inele hibride (Figura3: Obținerea canalelor utilizând inele hibride** ca element constructiv, putem exprima cele 3 canale (SUM, DAZ, DEL) în relațiile:



$$\begin{aligned}\Sigma &= A + B + C + D \\ \text{DEL} &= (A + B) - (C + D) \\ \text{DAZ} &= (A + C) - (B + D)\end{aligned}$$

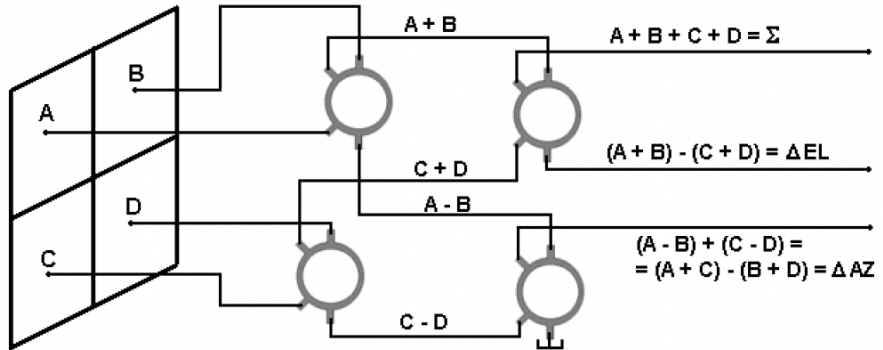


Figura3: Obținerea canalelor utilizând inele hibride

Canalul auxiliar (AUX) este utilizat pentru diverse funcții adiționale și pentru a asigura redundanța sistemului radar. Acest canal poate fi folosit pentru monitorizarea zgomotului de fond, pentru identificarea interferențelor sau pentru alte funcții auxiliare care contribuie la creșterea preciziei și fiabilității sistemului. De asemenea, canalul AUX poate fi folosit în scopuri de calibrare, permițând ajustarea fină a sistemului pentru a menține o precizie optimă în timp.

Interacțiunea dintre aceste canale permite radarului monoimpuls să furnizeze informații precise despre poziția și mișcarea țintelor, chiar și în condiții dificile de mediu sau în prezența interferențelor. Prin combinarea inteligentă a semnalelor din canalele SUM, DAZ, DEL și AUX, sistemele radar moderne pot detecta, urmări și clasifica ținte cu un grad ridicat de precizie și fiabilitate. Această tehnologie joacă un rol esențial în domenii precum apărarea aeriană, navigația maritimă și supravegherea terestră.

2.2.4.5 Avantajele Radiolocației Monoimpuls

Unul dintre principalele avantaje ale radiolocației monoimpuls este **viteză de reacție**. Sistemul este capabil să măsoare rapid coordonatele țintelor, ceea ce este esențial pentru urmărirea țintelor în mișcare rapidă. De asemenea, prin utilizarea tehnicii monoimpuls, se reduce semnificativ timpul necesar pentru a detecta și urmări țintele, comparativ cu tehnicile tradiționale de urmărire a țintelor care presupun mai multe rotații ale antenei și măsurători succesive. Un alt avantaj important este **precizia**. Radiolocația monoimpuls permite măsurarea exactă a unghiurilor de azimut și înălțare ale țintelor într-un singur impuls de semnal, ceea

ce contribuie la o urmărire mai precisă și mai fiabilă a țintelor. Acest sistem este, de asemenea, mai puțin susceptibil la erori generate de condițiile de mediu, cum ar fi bruiatul activ sau interferențele din spectrul electromagnetic.

Radiolocația monoimpuls este o tehnologie avansată, care adresează nevoile moderne ale sistemelor radar, oferind soluții eficiente pentru urmărirea rapidă și precisă a țintelor, esențială în domeniile apărării și supravegherii aeriene.

2.2.5 Sisteme moderne de radiolocație

2.2.5.1 Radarul cu vedere peste orizont,

Cunoscut și sub denumirea de **OTH radar (Over-the-Horizon Radar)/ BTH radar (Beyond-the-Horizon Radar)**, reprezintă un sistem radar avansat care permite detecția și urmărirea obiectelor aflate dincolo de linia orizontului vizibil. Acest tip de radar se bazează pe utilizarea undelor electromagnetice, care, în loc să fie limitate la propagarea directă până la orizont, sunt reflectate de diverse straturi ale atmosferei, în special de **ionosferă**. Această metodă permite radarului să depășească limita vizibilității directe și să monitorizeze zone extinse ale spațiului aerian și maritim.

Principiul fundamental al radarului OTH se bazează pe fenomenul de **împrăștiere ionosferică** a undelor radio. Undele emise de radar sunt direcționate spre ionosferă, iar acestea sunt reflectate și captate de receptorul radarului. Astfel, radarul OTH poate detecta obiecte aflate la distanțe mult mai mari decât ar permite limitările unui radar convențional, care este restricționat la linia de vedere directă.

Radarul OTH poate fi clasificat în două tipuri principale: radarul bazat pe reflexia ionosferică și radarul bazat pe reflexia de la sol. Primul tip de radar utilizează ionosfera pentru a reflecta undele radio la distanțe mari, iar al doilea se bazează pe reflexia undelor de la suprafața Pământului. Deși ambele tehnici permit detecția la distanțe mari, radarul bazat pe reflexia ionosferică este cel mai utilizat pentru supravegherea globală, având o acoperire mult mai largă. Aplicațiile radarului OTH sunt variate și includ în principal **supravegherea aeriană** și **supravegherea maritimă**. În domeniul militar, acest tip de radar joacă un rol esențial în detectarea avioanelor sau a rachetelor balistice, oferind un sistem de

avertizare timpurie. De asemenea, radarul OTH este folosit în monitorizarea vaselor aflate în largul mării, având un impact semnificativ în gestionarea traficului maritim și în securitatea națională.

Totuși, radarul OTH se confruntă cu anumite provocări, precum **variabilitatea ionosferică și interferențele atmosferice**, care pot afecta precizia semnalului. Aceste variabilități pot determina erori în determinarea poziției țintelor, iar corectarea acestora necesită tehnologii avansate de procesare a semnalelor.

2.2.5.2 Radarul Cognitiv

Radarul cognitiv este o inovație recentă în domeniul tehnologiei radar, care îmbină **inteligența artificială (IA)** și **învățarea automată (machine learning)** pentru a îmbunătăți performanțele sistemului radar. Principiul fundamental al radarului cognitiv este capacitatea acestuia de a **învăța** din mediul său operațional și de a se **adapta** în mod dinamic la schimbările care apar în acest mediu. Această adaptabilitate permite radarului cognitiv să optimizeze în permanență parametrii săi de funcționare, ceea ce duce la o **detecție mai rapidă, mai precisă și mai fiabilă** a țintelor. Un radar cognitiv funcționează pe baza unui ciclu continuu de percepție, învățare și decizie. În prima etapă, radarul percepe mediul în care operează, analizând semnalele de la ținte și surse de interferență. În continuare, prin aplicarea tehnicilor de învățare automată, sistemul învață modelele de comportament ale țintelor și ale mediului, astfel încât să poată identifica rapid orice schimbare sau anomalie. În final, radarul ia decizii în timp real despre modul în care să își ajusteze parametrii de funcționare (de exemplu, frecvența, puterea semnalului, durata impulsului), pentru a maximiza performanța și a reduce riscurile de erori sau pierderi de date.

Unul dintre principalele avantaje ale radarului cognitiv este capacitatea sa de a **reduce semnificativ erorile** care pot apărea în medii complexe, în care există multe surse de bruij sau de interferențe. De exemplu, radarul cognitiv poate învăța să identifice și să elimine semnalele false generate de bruij sau de clutter, concentrându-se doar pe țintele relevante. Acest lucru permite radarului să fie extrem de eficient în medii dense și dinamic schimbătoare, cum ar fi zonele de conflict militar sau condițiile meteorologice extreme.

Aplicațiile radarului cognitiv sunt variate și includ **apărarea aeriană, controlul traficului aerian, automobilele autonome și supravegherea meteorologică**. În domeniul militar, radarul cognitiv este folosit pentru a îmbunătăți eficiența sistemelor de apărare, prin detectarea și urmărirea țintelor în condiții de bruijă masivă sau în fața unor tactici de camuflaj sofisticate. În sectorul civil, tehnologia radarului cognitiv este folosită în vehiculele autonome pentru a detecta și a urmări obstacolele sau alte vehicule din trafic, contribuind astfel la siguranța și eficiența transportului. Totuși, implementarea radarului cognitiv vine cu provocări semnificative. Aceasta necesită **resurse de calcul avansate**, deoarece procesarea și analiza datelor în timp real necesită putere de calcul mare. De asemenea, integrarea algoritmilor de învățare automată în sistemele radar trebuie să fie realizată cu o mare precizie, deoarece orice eroare în învățarea și adaptarea sistemului poate conduce la pierderi de performanță sau la decizii greșite.

Atât radarul cu vedere peste orizont, prin utilizarea reflexiilor ionosferice pentru supravegherea la distanțe mari, cât și radarul cognitiv, cu capacitatea sa de adaptare dinamică la medii de operare complexe, sunt exemple de tehnologii moderne care transformă modul în care sunt realizate operațiunile de detecție și urmărirea a țintelor în diverse domenii, de la apărare la aplicații civile. Aceste tehnologii reprezintă viitorul radiolocației, îmbunătățind semnificativ precizia, eficiența și adaptabilitatea sistemelor radar.

2.3 Protecția împotriva Bruiajului

2.3.1 Introducere în bruiaj și contramăsuri

Bruiajul este orice tip de interferență electromagnetică care afectează performanțele unui sistem radar, împiedicându-l să detecteze ținte în mod eficient. Bruiajul poate fi generat intenționat, de obicei în scopuri de **război electronic**, sau poate fi un fenomen natural, cum ar fi **clutter-ul**. Împotriva acestuia, sistemele radar trebuie să implementeze contramăsuri eficiente pentru a păstra performanțele în condiții de mediu perturbate. Bruiajul poate fi împărțit în mai multe categorii, fiecare având particularitățile sale și cerințe diferite de abordare pentru a proteja radarul de impactul acestuia:

Bruiajul activ: reprezintă orice tip de interferență electromagnetică generată în mod deliberat pentru a perturba funcționarea unui radar. Acesta este, de obicei, emis de sisteme electronice destinate să confunde sau să dezorienteze radarul advers. Bruiajul activ poate fi realizat prin **transmițătoare de bruiaj**, care emit semnale de intensitate mare, care se suprapun cu semnalele radarului, reducând semnalul de la ținta dorită și făcându-l greu de detectat. Tipurile de bruiaj activ includ:

- **Bruiajul de tip "spot":** Se emite un semnal pe o frecvență specifică, care interferează cu semnalul radarului pe aceleași frecvențe, blocând astfel capacitatea radarului de a detecta ținta.
- **Bruiajul de tip "barrage":** Se emite un semnal continuu pe o gamă largă de frecvențe, acoperind întreaga bandă de frecvență radar, astfel perturbând întreaga gamă de detecție a radarului.

Spre deosebire de bruiajul activ, **bruiajul pasiv** nu presupune emiterea unor semnale pentru a interfera cu radarul. Acesta apare atunci când obiectele sau suprafețele din mediul înconjurător reflectă semnale care perturbă semnalul radarului. Clutter-ul de sol și de mare, precum și reflecțiile din atmosferă, sunt exemple de bruiaj pasiv. În cazul bruiajului pasiv, radarul trebuie să fie capabil să distingă între semnalele utile și cele reflectate care nu provin de la ținte reale.

Bruiajul prin clutter (clutter-ul) este o formă specifică de bruiaj pasiv care apare din reflecțiile semnalului radar de la obiecte sau suprafețe care nu sunt ținte. De exemplu, **clutter-ul de sol** provine din reflexiile semnalelor de la relieful terestru, structuri de mari dimensiuni sau vegetație, iar **clutter-ul maritim** se referă la reflexiile semnalului de la undele de suprafață ale apei. Clutter-ul poate masca semnalele venite de la țintele adevărate, făcând dificilă identificarea acestora, mai ales în condiții de medii complexe sau atunci când ținta are o dimensiune mică sau se află aproape de sursa de clutter.

2.3.1.1 Impactul Bruiajului asupra Detecției Radar

Bruiajul are un impact semnificativ asupra performanței unui radar, întrucât interferențele electromagnetice reduc capacitatea radarului de a detecta și de a urmări corect țintele. Acest impact poate fi observat în mai multe moduri:

- **Reducerea semnalului de detectare** - bruiajul activ sau pasiv reduce semnalul util care ajunge la receptorul radarului. În cazul bruiajului activ, semnalele emise de sistemele de bruiaj pot suprascrie semnalele reflectate de țintă, făcând imposibilă detectarea acestora. În cazul bruiajului pasiv, clutter-ul poate umple frecvențele radarului cu semnale de fond, astfel încât semnalele de la țintă sunt mascate.
- **Creșterea ratelor de false alarme** - bruiajul poate duce la apariția unui număr mare de false alarme, unde radarul detectează semnale care nu provin de la ținte reale. Aceste alarme false pot submina eficiența sistemului radar și pot duce la erori în procesul decizional al operatorilor. De exemplu, în medii aglomerate, clutter-ul poate genera alarme care pot fi confundate cu ținte reale, iar radarul nu va putea diferenția între semnalele de interes și semnalele false.
- **Scăderea acurateții măsurărilor** - bruiajul afectează și precizia măsurărilor efectuate de radar, mai ales în ceea ce privește determinarea poziției și vitezei țintelor. Interferențele pot distorsiona semnalul radarului, ceea ce duce la erori în estimarea unghiurilor, distanței și vitezei țintei. Aceste erori sunt amplificate în condiții de bruiaj intens, în special atunci

când radarul trebuie să opereze într-un mediu dens cu multe surse de interferență.

- **Dificultăți în urmărirea țintelor** - bruiajul poate cauza pierderi de urmărire a țintelor. Radarul se poate pierde în fața unui semnal de bruiaj puternic și poate nu reuși să reconstruiască traiectoria țintei, mai ales în cazurile în care ținta se află în apropierea surselor de bruiaj sau clutter. Acest lucru este deosebit de problematic în scenariile militare, unde urmărirea continuă a țintelor este esențială pentru luarea deciziilor tactice.

Bruiajul reprezintă o amenințare semnificativă pentru performanțele sistemelor radar, afectând acuratețea, fiabilitatea și eficiența acestora. Identificarea și implementarea unor **contramăsuri eficiente** sunt esențiale pentru protejarea radarului împotriva impactului bruiajului. Contramăsurile includ tehnici de **filtrare adaptivă**, **deteția semnalelor utile în fața interferențelor** și **optimizarea algoritmilor de urmărire** pentru a minimiza erorile cauzate de bruiaj. De asemenea, radarul trebuie să fie echipat cu **tehnologii avansate de procesare a semnalelor**, care să permită diferențierea între semnalele de clutter și cele care provin de la țintele reale.

2.3.2 Efectul Doppler și selecția țintelor mobile

Efectul Doppler se referă la schimbarea frecvenței sau lungimii de undă a unui semnal emis de o sursă în mișcare, observată de un receptor aflat într-un loc diferit față de sursa respectivă. Acest fenomen se aplică și în radiolocație, unde undele electromagnetice emise de un radar sunt reflectate de obiecte în mișcare, iar frecvența semnalului reflectat va fi diferită față de frecvența semnalului emis, în funcție de direcția și viteza obiectului. În radiolocație, efectul Doppler este folosit pentru a determina **viteza radiale** a unei ținte, adică viteza cu care aceasta se apropie sau se depărtează de radar.



Figura 4: Efectul Doppler (negativ în partea stângă, pozitiv în partea dreaptă)

Când o țintă se apropie de observator/ radar (**Figura 4**), semnalul reflectat va avea o frecvență mai mare decât semnalul emis (aceasta este cunoscută sub denumirea de **shift pozitiv Doppler**). În schimb, când ținta se depărtează de observator/ radar, frecvența semnalului reflectat va fi mai mică decât frecvența emisă (cunoscută ca **shift negativ Doppler**). Acest principiu este extrem de util pentru determinarea **vitezei țintelor** în mișcare, în special pentru **aplicațiile radarului Doppler**. Acesta poate fi utilizat pentru a distinge între obiectele cu mișcare lentă și obiectele staționare.

Aplicații ale Efectului Doppler în Radiolocație

Măsurarea vitezei țintelor: Radarul Doppler poate măsura viteza unei ținte prin analiza schimbării frecvenței semnalului reflectat. Aceasta este utilizată în special pentru detectarea și urmărirea aeronavelor, vehiculelor sau altor obiecte în mișcare rapidă. **Detectia și urmărirea țintelor mobile:** Radarul Doppler este folosit pentru a urmări traiectoria țintelor mobile, precum avioanele, rachetele și navele, pentru a estima direcția și viteza acestora:

$$f_D = \frac{2 * v}{\lambda} * \cos \alpha$$

unde:

- f_D este frecvența Doppler (în Hz)
- v este viteza avionului (în m/s)
- λ este lungimea de undă (în m)
- α este unghiul între direcția de emisie/recepție a semnalelor și direcția de zbor a avionului

În combinație cu alte tehnologii radar, efectul Doppler ajută la stabilirea cu precizie a poziției și vitezei unui obiect. **Aplicații în controlul traficului aerian:** Radarul Doppler este esențial pentru monitorizarea și gestionarea traficului aerian, deoarece poate detecta și urmări avioanele în mișcare, chiar și în condiții de vizibilitate redusă.

Selecția țintelor mobile (SȚM), cunoscută sub denumirea de **Moving Target Indicator (MTI)**, reprezintă o tehnică esențială utilizată în sistemele radar pentru a distinge obiectele aflate în mișcare de fundalul staționar. Această metodă este

extrem de importanță pentru aplicații militare, de supraveghere și navigație, deoarece permite identificarea și urmărirea țintelor mobile, cum ar fi aeronavele, vehiculele terestre și navele maritime, în timp ce elimină ecourile parazite provenite de la teren sau alte obiecte fixe. Principiul de funcționare al MTI se bazează pe compararea fazei semnalelor radar reflectate la momente de timp diferite. Deoarece obiectele aflate în mișcare determină o schimbare de fază a semnalului reflectat, sistemul MTI poate detecta aceste variații și poate filtra semnalele statice. Un element esențial al acestei tehnici este **utilizarea filtrului Doppler**, care analizează schimbările de frecvență cauzate de mișcarea relativă a țintei față de radar. Un avantaj major al tehnologiei MTI este capacitatea sa de a reduce ecourile provenite de la suprafețe fixe, cum ar fi solul, clădirile și apa. Acest lucru este realizat prin utilizarea unor circuite de anulare a ecourilor staționare, care compară semnalele succesive și elimină informațiile care nu prezintă modificări semnificative de fază sau amplitudine.

Există mai multe tipuri de **implementări MTI**, inclusiv sistemele bazate pe pulsuri coerente și cele bazate pe pulsuri necoerente. Sistemele coerente utilizează o referință de fază stabilă pentru a măsura cu precizie schimbările de frecvență, în timp ce sistemele necoerente folosesc metode statistice pentru a identifica mișcarea țintelor. Deși tehnologia MTI oferă numeroase beneficii, aceasta prezintă și anumite limitări. De exemplu, atunci când viteza relativă a țintei este foarte mică sau apropiată de zero, detectarea poate deveni dificilă. În plus, ecourile provenite de la ținte multiple pot interfera între ele, ceea ce poate duce la erori de interpretare. Pentru a îmbunătăți performanța MTI, se utilizează tehnologii avansate, cum ar fi radarul Doppler cu pulsuri multiple și algoritmi de procesare digitală a semnalului. Aceste tehnici permit o detectare mai precisă și reducerea erorilor cauzate de zgomotul de fundal sau de interferențe.

Așadar, selecția țintelor mobile prin tehnologia MTI joacă un rol esențial în domeniul radiolocației, oferind posibilitatea de a urmări și identifica obiectele în mișcare cu un grad ridicat de precizie. Dezvoltarea continuă a algoritmilor și a tehnologiilor de prelucrare a semnalelor contribuie la îmbunătățirea constantă a performanțelor acestor sisteme radar.

Eliminarea Țintelor False prin Analiza Spectrului Semnalului - În orice sistem radar, o provocare majoră o reprezintă **eliminarea Țintelor false**, cum ar fi semnalele provenite din **clutter-ul de sol**, reflexiile de la structuri mari sau alte obiecte care nu reprezintă ținte reale. În acest context, analiza spectrului semnalului reflectat joacă un rol esențial în **discriminarea** între semnalele valide (provenite de la ținte reale) și semnalele false (provenite de la obiecte neinteresante).

Metode de Filtrare și Analiză a Semnalului

Filtrare Doppler: Utilizarea analizei Doppler pentru a diferenția între semnalele care provin de la ținte mobile și cele care provin din clutter-ul de sol sau alte surse statice. Obiectele staționare sau cu mișcare lentă nu vor genera un efect Doppler semnificativ, iar radarul poate filtra aceste semnale pentru a se concentra doar pe țintele aflate în mișcare. Aceasta permite radarului să **elimine semnalele false** generate de obiecte care nu se deplasează sau care se deplasează la viteze foarte mici. **Procesarea semnalului în frecvență:** Semnalele de clutter, în special cele generate de sol sau mare, au caracteristici de frecvență distincte față de semnalele provenite de la țintele mobile. Utilizând tehnici de procesare în frecvență, radarul poate identifica și separa semnalele care provin de la obiecte mobile de cele care provin din clutter-ul static. Acest lucru permite radarului să se concentreze asupra Țintelor care se află în mișcare.

Filtrarea semnalului în timp real: Radarul poate implementa tehnici de filtrare a semnalelor pe baza parametrilor de **timp și viteză**. Analizând timpul de întoarcere al semnalelor și schimbările frecvenței, radarul poate decide care dintre semnalele reflectate sunt valabile pentru detecția Țintelor și care provin din surse false. **Algoritmi de discriminare a Țintelor:** Utilizarea algoritmilor avansați de **semnal** permite radarului să aplice filtre mai precise și să analizeze spectrul semnalului reflectat în mai multe dimensiuni (frecvență, timp, viteză), identificând astfel doar acele semnale care corespund caracteristicilor Țintelor reale. Algoritmii de **selecție a Țintelor** pot discrimina între obiectele de interes (de exemplu, avioane, nave) și semnalele false, reducând semnificativ numărul de alarme false.

Beneficiile Analizei Spectrului Semnalului

Reducerea alarmei false: Prin filtrarea semnalelor care nu corespund caracteristicilor unei ținte mobile, radarul poate reduce semnificativ numărul de alarme false, ceea ce îmbunătățește eficiența sistemului. **Îmbunătățirea preciziei:** Analiza spectrului semnalului și utilizarea tehnicilor de filtrare ajută la **creșterea acurateții** măsurătorilor de poziție și viteză ale țintelor, chiar și în medii aglomerate sau de bruiaj. **Supraveghere mai eficientă:** Radarul poate urmări mai multe ținte simultan, eliminând efectele de clutter și concentrându-se pe țintele relevante. Aceasta este esențială pentru aplicațiile de **supraveghere a traficului aerian** sau în **operațiunile militare**, unde monitorizarea rapidă și precisă a țintelor este esențială.

Efectul Doppler este esențial în radiolocație pentru a măsura viteza și direcția țintelor în mișcare. Utilizarea acestui principiu permite radarelor să distingă între țintele reale și clutter-ul sau semnalele false. Prin analiza spectrului semnalului reflectat și aplicarea tehnicilor de filtrare Doppler, radarul poate elimina eficient țintele false și poate asigura o detecție precisă și fiabilă a țintelor, chiar și în condiții de medii aglomerate sau de bruiaj.

2.3.3 Metode de protecție împotriva bruiajului activ

Bruiajul activ reprezintă o amenințare persistentă pentru sistemele radar, cu potențialul de a degrada semnificativ performanța acestora. Acest tip de bruiaj se manifestă prin emisia deliberată de semnale electromagnetice puternice, cu scopul de a masca țintele de interes sau de a induce în eroare sistemul radar. Pentru a contracara efectele negative ale bruiajului activ și a asigura o funcționare robustă în medii ostile, se utilizează o varietate de metode de protecție, printre care se numără filtrarea adaptivă, tehnicile ECCM (Electronic Counter-Countermeasures) și implementarea radarului monoimpuls.

Filtrarea adaptivă este o tehnică avansată de procesare a semnalului, care permite ajustarea dinamică a caracteristicilor filtrului în funcție de caracteristicile semnalului de intrare. În contextul radiolocației, filtrarea adaptivă se dovedește a fi un instrument valoros în combaterea bruiajului activ. Prin analiza spectrală a semnalului de intrare, filtrul adaptiv identifică componentele spectrale care corespund bruiajului și își ajustează caracteristicile pentru a le atenua selectiv.

Această adaptabilitate permite filtrului să elimine eficient bruiajul, chiar și în situațiile în care caracteristicile bruiajului se modifică în timp.

Tehnicile ECCM reprezintă un arsenal vast de metode concepute pentru a contracara bruiajul activ și a spori robustețea sistemelor radar în medii cu interferențe electromagnetice intense. Aceste tehnici abordează problema bruiajului din diverse perspective, exploatând o varietate de principii și tehnologii. Printre cele mai utilizate tehnici ECCM se numără schimbarea frecvenței de operare a radarului, utilizarea unor forme de undă complexe, diversitatea de frecvență și diversitatea spațială. Schimbarea frecvenței de operare permite evitarea bruiajului concentrat pe anumite frecvențe, în timp ce formele de undă complexe, cum ar fi impulsurile cu modulație de frecvență, sunt mai rezistente la bruiaj. Diversitatea de frecvență presupune transmiterea semnalului radar pe mai multe frecvențe simultan, reducând probabilitatea ca toate frecvențele să fie afectate de bruiaj. Diversitatea spațială utilizează mai multe antene de recepție, permițând compararea semnalelor recepționate și identificarea direcției din care provine bruiajul. De asemenea, tehnicile de procesare adaptivă a semnalului, cum ar fi filtrarea adaptivă și formarea fasciculului adaptiv, permit radarului să se adapteze dinamic la condițiile de bruiaj și să își mențină o performanță acceptabilă.

Implementarea radarului monoimpuls oferă o soluție eficientă pentru reducerea impactului bruiajului activ. Această tehnică radar se bazează pe utilizarea unui singur impuls pentru a determina coordonatele unghiulare ale unei ținte, prin compararea semnalelor recepționate de mai multe fascicule ale antenei. Radarul monoimpuls prezintă o capacitate de discriminare spațială superioară, putând distinge între semnalele provenite din direcții diferite și permițând identificarea și atenuarea bruiajului direcționat. De asemenea, radarul monoimpuls este mai puțin sensibil la bruiajul cu lobi laterali, care exploatează lobi secundari ai antenei radar pentru a crea semnale false. Protecția împotriva bruiajului activ este o cerință esențială pentru a garanta funcționarea eficientă a sistemelor radar în medii ostile. Filtrarea adaptivă, tehnicile ECCM și implementarea radarului monoimpuls reprezintă metode valoroase în reducerea impactului bruiajului activ și în îmbunătățirea performanței radarului. Selecția metodelor de protecție optime depinde de o serie de factori, inclusiv de caracteristicile sistemului radar, de tipul de bruiaj întâlnit și de cerințele specifice ale aplicației.

2.4 Aplicații teoretico-practice

2.4.1 Probleme de calcul și aplicații

2.4.1.1 Exerciții privind ecuația radiolocației

Ecuația radiolocației este un instrument fundamental în analiza și proiectarea sistemelor radar. Aceasta stabilește o relație matematică între puterea semnalului recepționat (P_r), puterea semnalului transmis (P_t), câștigul antenei de transmisie (G_t), aria efectivă a antenei de recepție (A_e), suprafața efectivă de reflexie (SER) a țintei (σ) și distanța până la țintă (R).

$$P_r = \frac{P_t * G_t * A_e * \sigma}{(4 * \pi)^2 * R^4}, \quad \text{respectiv} \quad R = \sqrt[4]{\frac{P_t * G_t^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_r * (4 * \pi)^3}}$$

Exerciții:

1. Un radar emite un semnal cu o putere de 1 kW și un câștig al antenei de 100. Aria efectivă a antenei de recepție este de 1 m², iar secțiunea transversală radar a țintei este de 10 m². Calculați puterea semnalului recepționat de la o țintă aflată la o distanță de 10 km.
2. Un radar are o putere de emisie de 100 kW, un câștig al antenei de 400 și o arie efectivă a antenei de recepție de 2 m². Dacă se dorește detectarea unei ținte cu o secțiune transversală radar de 1 m² la o distanță de 50 km, care este puterea minimă a semnalului recepționat necesară?
3. Un radar detectează o țintă la o distanță de 20 km cu o putere a semnalului recepționat de 1 μW. Dacă puterea de emisie a radarului este de 50 kW, câștigul antenei este de 250 și aria efectivă a antenei de recepție este de 1.5 m², calculați secțiunea transversală radar a țintei.

2.4.1.2 Probleme de determinare a coordonatelor țintelor

Determinarea coordonatelor țintelor (distanță, azimut, elevație) este o funcție esențială a sistemelor radar. Aceasta se realizează prin măsurarea timpului de zbor al semnalului radar, a unghiului de sosire a semnalului și a deplasării Doppler a frecvenței semnalului.

Probleme:

1. Un radar emite un impuls care se întoarce după 100 μ s. Care este distanța până la țintă?
2. Un radar detectează o țintă la o distanță de 30 km și un unghi de azimut de 30°. Care sunt coordonatele carteziane ale țintei în raport cu radarul?
3. Un radar măsoară o deplasare Doppler de 1 kHz pentru o țintă. Dacă frecvența de operare a radarului este de 10 GHz, care este viteza radială a țintei?
4. Un radar primar 2D ce folosește metoda de observare radial circulară are următorii parametri tehnico-tactici:
 - Puterea în impuls 1,5MW
 - Puterea minimă la receptor 10^{-2} pW
 - Frecvența de emisie 2GHz
 - Suprafața efectivă a antenei 10m²
 - Coef. de utilizare al perioadei 75%
 - Câștigul antenei G=100
 - $F_r=250$ Hz
 - $\tau=4$ μ s
 - $t_{recov}=1$ μ s
 - $\theta_e=45^\circ$
 - $\theta_\beta=3^\circ$
 - Viteza rotire antenă = 5 ture/min

Se cere:

- a. Să se scrie expresiile și să se calculeze D_{min} de acțiune și CSD;
- b. Să se determine care este capacitatea de separare în azimut, valoarea timpului de iradiere, valoarea vitezei unghiulare a antenei (rad/s) și numărul max de impulsuri reflectate întrun minut de la o țintă punctiformă;
- c. Considerând o țintă cu SER, $\sigma=1$ m², aflată la 200km față de radar și pornind de la deducerea ecuației radiolocației pentru radarul dat, să se

scrie expresiile și să se calculeze valorile densității de putere la țintă, puterii reflectate de țintă, densității de putere recepționate la antenă și puterii recepționate prelucrate de radar;

5. Deduceți expresia și calculați distanța de descoperire a unei ținte care evoluează la $H=1.600\text{m}$ considerând că antena stației este ridicată la o înălțime de 16m față de sol.

Aceste modele/ exemple de exerciții și probleme au scopul de a ilustra aplicarea principiilor radiolocației în rezolvarea unor situații concrete. Prin rezolvarea acestora, studenții își pot consolida cunoștințele și își pot dezvolta abilitățile de analiză și calcul în domeniul radiolocației.

2.4.2 Exemple aplicative

2.4.2.1 Integrarea stațiilor radar în sisteme de apărare aeriană

Stațiile radar se constituie într-un element fundamental al sistemelor moderne de apărare aeriană (vezi PATRIOT), având un rol esențial în asigurarea securității spațiului aerian. Acestea furnizează informații esențiale despre poziția, viteza, altitudinea și identitatea aeronavelor care traversează spațiul aerian monitorizat, permițând o evaluare precisă a situației aeriene și o reacție rapidă și eficientă la potențialele amenințări. Integrarea stațiilor radar în sistemele de apărare aeriană se realizează prin interconectarea acestora cu alte componente critice ale sistemului, precum centrele de comandă și control, sistemele de armament (rachete sol-aer, artilerie antiaeriană) și rețelele de comunicații. Această integrare permite o sinergie funcțională între diferitele componente, optimizând capacitatea de apărare aeriană.

Funcțiile stațiilor radar în sistemele de apărare aeriană:

Supraveghere: Stațiile radar au rolul de a monitoriza continuu spațiul aerian, scanând în permanență o zonă predefinită pentru a detecta și identifica toate aeronavele prezente, indiferent de tipul sau apartenența acestora. Informațiile obținute prin supraveghere radar sunt transmise în timp real către centrele de

comandă și control, unde sunt corelate cu datele de la alte senzori și cu informațiile din bazele de date, pentru a crea o imagine completă a situației aeriene.

Identificare: Pe lângă detectarea prezenței aeronavelor, stațiile radar au și capacitatea de a determina tipul și apartenența acestora. Acest proces de identificare se bazează pe analiza caracteristicilor semnalului radar reflectat de aeronavă, precum și pe corelarea informațiilor radar cu datele din bazele de date și cu informațiile obținute de la alte senzori, cum ar fi sistemele de interogare IFF (Identification Friend or Foe).

Urmărire: Odată ce o aeronavă a fost detectată și identificată, stația radar poate fi utilizată pentru a o urmări continuu, monitorizând în timp real poziția și viteza acesteia. Aceste informații sunt esențiale pentru a prevedea traiectoria aeronavei și a evalua potențialul de amenințare. Datele de urmărire sunt transmise către centrele de comandă și control, unde sunt utilizate pentru a lua decizii privind interceptarea sau neutralizarea țintelor aeriene.

Ghidarea interceptorilor: În cazul în care se decide interceptarea unei ținte aeriene, stațiile radar joacă un rol important în ghidarea aeronavelor de interceptare către țintă. Acestea furnizează informații precise despre poziția și viteza țintei, permițând aeronavelor de interceptare să se apropie de țintă în mod eficient și sigur.

Avertizare timpurie: Stațiile radar au o funcție critică în detectarea timpurie a amenințărilor aeriene, oferind un timp prețios pentru reacție. Această capacitate de avertizare timpurie permite activarea sistemelor de apărare, alertarea forțelor militare și luarea măsurilor necesare pentru protejarea populației și a infrastructurii critice.

Integrarea stațiilor radar cu alte componente ale sistemului de apărare aeriană permite crearea unei imagini cuprinzătoare și precise a situației din spațiul aerian, facilitând luarea deciziilor rapide și eficiente în situații critice. Această integrare permite o coordonare eficientă a acțiunilor de apărare aeriană și o optimizare a utilizării resurselor de apărare.

2.4.2.2 Studiu de caz: Protecția unui radar împotriva bruiajului activ într-un scenariu militar

Scenariu: Un radar de supraveghere aeriană, componentă cheie a unui sistem de apărare aeriană, este desfășurat într-un teatru de operațiuni caracterizat prin trăsături complexe și dinamice. Forțele inamice recurg la utilizarea bruiajului activ în încercarea de a perturba funcționarea radarului, de a împiedica detectarea aeronavelor proprii și de a degrada capacitatea de apărare aeriană.

Soluții de protecție: Pentru a contracara amenințarea reprezentată de bruiajul activ, se pot implementa o serie de măsuri de protecție, adaptate la specificul scenariului și la caracteristicile bruiajului: **Schimbarea frecvenței de operare:** O soluție eficientă constă în reconfigurarea radarului pentru a funcționa pe o frecvență diferită de cea bruiată de inamic. Această tehnică, denumită "frequency hopping" sau "săritură de frecvență", presupune schimbarea periodică a frecvenței de emisie, împiedicând inamicul să își concentreze bruiajul pe o singură frecvență. **Utilizarea unei forme de undă complexă:** O altă abordare constă în utilizarea unei forme de undă mai complexe, cum ar fi o formă de undă cu modulație de frecvență (FM) sau cu răspândire de spectru (spread spectrum). Aceste forme de undă sunt mai rezistente la bruiaj, deoarece energia semnalului este distribuită pe o bandă mai largă de frecvențe, îngreunând concentrarea bruiajului pe o anumită frecvență. **Diversitatea/ salt de frecvență:** Transmiterea simultană a semnalului radar pe mai multe frecvențe reprezintă o altă tehnică eficientă de reducere a impactului bruiajului. Această tehnică, denumită "diversitate de frecvență", reduce probabilitatea ca toate frecvențele de emisie să fie afectate simultan de bruiaj.

Diversitatea spațială: Utilizarea mai multor antene de recepție, plasate în locații diferite, permite compararea semnalelor recepționate și identificarea direcției din care provine bruiajul. Această tehnică, denumită "diversitate spațială", permite atenuarea bruiajului prin formarea de fascicule nule în direcția sursei de bruiaj. **Filtrarea adaptivă:** Implementarea unui filtru adaptiv reprezintă o soluție eficientă pentru identificarea și atenuarea selectivă a componentelor de bruiaj din semnalul recepționat. Filtrul adaptiv își ajustează dinamic caracteristicile în funcție de caracteristicile semnalului de intrare, permițând eliminarea eficientă a

bruiajului, chiar și în situațiile în care caracteristicile bruiajului se modifică în timp. **Radar monoimpuls:** Utilizarea unui radar monoimpuls poate contribui la reducerea vulnerabilității la bruiaj. Radarul monoimpuls determină coordonatele unghiulare ale unei ținte prin compararea semnalelor recepționate de mai multe fascicule ale antenei, oferind o discriminare spațială superioară și o sensibilitate redusă la bruiajul cu lobi laterali.

Protecția sistemelor radar împotriva bruiajului activ este esențială în contextul operațiunilor militare moderne, unde mediul electromagnetic este adesea contestat. Prin implementarea unor măsuri de protecție adecvate, cum ar fi cele prezentate în acest studiu de caz, se poate asigura funcționarea robustă a radarului și se pot obține informații precise despre situația aeriană, chiar și în prezența unui bruiaj activ intens. Alegerea soluțiilor de protecție optime trebuie să țină cont de o serie de factori, inclusiv de caracteristicile radarului, de tipul de bruiaj întâlnit și de cerințele specifice ale misiunii.

3 RĂZBOI ELECTRONIC

3.1 Introducere în Războiul Electronic

3.1.1 Definiții și domenii de aplicare

Războiul electronic (EW) reprezintă o dimensiune critică a confruntărilor militare moderne, extinzându-se dincolo de domeniul cinetic și angajând spectrul electromagnetic ca un câmp de luptă distinct. EW se definește ca totalitatea acțiunilor care vizează utilizarea spectrului electromagnetic pentru a controla acest spectru, pentru a degrada, neutraliza sau distruge capacitățile de luptă ale inamicului și pentru a proteja propriile sisteme de efectele acțiunilor similare întreprinse de adversar.

Rolul războiului electronic în apărare și ofensivă - EW joacă un rol dual în cadrul operațiunilor militare, contribuind atât la apărare, cât și la ofensivă. **În apărare**, EW vizează protejarea propriilor sisteme și capacități de luptă împotriva acțiunilor de război electronic ale inamicului. Aceasta include măsuri de protecție împotriva bruiajului, a decepției și a atacurilor electronice, precum și măsuri de asigurare a funcționării continue a sistemelor critice în prezența interferențelor electromagnetice. **În ofensivă**, EW vizează degradarea, neutralizarea sau distrugerea capacităților de luptă ale inamicului prin intermediul spectrului electromagnetic. Aceasta include utilizarea bruiajului pentru a perturba funcționarea sistemelor de comunicații, radar și navigație ale inamicului, precum și utilizarea decepției pentru a induce în eroare inamicul și a îi deteriora capacitatea de a lua decizii informate.

Categoriile de operațiuni: Operațiunile de război electronic pot fi clasificate în trei categorii principale:

- **ECM (Electronic Countermeasures):** Măsuri electronice ofensive care vizează degradarea, neutralizarea sau distrugerea capacităților de luptă ale inamicului. Acestea includ bruiajul, decepția și atacul electronic.

- **ECCM (Electronic Counter-Countermeasures):** Măsuri electronice defensive care vizează protejarea propriilor sisteme de efectele acțiunilor ECM ale inamicului. Acestea includ tehnicile de reducere a vulnerabilității la bruiaj, de detectare și localizare a surselor de bruiaj și de menținere a funcționării sistemelor în prezența bruiajului.
- **ESM (Electronic Support Measures):** Măsuri electronice de colectare a informațiilor despre emisiile electromagnetice ale inamicului. Aceste informații pot fi utilizate pentru a identifica tipul și locația emițătoarelor inamice, pentru a evalua capacitățile de război electronic ale inamicului și pentru a planifica operațiuni ECM și ECCM eficiente.

3.1.2 Domenii de aplicare:

Războiul electronic are un impact semnificativ asupra tuturor domeniilor de operare militară, inclusiv:

- **Spațiul aerian:** EW este esențial pentru controlul spectrului electromagnetic în spațiul aerian, pentru protejarea aeronavelor de bruiaj și pentru perturbarea sistemelor radar și de comunicații ale inamicului.
- **Spațiul maritim:** EW joacă un rol important în protejarea navelor de bruiaj și în perturbarea sistemelor de navigație și de comunicații ale navelor inamice.
- **Spațiul terestru:** EW este utilizat pentru a proteja forțele terestre de bruiaj și pentru a perturba comunicațiile și coordonarea forțelor inamice.
- **Spațiul cyber:** EW se extinde și în spațiul cyber, unde sunt utilizate tehnici de atac și apărare cibernetică pentru a perturba sau proteja sistemele informatice și rețelele de comunicații.

Războiul electronic reprezintă o componentă esențială a operațiunilor militare moderne, având un impact profund asupra modului în care se desfășoară confruntările militare. Cunoașterea principiilor și tehnicilor de război electronic este esențială pentru toți militarii, indiferent de arma sau specialitatea lor.

3.2 Tehnici de bruiaj și protecție

3.2.1 Contramăsuri Electronice (ECM)

Contramăsurile electronice (ECM) reprezintă măsurile desfășurate în scopul destabilizării sistemului electronic al adversarului. Acest lucru presupune un set de acțiuni îndreptate spre prevenirea sau reducerea utilizării efective de către adversar a spectrului electromagnetic.

Componentele ECM sunt:

- bruiajul;
- dezinformarea electronică;
- distrugerea fizică a sistemelor și echipamentelor electronice ale adversarului.

Bruiajul, o componentă de bază a războiului electronic, reprezintă o acțiune deliberată menită să degradeze, să neutralizeze sau să distrugă capacitățile sistemelor electronice ale adversarului, prin intermediul emisie de energie electromagnetică. Bruiajul poate fi clasificat în două categorii principale: bruiaj activ și bruiaj pasiv, fiecare cu caracteristici și metode de implementare specifice.

Bruiajul activ se caracterizează prin emisia deliberată de semnale electromagnetice cu scopul de a interfera cu funcționarea sistemelor electronice ale adversarului. Aceste semnale pot fi generate de o varietate de surse, de la emițătoare terestre sau aeriene la dispozitive portabile. Bruiajul activ poate fi direcționat către o anumită țintă sau poate acoperi o zonă mai largă, în funcție de scopul urmărit. Există diverse metode de bruiaj activ, printre care se numără:

- **Bruiajul de tip spot:** Această metodă se concentrează pe bruierea unei singure frecvențe sau a unui interval îngust de frecvențe, utilizate de un anumit sistem electronic. Bruiajul de tip spot este eficient împotriva sistemelor care operează pe frecvențe fixe sau predictibile, cum ar fi anumite tipuri de radare sau sisteme de comunicații.
- **Bruiajul de tip „barrage”:** Această metodă utilizează un spectru larg de frecvențe pentru a brui simultan mai multe sisteme electronice. Bruiajul de tip barrage este eficient împotriva sistemelor care operează pe o gamă largă

de frecvențe sau care își schimbă frecvența de operare, îngreunând adaptarea bruiajului la frecvența utilizată de sistemul țintă.

- **Bruiajul cu semnal fals:** Această metodă utilizează semnale false, similare cu cele utilizate de sistemul electronic țintă, pentru a induce în eroare sau a satura sistemul. Bruiajul cu semnal fals poate fi utilizat pentru a crea ținte false pe ecranele radar, pentru a perturba sistemele de navigație sau pentru a bloca comunicațiile.

Exemple practice de bruiaj electronic:

- Bruiajul sistemelor radar de supraveghere aeriană, pentru a împiedica detectarea aeronavelor;
- Bruiajul sistemelor de comunicații militare, pentru a perturba coordonarea forțelor și transmiterea informațiilor;
- Bruiajul sistemelor de navigație prin satelit (GNSS - Global Navigation Satellite System), pentru a dezorienta forțele inamice sau a le împiedica să utilizeze arme ghidate cu precizie;
- Bruiajul sistemelor de control de la distanță a UAV-urilor, pentru a le neutraliza sau a le captura.

Bruiajul pasiv se bazează pe utilizarea unor materiale sau dispozitive care reflectă sau absorb energia electromagnetică, fără a emite semnale proprii. Bruiajul pasiv este mai puțin eficient decât cel activ, dar are avantajul de a fi mai dificil de detectat. Exemple de bruiaj pasiv includ:

- **Reflectoare radar (chaff):**benzi subțiri de material conductor care reflectă undele radar, creând ecouri false pe ecranele radar;
- **Absorbanți radar:** materiale care absorb energia undelor radar, reducând semnalul reflectat de o țintă. Aceste materiale sunt utilizate în construcția aeronavelor de tip „stealth” pentru a le face mai dificil de detectat;
- **Capcane termice (flares):**dispozitive care emit radiații în infraroșu pentru a dezorienta rachetele cu ghidare în infraroșu.

Dezinformarea electronică reprezintă radiația intenționată, alterarea, absorbția sau reflexia energiei electromagnetice în scopul de a induce în eroare

adversarul în procesul de interpretare sau în utilizarea informațiilor recepționate de sistemele sale electronice.

Dezinformarea electronică poate fi de două tipuri:

- manipulativă care implică alterarea sau simularea semnalelor electromagnetice din canalele proprii în scopul de a obține înșelarea;
- imitativă care presupune introducerea radiațiilor care imită o emisie ostilă în interiorul canalelor de recepție ale adversarului.

Distrușgerea fizică a sistemelor și echipamentelor electronice presupune suprimarea fizică (scoaterea din funcțiune) a mijloacelor și sistemelor electronice ale adversarului. Exemple în această direcție sunt utilizarea armelor cu energie dirijată, lovirea cu încărcături nucleare a centrelor de comandă sau distrușgerea subsistemului de emisie al unui radar cu ajutorul rachetelor anti-radiolocație.

3.2.2 Contra-Contramăsurile Electronice (ECCM)

Contra-contramăsurile electronice (ECCM - Electronic Counter-Countermeasures) reprezintă un ansamblu de tehnici și strategii utilizate pentru a proteja sistemele radar de efectele bruiajului activ și de alte forme de interferență electromagnetică. În contextul utilizării radarelor în medii complexe și de mare risc, ECCM se aplică pentru a asigura integritatea semnalului radar, prevenind compromiterea capacității de detecție și urmărire a țintelor de către bruiajul inamic.

O caracteristică esențială a ECCM este că acestea sunt implementate în structura mijloacelor și sistemelor electronice încă din faza de proiectare, spre deosebire de sistemele ECM care sunt distincte față de sistemul de bază și a căror funcționare este guvernată de reguli specifice, care nu sunt adiacente nici unui alt sistem electronic. Confruntarea dintre ECM și ECCM reprezintă o competiție pentru resurse, în sensul că nu există echipamente și sisteme electronice care să nu poată fi neutralizate și nici măsuri ECM care să nu poată fi contracarate. De asemenea, această confruntare este reglementată de principiul imaginii în oglindă, ceea ce înseamnă că pentru a spori eficiența măsurilor ECM sau ECCM, trebuie să se presupună că disponibilitatea informațiilor și tehnologiei adversarului este cel puțin

la fel de bună sau chiar superioară celei proprii, ceea ce favorizează dezvoltarea și intensificarea spiritului de competiție în găsirea unor soluții tehnice cât mai avansate.

Funcțiile ECCM	Sisteme folosite
În domeniul spațial	<ul style="list-style-type: none"> • antene cu un nivel al lobilor laterali redus • compensarea lobilor laterali • sisteme de antene mono impuls • rețele de antene
În domeniul spectrului de frecvențe	<ul style="list-style-type: none"> • sisteme LPI • sisteme cu salt de frecvență • sisteme cu spectru împărțiat • filtrare
În domeniul temporal	<ul style="list-style-type: none"> • compresia semnalelor • PAF (Passive Adaptive Frequency-hopping) – comutare de frecvențe pasivă, adaptabilă • metoda „Dicke-Fix” de control al interferenței • modificarea frecvenței intermediare (IPF-Intermediate Power Frequency)

ECCM cuprinde în ansamblu:

- măsuri organizatorice;
- măsuri tehnice;
- măsuri de exploatare.

De asemenea, ECCM vizează:

- împiedicarea sau îngreunarea cercetării electronice efectuate de adversar;
- asigurarea stabilității lucrului mijloacelor și sistemelor electronice proprii în condiții de bruijaj;
- contracararea acțiunilor de dezinformare electronică ale adversarului;

- executarea controlului electronic ca mijloc de descoperire și eliminare a indicilor de demascare ai lucrului mijloacelor și sistemelor electronice proprii;
- asigurarea compatibilității electromagnetice.

Modalitățile de protecție a mijloacelor și sistemelor electronice contra ECM ale adversarului sunt:

- utilizarea unui sistem de antene cu nivel foarte redus al lobilor laterali;
- utilizarea compensării coerente pe lobi laterali;
- rețele de antene adaptive;
- selecția țintelor mobile;
- utilizarea sistemelor radar cu probabilitate de interceptare mică (LPI, Low Probability of Intercept);
- gestionarea spațio-temporală a puterii radarului.

Una dintre principalele metode de **protecție a radarului activ împotriva bruiajului activ** este utilizarea radarului monoimpuls. Această tehnologie avansată permite determinarea simultană a coordonatelor unghiulare ale țintelor, utilizând semnale cu frecvențe foarte precise și un flux rapid de procesare a datelor. Radarul monoimpuls se bazează pe compararea semnalelor reflectate de țintă prin mai multe canale de recepție, ceea ce face posibilă urmărirea țintelor fără a fi nevoie de rotații complete ale antenei. Prin utilizarea acestei tehnici, radarul devine mai puțin vulnerabil la efectele bruiajului activ, întrucât nu depinde de rotațiile antenei pentru a colecta informațiile despre țintă, ci analizează în timp real semnalele reflectate pentru a determina poziția țintei. Aceasta reduce semnificativ timpul în care radarul este expus la interferențele generate de bruiajul activ, având un rol important în menținerea unei acuratețe ridicate de detecție în condiții de bruiaj intens.

Un alt aspect esențial al contramăsurilor electronice este **selectarea semnalelor utile într-un mediu electromagnetic complex**, unde există multiple surse de interferență, inclusiv bruiaj activ și clutter. În aceste condiții, radarul trebuie să fie capabil să facă distincția între semnalele relevante, provenite de la țintele reale, și semnalele false, provenite de la sursele de bruiaj. Tehnicile de

filtrare avansată, cum ar fi **analiza Doppler** și **procesarea semnalului pe frecvențe multiple**, permit radarului să identifice semnalele utile în mijlocul interferențelor. Prin utilizarea algoritmilor de **învățare automată** și **analiză spectrală**, radarul poate să îmbunătățească selecția semnalelor utile și să elimine eficient semnalele de bruij care nu corespund caracteristicilor unei ținte reale. Acest proces este esențial în mediile de război electronic, unde sistemele radar trebuie să opereze eficient chiar și în fața unor amenințări electronice sofisticate. Selectarea semnalelor utile devine astfel un factor cheie în asigurarea continuității funcționării radarului și în maximizarea performanțelor acestuia, chiar și în condiții de mediu perturbate sau de bruij puternic

Contramăsurile electronice (ECCM) sunt foarte importante pentru protecția radarelor și a sistemelor de război electronic împotriva bruijului activ și pentru asigurarea selectării semnalelor utile într-un mediu electromagnetic complex. Tehnologia radarului monoimpuls reprezintă un instrument eficient în acest sens, reducând vulnerabilitățile radarului la bruijul activ și îmbunătățind acuratețea detecției. În paralel, selectarea semnalelor utile prin tehnici avansate de procesare a semnalului contribuie semnificativ la menținerea performanței radarului chiar în fața interferențelor externe, asigurându-i astfel capacitatea de a funcționa eficient în cele mai dificile condiții.

3.3 Integrarea Războiului Electronic și Radiolocației

3.3.1 Supravegherea electronică

Acțiunile de război electronic se împart în trei categorii distincte: de atac electronic (bruijaj de diferite tipuri), de apărare electronică și de supraveghere electronică.

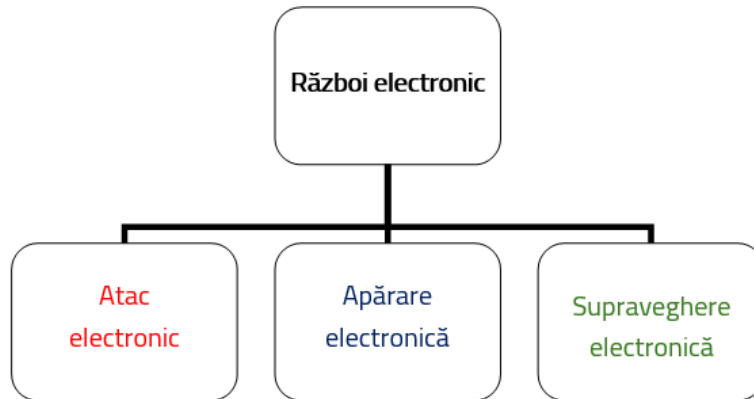


Figura 5: Componentele războiului electronic

Componentele majore ale războiului electronic se transpun în măsuri de sprijin electronic (ESM, Electronic Support Measures), contramăsuri electronice (ECM, Electronic Counter Measures) și contra-contramăsuri electronice (ECCM, Electronic Counter-Counter Measures). Toate cele trei componente necesită sprijinul din partea supravegherii electronice. Domeniile radiolocație și război electronic nu pot fi analizate separat. În timp ce RE are un caracter preponderant ofensiv, radiolocația vine în sprijinul aviației și structurilor de apărare aeriană cu rachete prin furnizarea de date precise și în timp real despre evoluția țintelor în zbor. În același timp, atunci când se ia în calcul o abordare defensivă, o problemă foarte sensibilă a devenit gestionarea sistemelor de supraveghere electronică, nu numai în armată, ci și în mediul civil. Aceste sisteme trebuie să funcționeze neîntrerupt (24/7) în mod corespunzător, la capacitate maximă și într-un mediu securizat.

Fără rezultatele și produsele informative obținute prin supraveghere electronică nu se pot executa eficient acțiuni de apărare electronică și, mult mai

important, nu se pot identifica ținte ale atacului electronic executat împotriva adversarului cu forțele și mijloacele specifice proprii.

SIGINT (Signal Intelligence) presupune obținerea de date și informații din prelucrarea semnalelor și are următoarele componente importante: **ELINT (Electronic Intelligence)**, care presupune culegerea datelor din echipamentele altele decât cele de comunicații, și **COMINT (Communications Intelligence)**, care înseamnă obținerea de date și informații din prelucrarea semnalelor de comunicații (care transmit un mesaj care poate fi recepționat de factorul uman). Informațiile furnizate de SIGINT sunt de natură analitică și nu sunt obținute în timp real. Beneficiarii produselor informative SIGINT se situează pe nivele ierarhice superioare iar activitatea în sine are un caracter strategic.

COMINT reprezintă cercetarea derivată din comunicațiile potențial ostile, altele decât sursele de radiație ale adversarului.

Prin intermediul ELINT este cercetat orice tip de sisteme radar (terestru, naval, de bord, pentru conducerea focului etc.) care sunt detectate, localizate și identificate pe baza semnăturii radar a acestora în toate modurile lor de funcționare (descoperire, urmărire sau tragere). Semnătura radar conține în structura sa o serie de caracteristici de bază ale sistemelor de radiolocație, ca frecvența de repetiție a impulsurilor (PRF, Pulse Repetition Frequency), durata impulsurilor, frecvența de emisie, tipul de modulație utilizat etc., care permit o identificare precisă a acestora.

Datele primare ELINT pot fi obținute prin:

- cercetare directă, prin care semnalele sunt memorate și analizate în scopul identificării modului de funcționare specific și performanțelor fiecărui subsistem din componența echipamentului electronic advers;
- monitorizare regulată prin care pot fi evaluate nivelul tehnologic și mai ales, schimbările survenite în strategia unei potențial adversar.

Funcțiile ELINT vizează:

- determinarea EOB (Electronic Order of Battle), sau a situației electronice a adversarului în scopul populării unei biblioteci de

amenințări proprii complexe și utilizării acestora de către echipamentele ESM și ECM proprii;

- obținerea informațiilor privitoare la planificarea atacurilor specific, care vor permite identificarea modului de acțiune și de desfășurare a sistemelor ECM proprii optim în scopul neutralizării sau suprimării sistemelor electronice ale adversarului.

Supravegherea electronică implică monitorizarea și analiza mediului electromagnetic pentru a detecta și evalua semnalele emise de surse interne și externe. În contextul integrării războiului electronic cu radiolocația, acest proces devine un instrument important pentru protejarea sistemelor radar și a altor echipamente de comunicații de potențiale amenințări, cum ar fi bruiajul sau emițătoarele inamice.

Supravegherea electronică permite nu doar identificarea surselor de bruiaj, dar și localizarea și monitorizarea emițătoarelor adversarilor, oferind informații valoroase despre intențiile și activitățile inamicilor. Acest tip de monitorizare este deosebit de important în operațiile militare, unde eficiența sistemelor de radiolocație și comunicații este vitală pentru succesul misiunilor. Unul dintre obiectivele principale ale supravegherii electronice este **identificarea și clasificarea surselor de bruiaj**. Bruiajul este orice tip de interferență electromagnetică care afectează funcționarea unui radar, a unui sistem de comunicații sau a altor echipamente electronice, iar detectarea acestuia într-un stadiu timpuriu este esențială pentru protejarea sistemelor proprii.

Sursele de bruiaj pot fi clasificate în două mari categorii:

- **Bruiaj activ:** Acesta provine de la emițătoare de semnale destinate să perturbe sau să interfereze cu semnalele radarului. Sursele de bruiaj activ sunt de obicei sistematice și emise de echipamente militare care urmăresc să blocheze sau să falsifice semnalele radarului, făcându-le greu de detectat sau de procesat;
- **Bruiaj pasiv (clutter):** Acesta provine din reflexiile semnalelor radarului de la obiectele din mediu, cum ar fi clădiri, vegetație, sol sau apă. Deși nu sunt intenționate să interfereze cu radarul, aceste semnale pot cauza un **fundal** de semnale false care împiedică radarul să detecteze țintele relevante.

În procesul de **identificare a surselor de bruij**, supravegherea electronică implică utilizarea de tehnici avansate de analiză spectrală și de **filtrare digitală** pentru a separa semnalele utile de cele false. Prin **monitorizarea continuă a spectrului electromagnetic**, echipamentele de supraveghere pot detecta semnalele de bruij și pot evalua sursele acestora, determinând dacă sunt de natură adversă sau naturală.

Un alt rol important al supravegherii electronice este **localizarea emițătoarelor adversarilor**. Localizarea precisă a surselor de bruij activ sau a emițătoarelor inamice reprezintă un avantaj strategic important în războiul electronic și în operațiile de apărare aeriană. Detectarea și localizarea emițătoarelor adverse permite nu doar protejarea propriilor sisteme radar și de comunicații, dar și întreprinderea de acțiuni de **contramăsuri electronice (ECM)**. Procesul de localizare a emițătoarelor inamice se realizează de obicei prin:

- **Triangulație:** Aceasta presupune utilizarea a două sau mai multe stații de recepție a semnalelor emițătoarelor inamice. Prin măsurarea unghiurilor semnalului detectat de fiecare stație, se poate calcula locația precisă a emițătorului;
- **Analiza semnalului:** Pe lângă triangulație, analiza semnalelor poate furniza informații suplimentare despre caracteristicile emițătorului, precum **frecvența, puterea și tipul semnalului**. Aceste informații sunt folosite pentru a distinge între diferitele tipuri de emițătoare inamice și pentru a înțelege destinația acestora;
- **Utilizarea echipamentelor de direcționare a antenei:** În anumite cazuri, echipamentele de recepție pot fi direcționate către sursa semnalului detectat, iar analiza semnalului în timp real poate oferi o localizare precisă a emițătorului inamic.

Localizarea emițătoarelor inamice joacă un rol important în cadrul **războiului electronic**, deoarece permite forțelor proprii să aplice măsuri de **contramăsuri electronice (ECM)**, pentru a neutraliza sau a dezactiva emițătoarele adversarului, protejând astfel propriile sisteme radar și de război electronic. În plus,

poate contribui la **coordonarea atacurilor** asupra surselor de bruiaj, reducând efectele acestora asupra acțiunilor propriu în desfășurare.

Supravegherea electronică, prin identificarea și localizarea surselor de bruiaj și a emițătoarelor adverse, contribuie la protecția sistemelor radar și de război electronic împotriva interferențelor. Prin utilizarea tehnicilor avansate de **analiză spectrală** și **triangulație**, este posibilă localizarea precisă a surselor de bruiaj și aplicarea contramăsurilor electronice eficiente, garantând astfel succesul operațiilor militare și protecția infrastructurii critice. Integrarea cu radiolocația permite o apărare mai eficientă și mai fiabilă în fața amenințărilor moderne actuale.

3.3.2 Aplicații militare

Aplicațiile militare ale integrării radiolocației și războiului electronic sunt esențiale pentru asigurarea unui avantaj tactic și strategic în condiții de conflict modern, unde superioritatea informațională și tehnologică poate face diferența în succesul operațiunilor. Combinarea eficientă a echipamentelor radar și a tehnologiilor de război electronic permite forțelor armate să protejeze propriile sisteme și să neutralizeze capacitățile adversarilor, asigurând o detectare rapidă și o reacție precisă la amenințările emergente.

Un exemplu relevant al utilizării integrate a echipamentelor radar și de război electronic poate fi observat în cadrul operațiunilor militare moderne, unde echipamentele radar sunt folosite nu doar pentru detectarea țintelor, ci și pentru a sprijini activitățile de război electronic. În astfel de scenarii, **radarele de supraveghere** și **radarele de detecție activă** sunt combinate cu **sisteme de bruiaj** și **sisteme de interceptare a semnalelor** pentru a perturba sau neutraliza semnalele inamice. De exemplu, în cadrul unui conflict, un radar ar putea detecta mișcarea unei aeronave inamice, iar simultan, echipamentele de război electronic ar fi activitate pentru a bruia semnalele radarelor inamice sau pentru a aplica tehnici de **contramăsuri electronice (ECCM)** pentru a proteja propriul radar de bruiajul advers. Prin **integrarea radarului cu sistemele de război electronic**, forțele armate pot obține o imagine mai clară și mai detaliată a situației de luptă. Aceste tehnologii combinate permit nu doar o detecție mai rapidă a amenințărilor, dar și o reacție mai eficientă, având în vedere capacitatea de a contracara bruiajul advers și de a proteja comunicațiile critice.

În cadrul sistemelor de apărare integrate NATO, optimizarea tehnicilor de apărare presupune utilizarea combinată a echipamentelor radar și a sistemelor de război electronic pentru a crea o apărare multi-stratificată. NATO beneficiază de un sistem de **supraveghere a spațiului aerian** bazat pe radare avansate, care sunt conectate în rețele globale pentru a oferi o acoperire constantă și pentru a permite monitorizarea activă a tuturor zonelor de interes. Aceasta este susținută de sisteme de război electronic care asigură protecția radarului și a altor sisteme critice de comunicații împotriva bruiajului inamic.

Optimizarea acestora se face prin **integrarea datelor** provenite de la diferite tipuri de radare și echipamente de război electronic, creând astfel o rețea de informații care poate fi analizată în timp real și adaptată în funcție de evoluția situației de luptă. În plus, **tehnologiile de război electronic** sunt folosite pentru a proteja rețelele de comunicație și control ale NATO, astfel încât orice încercare de a perturba aceste rețele prin bruiaj sau interferențe să fie contracarată rapid. În contextul operațiunilor NATO, optimizarea tehnicilor de apărare presupune, de asemenea, dezvoltarea unor **algoritmi avansați de procesare a semnalului** și utilizarea unor **tehnici de învățare automată**, care pot îmbunătăți selecția semnalelor utile, filtrarea semnalelor false și identificarea rapidă a țintelor inamice într-un mediu complex de război electronic.

Aplicațiile militare ale integrării echipamentelor radar și de război electronic sunt esențiale pentru eficiența operațiunilor de apărare. Prin utilizarea combinată a radarelor avansate și a sistemelor de război electronic, forțele armate pot detecta și urmări țintele, protejând în același timp propriile echipamente de bruiajul inamic. În cadrul sistemelor integrate NATO, aceste tehnologii permit optimizarea tehnicilor de apărare, asigurând o reacție rapidă și precisă în fața amenințărilor emergente.

4 Pregătirea pentru Examenul scris și Prezentarea lucrării de licență

4.1 Structura examenului

Examenul de licență este de principiu structurat în părți principale: **întrebări teoretice** și **probleme practice**, pentru a evalua atât cunoștințele teoretice, cât și capacitatea de aplicare a acestora în scenarii practice, testând astfel competențele dobândite în cadrul disciplinei.

Întrebările teoretice vor verifica înțelegerea și asimilarea principiilor fundamentale ale radiolocației și războiului electronic. Acestea vor include subiecte precum:

- Explicarea principiilor de funcționare ale radarelor cu vedere peste orizont (OTH) și radarului cognitiv.
- Definirea și descrierea diferențelor dintre tipurile de radiolocație: activă și pasivă.
- Analiza și aplicarea ecuației radiolocației în condiții specifice.
- Compararea radarelor primare și secundare, subliniind aplicațiile acestora.
- Explicarea conceptului de **război electronic** și principiile contramăsurilor electronice (ECCM).
- Identificarea și clasificarea surselor de bruij și impactul acestora asupra detecției radarului.

Secțiunea de **probleme practice** va solicita aplicarea cunoștințelor teoretice pentru rezolvarea unor scenarii concrete. Acestea pot include:

- Calculul distanței și unghiului unei ținte folosind ecuația radiolocației.
- Determinarea coordonatelor unghiulare ale unei ținte mobile, aplicând principiul Doppler.
- Utilizarea tehnicii radarului monoimpuls pentru reducerea erorilor de bruij.

- Rezolvarea unui scenariu de bruij activ, identificând și filtrând semnalele false dintr-o sesiune de monitorizare radar.
- Aplicații de identificare a semnalelor utile într-un mediu de bruij complex.

Pregătirea pentru examen va presupune:

- **Revizuirea conceptelor teoretice** esențiale, în special cele referitoare la principiile de funcționare ale radarelor și tehnologiilor de război electronic.
- **Exersarea problemelor practice** prin simularea unor scenarii de examen, pentru a consolida abilitățile de aplicare a teoriei.
- **Înțelegerea aplicațiilor practice ale radarelor** în domeniul supravegherii aeriene, apărării antiaeriene și protecției împotriva bruijului.
- **Studiul unor studii de caz** pentru a aplica soluțiile teoretice în situații complexe și pentru a răspunde eficient la întrebările examenului.

Prin această abordare, pregătirea va asigura o înțelegere completă a subiectelor și o capacitate de aplicare eficientă a cunoștințelor în cadrul examenului de licență.

4.2 Sfaturi pentru o prezentare de succes

Pentru a susține o prezentare de succes într-un cadru academic sau profesional, **utilizarea unui limbaj tehnic corect** reprezintă unul dintre cei mai importanți factori. Limbajul tehnic nu doar că reflectă cunoștințele de specialitate ale celui care prezintă, dar și capacitatea de a comunica clar și precis concepte complexe într-un mod accesibil și adecvat audienței. În acest sens, este esențial ca termenii tehnici și conceptele de specialitate să fie folosiți corect, fără abateri de la definițiile standardizate sau utilizarea termenilor ambigui. De asemenea, atunci când sunt introduse noi concepte sau termeni tehnici, aceștia trebuie definiți în mod clar, pentru a asigura înțelegerea completă a audienței. Un limbaj tehnic corect presupune și evitarea jargonului inutil, care ar putea crea confuzie, optând în schimb pentru explicații clare și concise, susținute de exemple aplicate, atunci când este necesar. În plus, coerența terminologică pe parcursul prezentării este esențială pentru a păstra un flux logic și pentru a facilita urmărirea argumentației. Utilizarea unui limbaj tehnic adecvat și corect nu doar că sporește credibilitatea

prezentatorului, dar contribuie și la consolidarea înțelegerii subiectului de către audiență, facilitând astfel un dialog eficient și productiv.

Gestionarea stresului este un aspect esențial pentru o prezentare de succes, având în vedere că, în mod inevitabil, emoțiile și presiunea pot afecta performanța. Stresul, în cantități mici, poate stimula concentrarea și motivarea, însă atunci când devine copleșitor, poate duce la blocaje, pierderea încrederii în propriile abilități și incapacitatea de a transmite eficient informațiile. Un aspect fundamental al gestionării stresului înainte și în timpul unei prezentări este **pregătirea temeinică**. Cunoașterea profundă a subiectului, exersarea prezentării și anticiparea posibilelor întrebări contribuie la creșterea încrederii și la reducerea nivelului de anxietate. În plus, tehnicile de **respirație profundă** și **relaxare musculară** pot ajuta la reducerea tensiunii acumulate în corp, promovând un control mai bun asupra emoțiilor. De asemenea, **vizualizarea succesului** reprezintă o metodă psihologică eficientă pentru a reduce stresul, prin anticiparea unui rezultat pozitiv. Imaginându-ne cum vom răspunde cu încredere și calm la întrebări, putem ajuta la diminuarea temerilor și la creșterea stimei de sine. O altă tehnică utilă este **acceptarea stresului ca parte din proces**, recunoscând că este normal să resimți o anumită tensiune într-o situație de prezentare. Acest tip de abordare poate transforma stresul într-un aliat al performanței, în loc să îl percepem ca pe o piedică. În ansamblu, gestionarea eficientă a stresului presupune pregătire, auto acceptare și aplicarea unor tehnici de relaxare, care vor asigura o prezentare coerentă și o comunicare clară a ideilor.

Structurarea răspunsurilor este un alt element esențial al unei prezentări de succes, deoarece permite transmiterea clară și logică a ideilor. Un răspuns bine structurat va ajuta auditorul să urmărească și să înțeleagă mai ușor argumentele și concluziile prezentate. O structură clasică, dar eficientă, presupune utilizarea unui **introducere clar definite**, care să prezinte tema principală, urmată de o **expunere detaliată** a subiectului și încheiată cu o **concluzie relevantă** care să sintetizeze ideile-cheie. Introducerea trebuie să fie concisă și să stabilească obiectivele prezentării, oferind un cadru pentru discuțiile ce urmează. Expunerea trebuie să fie organizată logic, fiecare punct să fie dezvoltat și susținut cu exemple sau date relevante, iar ideile să fie legate între ele printr-un raționament coerent. Concluzia trebuie să rezume esențialul discuției, subliniind punctele forte și oferind o

încheiere care să lase o impresie puternică asupra audienței. Această structură logică nu doar că va facilita înțelegerea, dar va și ajuta la **gestionarea timpului** alocat fiecărei secțiuni, asigurându-se că toate aspectele importante sunt acoperite eficient. De asemenea, un răspuns structurat ajută la **controlul discursului**, prevenind rătăcirea de la subiect și menținând un flux constant al ideilor. În prezentările interactive sau în cadrul unui examen, structura răspunsurilor va contribui la transmiterea unei imagini de profesionalism și va demonstra claritatea gândirii și abilitatea de a organiza informațiile într-un mod eficient.

Pentru o prezentare de succes, este esențială utilizarea unui **limbaj tehnic corect**, care să fie precis și coerent, facilitând înțelegerea de către audiență. Gestionarea stresului, prin tehnici de relaxare și pregătire adecvată, ajută la menținerea unui control asupra emoțiilor și la îmbunătățirea performanței. De asemenea, **structurarea răspunsurilor** într-o formă clară și logică asigură o prezentare coerentă, care ajută la transmiterea eficientă a ideilor și la captarea atenției audienței. Toate aceste elemente, atunci când sunt aplicate corect, vor contribui semnificativ la succesul prezentării, atât în cadrul examenului, cât și în orice situație profesională.

BIBLIOGRAFIE

1. M.ALEXANDRU,D.FECIORU, *Bazele radiolocației*, Academia Forțelor Aeriene, Brașov, 2002.
2. B.MARINESCU, *Principiile Radiolocației*, 2011
3. Gh. ARDELEAN, ș.a., *Principii și sisteme de radiolocație - partea I*, Academia Militară, București, 1983.
4. S.VEGHES, *Supravegherea prin radiolocație în acțiunile militare*, București, 2003.
5. Gh. ARDELEAN, *Radiolocația și aplicațiile ei*, Editura tehnică, București, 1987.
6. E.NICOLAU, ș.a., *Manualul inginerului electronist- vol. II*, Editura tehnică, București, 1985.
7. Gh. RULEA, *Radiolocație*, Editura didactică și pedagogică, București, 2000.
8. Merrill, SKOLNIK, *Radar Handbook, ed. a 3-a*, New York, McGraw Hill, 2008.
9. AAP-6 - *Glosar NATO de termeni și definiții*, Ed.2022.