Bogdan Marinescu

PRINCIPIILE RADIOLOCAȚIEI

2011

Bogdan Marinescu

PRINCIPIILE RADIOLOCAȚIEI

PREFAŢĂ

Domeniul electronicii cunoaşte o evoluţie rapidă şi continuă şi odată cu el şi cel al radiolocaţiei. Circuitele digitale iau din ce în ce mai mult locul celor analogice. Sistemele radar moderne utilizează pe scară largă tehnicile digitale pentru prelucrarea semnalelor sau pentru comanda funcţionării echipamentelor. Îmbunătăţirea performanţelor circuitelor semiconductoare permite utilizarea din ce în ce mai mult a acestora în circuitele de frecvenţă foarte înaltă. Dacă până nu demult tehnica radar era domeniul exclusiv al tuburilor electronice speciale de microunde, în prezent ele sunt înlocuite aproape în totalitate de circuite cu dispozitive semiconductoare. Majoritatea radarelor sunt construite în tehnologie pe corp solid („solid state"), iar celelalte mai conţin de obicei un singur tub special în emiţător. Dezvoltările tehnologiei semiconductoare au condus şi la scăderea costurilor de realizare a reţelelor fazate de antene, acestea fiind folosite de aproape toate radarele de supraveghere şi de cele multirol.

Lucrarea de faţă reprezintă o introducere în construcţia şi funcţionarea sistemelor radar. Cartea se adresează mai ales maiştrilor şi tehnicienilor electronişti care lucrează în domeniul radiolocaţiei, dar şi tuturor celor ce doresc să facă primii paşi în acest domeniu. În cuprinsul lucrării s-a menţinut în permanenţă un nivel de prezentare a noţiunilor cât mai simplu, relaţiile matematice fiind folosite doar atunci când explicaţia era mult mai simplă cu ajutorul lor. Volumul de cunoştinţe cuprins în fiecare capitol a fost redus la cel esenţial.

Această lucrare reprezintă materializarea anilor de susţinere de către autor a cursului „Principiile radiolocaţiei", precum şi a altor discipline specifice radiolocaţiei.

Lucrarea este structurată pe şase capitole. În Capitolul 1 sunt prezentate principiile teoretice care stau la baza funcţionării sistemelor radar. Capitolul 2 se ocupă de prezentarea pe scurt a traseelor de frecvenţă foarte înaltă din compunerea radarului. Capitolele următoare tratează subsistemele principale din compunerea sistemelor radar: antene, comutatoare de antenă, emiţătoare şi receptoare. În aceste capitole au fost prezentate noţiuni specifice atât radarelor digitale, cât şi celor analogice, clasice. Radarele digitale iau treptat locul celor analogice. Acestea din urmă sunt totuşi folosite într-o serie de aplicaţii şi vor mai fi folosite mult timp de acum încolo, datorită simplităţii constructive şi al costului redus. Lucrarea acoperă ambele categorii de sisteme radar.

Nu au fost prezentate în această lucrare sistemele de prelucrare şi de afişare, precum şi cele auxiliare. A fost inclusă o scurtă prezentare a unor noţiuni despre prelucrarea semnalelor. Principiile de prelucrare a semnalelor şi datelor acoperă un domeniu vast şi diversificat şi de aceea vor fi prezentate probabil într-un al doilea volum. În ceea ce priveşte sistemele de afişare şi cele auxiliare, construcţia şi funcţionarea acestora este comună cu a celor folosite şi în alte domenii ale electronicii şi din acest motiv nu au fost incluse în lucrare.

În încheiere, aş dori să mulţumesc tuturor celor care au făcut posibilă apariţia acestei lucrări: profesorilor mei, colegilor, specialiştilor de pe sistemele radar care m-au sprijinit în documentare. O mulţumire specială o adresez domnului Christian Wolff pentru ajutorul acordat, în special cu anumite figuri incluse în lucrare. Şi nu în ultimul rând aş vrea să mulţumesc familiei, pentru răbdarea dovedită.

Sper că această lucrare va fi utilă celor interesaţi. Orice sugestii cu privire la îmbunătăţirea ei vor fi primite cu interes.

aprilie 2011 Bogdan Marinescu

CUPRINS

Capitolul 1: Principiile radiolocaţiei ..... pag. 1

1.1 Introducere ..... pag. 1

1.2 Aplicaţiile radiolocaţiei şi clasificarea radarelor ..... pag. 2

1.3 Ţinta de radiolocaţie ..... pag. 4

1.4 Determinarea poziţiei ţintelor în spaţiu ..... pag. 5

1.5 Schema bloc a unui sistem radar ..... pag. 6

1.6 Parametrii sistemelor radar ..... pag. 8

1.6.1 Parametrii tactici ..... pag. 8

1.6.2 Parametrii tehnici ..... pag. 10

1.7 Ecuaţia radiolocaţiei ..... pag. 11

1.8 Distanţa maximă univocă ..... pag. 14

1.9 Metode de explorare a spaţiului aerian ..... pag. 15

1.10 Influenţa Pământului şi a atmosferei asupra distanţei de acţiune ..... pag. 16

Capitolul 2: Trasee de frecvenţă foarte înaltă ..... pag. 21

2.1 Noţiuni generale despre liniile de transmisie ..... pag. 21

2.1.1 Parametrii liniilor de transmisie ..... pag. 21

2.1.2 Adaptarea liniilor ..... pag. 23

2.2 Cabluri coaxiale ..... pag. 23

2.3 Ghiduri de undă ..... pag. 25

2.3.1 Noţiuni generale despre ghidurile de undă ..... pag. 25

2.3.2 Elemente ale traseelor cu ghiduri de undă ..... pag. 27

2.3.3 Cavităţi rezonante ..... pag. 29

2.4 Linii de transmisie planare ..... pag. 30

Capitolul 3: Comutatoare de antenă ..... pag. 31

3.1 Noţiuni generale despre comutatoarele de antenă ..... pag. 31

3.2 Comutatoare de antenă cu descărcători ..... pag. 31

3.2.1 Noţiuni generale despre descărcători ..... pag. 31

3.2.2 Comutatoare de antenă cu ramificaţii în linii ..... pag. 32

3.2.3 Comutatoare de antenă cu cuploare direcţionale ..... pag. 33

3.3 Comutatoare de antenă cu ferită ..... pag. 35

3.4 Comutatoare de antenă cu semiconductoare ..... pag. 37

Capitolul 4: Antene ..... pag. 39

4.1 Noţiuni generale despre antene ..... pag. 39

4.2 Parametrii antenelor ..... pag. 39

4.3 Antene elementare folosite în radiolocaţie ..... pag. 42

4.3.1 Antene dipol ..... pag. 42

4.3.2 Antena Yagi-Uda ..... pag. 43

4.3.3 Antena horn ..... pag. 43

4.4 Antene cu reflector ..... pag. 44
4.5 Reţele fazate de antene ..... pag. 45
4.6 Antene monoimpuls ..... pag. 48
4.7 Caracteristici de directivitate utilizate de sistemele radar ..... pag. 50
4.8 Alte noţiuni legate de antene ..... pag. 54
4.8.1 Reducerea lobilor secundari ..... pag. 54
4.8.2 Radomuri ..... pag. 54
Capitolul 5: Emiţătoare ..... pag. 57
5.1 Noţiuni generale despre emiţătoarele radar ..... pag. 57
5.2 Emiţătoare cu generare directă ..... pag. 58
5.3 Emiţătoare cu lanţ de amplificare ..... pag. 61
5.3.1 Excitatorul ..... pag. 62
5.3.2 Emiţătoare pe corp solid ..... pag. 63
5.3.3 Emiţător cu lanţ de amplificare pe corp solid ..... pag. 64
Capitolul 6: Receptoare ..... pag. 67
6.1 Noţiuni generale despre receptoarele de radiolocaţie ..... pag. 67
6.2 Parametrii receptoarelor ..... pag. 68
6.3 Receptorul superheterodină ..... pag. 70
6.3.1 Circuite de intrare în receptoare ..... pag. 71
6.3.2 Amplificatoare în frecvenţă foarte înaltă ..... pag. 72
6.3.3 Schimbătoare de frecvenţă ..... pag. 72
6.3.4 Oscilatoare locale ..... pag. 74
6.3.5 Amplificatoare în frecvenţă intermediară ..... pag. 76
6.3.6 Detectoare ..... pag. 76
6.3.7 Amplificatoare de vidoefrecvenţă ..... pag. 77
6.4 Circuite speciale în receptoare ..... pag. 77
6.4.1 Scheme de reglare automată a amplificării ..... pag. 77
6.4.2 Amplificatoare logaritmice ..... pag. 79
6.5 Reglarea automată a frecvenţei ..... pag. 80
6.6 Frecvenţa imagine. Receptoare cu mai multe schimbări de frecvenţă ..... pag. 81
6.7 Recepţia coerentă ..... pag. 81
6.8 Receptoare digitale ..... pag. 83
6.8.1 Convertoare analog - numerice ..... pag. 84
6.8.2 Introducere în prelucrarea semnalelor de radiolocaţie ..... pag. 85

Bibliografie ..... pag. 87

Capitolul 1

PRINCIPIILE RADIOLOCAŢIEI

1.1 Introducere

Radiolocaţia este un domeniu al electronicii şi al radiotehnicii care are drept scop *descoperirea* şi *localizarea* diferitelor obiecte cu ajutorul *undelor electromagnetice*. Etimologic, radiolocaţia înseamnă localizarea cu ajutorul razelor, provenind din cuvintele latine *radio* = rază şi *locus* = loc.

Mijlocul fizic prin care se realizează aceasta îl reprezintă *radarul*, numit şi staţie de radiolocaţie sau radiolocator. Termenul de radar este o abreviere în limba engleză a cuvintelor RAdio Detection And Ranging, însemnând detecţia radio şi determinarea distanţei. La modul cel mai simplu, radarul este un senzor ce funcţionează pe baza undelor electromagnetice.

Obiectele descoperite prin radiolocaţie poartă denumirea de *ţinte*. Informaţiile obţinute de la ţinte cu ajutorul radarului se numesc *informaţii de radiolocaţie*.

Principiul de funcţionare al radarului constă în transmiterea în spaţiu a undelor electromagnetice care la întâlnirea unui obiect cu caracteristici diferite de ale mediului sunt reflectate în toate direcţiile. O parte din energie este reflectată pe direcţia radarului şi recepţionată de acesta, în acest mod realizându-se descoperirea sau detecţia ţintei. În funcţie de anumiţi parametri ai semnalului recepţionat sunt calculate coordonatele ţintei, determinându-se astfel poziţia ţintei în spaţiu. Pentru a determina direcţia ţintei faţă de radar, emisia şi recepţia undelor electromagnetice se face cu ajutorul unei antene directive.

La baza funcţionării sistemelor de radiolocaţie stau trei fenomene fizice care constituie principiile radiolocaţiei, şi anume:

- Reflexia undelor electromagnetice de la obiecte cu caracteristici diferite de ale mediului în care se află;
- Propagarea rectilinie şi cu viteză constantă a undelor eletromagnetice;
- Interferenţa undelor electromagnetice, care permite concentrarea energiei într-un fascicul foarte îngust, rezultând astfel emisia şi recepţia directivă a undelor electromagnetice;

Undele electromagnetice se deplasează cu viteză constantă prin spaţiu; în aer viteza de propagare este aproximativ egală cu viteza luminii în vid, adică $c = 3x10^8$ m/s . Astfel, se poate calcula uşor distanţa de la radar până la ţintă măsurând timpul necesar semnalului să se deplaseze de la radar la ţintă şi înapoi:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \tag{1.1}$$

Emisia şi recepţia directivă, împreună cu propagarea liniară a undelor eletromagnetice asigură determinarea cu precizie a coordonatelor ţintelor.

În funcţie de modul de obţinere al informaţiilor de radiolocaţie, întâlnim mai multe metode de observare prin radiolocaţie:

- *radiolocaţia activă*, care presupune emisia în spaţiu a undelor electromagnetice şi recepţia semnalelor provenite de la ţinte; la rândul ei această tehnică este de două feluri:
    - *radiolocaţia primară*, care recepţionează reflexiile de la ţinte ale semnalelor emise în spaţiu; în acest caz radarul se numeşte *radar primar* (în engleză: PSR - Primary Surveillance Radar);
    - *radiolocaţia secundară*, care recepţionează răspunsurile avioanelor la semnalul transmis în spaţiu; radarul este numit *radar secundar* (în engleză: SSR – Secondary Surveillance radar); această metodă presupune existenţa la bordul ţintelor a unei aparaturi de răspuns, numită transponder.
- *radiolocaţia pasivă*, prin care nu se emite nimic în spaţiu, ci doar se recepţionează semnalele radiate de ţintă. Variante mai moderne ale acestei metode folosesc pentru descoperirea ţintei reflexiile de către aceasta a semnalelor radiate de alte surse, cum ar fi posturile radio sau TV.

1.2 Aplicaţiile radiolocaţiei şi clasificarea radarelor

Radiolocaţia are aplicaţii multiple şi diverse, atât în domeniul militar cât şi în cel civil. Prima aplicaţie a radarului a fost una militară, pentru descoperirea bombardierelor germane în al doilea război mondial. De asemenea, aplicaţiile militare au constituit sursa principalelor dezvoltări ale tehnicii radar.

Principala aplicaţie militară a radiolocaţiei este pentru *apărarea aeriană*. În acest scop radarele sunt utilizate pentru *supraveghere aeriană*, adică descoperirea şi localizarea avioanelor şi rachetelor balistice, identificarea lor, dirijarea avioanelor proprii la interceptare, conducerea focului artileriei antiaeriene şi dirijarea rachetelor sol-aer. Focoasele de proximitate ale multor rachete şi proiectile folosesc o formă de radar. Radarele pentru supraveghere aeriană pot fi dispuse la sol sau la bordul navelor şi aeronavelor. O aplicaţie similară este şi cea de supraveghere navală. Radare aeropurtate sunt folosite pentru descoperirea ţintelor terestre şi executarea bombardamentului asupra celor inamice.

În domeniul militar radarele sunt folosite şi pentru detecţia obuzelor de artilerie sau a rachetelor sol-sol şi determinarea locului de unde acestea au fost lansate. O altă utilizare a radarelor cu baza la sol este pentru descoperirea ţintelor terestre, adică a tancurilor, maşinilor sau personalului.

Principala aplicaţie a radiolocaţiei în domeniul civil este pentru *controlul traficului aerian*. Fiecare aeroport are un radar de supraveghere aeriană (ASR – Airport Surveillance Radar) pentru observarea traficului aerian în apropierea aeroportului şi pentru dirijarea aeronavelor la aterizare şi decolare. Pentru controlul traficului de la un aeroport la altul sunt folosite radarele de rută (ARSR – Air Route Surveillance Radar). De asemenea, există radare speciale pentru dirijarea avioanelor la aterizare (GCA – Ground Control Approach sau PAR – Precission Approach RADAR). Radarele secundare (SSR – Secondary Surveillance Radar) sunt utilizate pentru identificarea fiecărei aeronave în parte, precum şi pentru obţinerea unor informaţii suplimentare de la acestea. Radare speciale sunt folosite pentru dirijarea traficului la sol a avioanelor şi vehiculelor ce se deplasează prin aeroport. O serie de aeronave au la bord radioaltimetre, care sunt radare speciale pentru determinarea înălţimii de zbor, măsurând distanţa între avion şi suprafaţa solului. De asemenea, radarele aeropurtate sunt folosite şi pentru evitarea coliziunilor între aeronave. Radare dispuse la bordul navelor sunt utilizate pentru navigaţia maritimă şi fluvială.

O altă aplicaţie a radarelor civile este meteorologia. *Radarele meteorologice* sunt utilizate în special pentru detecţia precipitaţiilor, a intensităţii, tipului şi mişcării acestora, precum şi

pentru măsurarea vitezei vântului la diferite altitudini. Una din primele aplicaţii civile a radiolocaţiei a fost astronomia, pentru determinarea distanţei până la corpurile cereşti. Radarul este folosit şi pentru urmărirea şi dirijarea navelor cosmice şi a sateliţilor.

Radare aeropurtate sau dispuse la bordul sateliţilor sunt utilizate pentru cartografierea suprafeţei terestre, dar şi a altor planete. Cu ajutorul radarului cu penetrare a solului se pot descoperi obiectele îngropate la diferite adâncimi în pământ; aceste radare sunt foarte utile arheologilor, dar şi geologilor, putând detecta zăcăminte de gaze sau petrol. Ornitologii şi entomologii folosesc radarul pentru a studia migraţia păsărilor sau a insectelor. Poliţia utilizează radare pentru determinarea vitezei autovehiculelor. Senzori radar dispuşi la bordul autovehiculelor sunt folosiţi pentru evitarea coliziunilor sau pentru asistenţa la parcare.

Radiolocaţia îşi găseşte aplicaţii in ce în ce mai diverse, în domenii care nu au nicio legătură cu cele aşa-zis clasice. În industrie radarul este din ce în ce mai folosit pentru determinarea distanţei sau vitezei.

Sistemele radar pot fi clasificate în mai multe categorii, în funcţie de diverse criterii. Astfel, din punct de vedere al metodei de observare folosite, radarele pot fi primare, secundare sau pasive.

După forma semnalului de emisie, sistemele radar se împart în două mari categorii: *radare cu emisie continuă* şi *radare în impulsuri*. Cele cu emisie continuă pot fi nemodulate, cu modulaţie de frecvenţă sau cu modulaţie de tip zgomot. Radarele cu emisie în impulsuri pot fi cu sau fără modulaţie internă a impulsurilor. Modulaţia impulsurilor poate fi de frecvenţă sau de fază. De asemenea, radarele în impulsuri pot fi coerente sau necoerente. Radarele cu emisie în impulsuri reprezintă categoria cea mai întâlnită de radare.

În funcţie de lungimea de undă utilizată, sistemele radar pot fi de gamă metrică, decimetrică, centimetrică sau milimetrică. După numărul de coordonate determinate radarele sunt monodimensionale, bidimensionale sau tridimensionale. Radarele monodimensionale determină o singură coordonată a ţintei, de obicei distanţa; radarele de poliţie sunt tot radare monodimensionale, determinând însă viteza. Cele bidimensionale determină două coordonate ale ţintei, ca de exemplu distanţa şi azimutul, caz în care se mai numesc şi radiotelemetre, sau distanţa şi înălţimea, acestea numindu-se radioaltimetre sau radare pentru determinarea înălţimii. Radarele tridimensionale măsoară toate cele trei coordonate ale ţintelor: distanţă, azimut şi înălţime.

Din punct de vedere al tehnologiei constructive sistemele radar pot fi *analogice* sau *digitale*. Cele analogice sunt realizate în totalitate în tehnologie analogică. Radarele digitale folosesc şi ele circuite analogice, în special pentru partea de frecvenţă foarte înaltă, dar realizează prelucrarea semnalelor în întregime cu circuite digitale, iar generarea semnalului de emisie se face sub formă numerică; în plus, comanda circuitelor radarului se realizează tot digital. O categorie specială sunt radarele „pseudo-digitale”, care realizează doar prelucrarea numerică a semnalelor ecou, restul circuitelor fiind analogice; un radar analogic, de generaţie mai veche, poate fi trecut în această categorie prin montarea unui extractor de date radar.

După destinaţia sau rolul pe care trebuie să-l îndeplinească, radarele pot fi de diverse tipuri. De exemplu, radarele militare pot fi de *apărare aeriană* sau *de control trafic aerian*. La rândul lor, cele de apărare aeriană se împart în radare de supraveghere aeriană, numite şi de cercetare sau de observare, şi radare de tragere (de ochire, de urmărire). Radarele de supraveghere aeriană pot fi de desoperire îndepărtată, numite şi de distanţă mare sau de avertizare timpurie, de distanţă medie, de descoperire la înălţimi mici etc. Sistemele radar pentru controlul traficului aerian sunt şi ele de mai multe feluri: radare de aeroport, de rută, de dirijare la aterizare etc. O categorie specială o reprezintă *radarele multirol*. Acestea pot îndeplini simultan mai multe misiuni; de exemplu acelaşi radar poate avea atât funcţie de supraveghere, cât şi de tragere.

În funcţie de locul de dispunere, sistemele radar sunt cu baza la sol (sau terestre), navale (dispuse pe nave), aeropurtate (dispuse la bordul avioanelor) sau dispuse la bordul sateliţilor.

1.3 Ţinta de radiolocaţie

La modul general prin ţintă de radiolocaţie se înţelege orice obiect din spaţiu care reflectă undele electromagnetice emise de radar. În sens restrâns ţinta reprezintă obiectul de interes pentru radar, celelalte obiecte care reflectă undele fiind considerate bruiaj pasiv sau clutter. Ca exemplu, pentru radarele de supraveghere aeriană şi pentru controlul traficului aerian ţintele sunt aeronavele, pe când reflexiile de la formaţiunile meteo sunt considerate perturbaţii. În cazul radarelor meteorologice, situaţia se schimbă, reflexiile de la precipitaţii constituind semnalele de interes.

După formă, ţintele pot fi simple sau complexe. Primele au forme geometrice simple, proprietăţile lor de reflexie putând fi calculate relativ uşor, pe când celelalte au forme complexe, iar proprietăţile de reflexie se determină experimental sau prin calcule foarte complicate. Ţintele reale fac parte din cea de-a doua categorie.

Ţintele complexe se împart şi ele în două categorii: ţinte concentrate şi ţinte distribuite. La rândul lor cele concentrate pot fi ţinte izolate sau punctiforme, respectiv ţinte grupate. Ţintele concentrate sunt acele ţinte ale căror dimensiuni sunt mult mai mici decât dimensiunile celulei de rezoluţie a radarului, în timp ce ţintele distribuite ocupă mai multe celule de rezoluţie. Avioanele sunt exemple de ţinte concentrate, în timp ce formaţiunile meteo sau suprafaţa pământului sunt ţinte distribuite.

Parametrii principali ai ţintelor sunt: suprafaţa efectivă de reflexie (SER), dimensiunile fizice, coordonatele (distanţă, azimut, înălţime), viteza, direcţia de deplasare, apartenenţa etc.

Cel mai important parametru din punctul de vedere al radiolocaţiei îl reprezintă suprafaţa efectivă de reflexie (în engleză: RCS – Radar Cross Section). Aceasta caracterizează proprietăţile reflective ale ţintei. Prin definiţie, suprafaţa efectivă de reflexie σ reprezintă aria unei suprafeţe plane, fictive, dispuse perpendicular pe direcţia undei plane incidente, care fiind amplasată în acelaşi punct cu ţinta va reflecta către radar aceeaşi cantitate de energie ca şi ţinta reală.

Suprafaţa efectivă de reflexie este de obicei exprimată ca orice suprafaţă în metri pătraţi, dar se foloseşte şi decibelul (dBsm sau dBm^2):

$$\sigma_{dBsm} = 10\lg\left(\frac{\sigma}{1m^2}\right) \tag{1.2}$$

Principalii factori care influenţează valoarea SER sunt: dimensiunile ţintei, materialul suprafeţei acesteia, forma ţintei, unghiul de incidenţă, frecvenţa şi polarizarea undelor. Pentru o anumită ţintă, suprafaţa efectivă de reflexie depinde foarte mult de orientarea acesteia faţă de radar. De obicei SER este mai mare când avionul se deplasează lateral faţă de radar; în cazul avioanelor cu reacţie, SER are o valoare mai mare când avionul este observat din spate. Doarece SER poate varia în limite largi în funcţie de diverşi factori, în calcule se folosesc valori medii.

În tabelul de mai jos sunt prezentate câteva valori orientative ale SER, pentru diverse categorii de ţinte, la frecvenţe de lucru în banda X.

Tipul ţintei	**SER (m^2)**
Avion de vânătoare	1 – 8
Bombardier mediu sau avion mediu de transport	20 – 50
Bombardier sau avion greu de transport	30 – 120
Elicopter	2 – 10
Rachete	0,1 – 1
Proiectile de artilerie	1

Tipul ţintei	SER (m^2)
Navă mică	50 – 250
Navă mare	3000 – 20000
Tanc, transportor auto	20 – 200
Om	0,8 – 1
Păsări	10^{-3} – 10^{-2}
Insecte	10^{-5} – 10^{-4}

Un caz special este cel al avioanelor „invizibile" („stealth" în engleză). Acestea sunt avioane proiectate special pentru a avea o suprafaţă efectivă de reflexie foarte mică. În acest fel ele vor fi descoperite la distanţe mult mai mici faţă de ţintele obişnuite, şi implicit la înălţimi mai mici, după cum vom vedea mai târziu în ecuaţia radiolocaţiei. Ca exemplu, avioanele de vânătoare moderne F-22 sau F-35 au SER comparabile cu cele ale păsărilor.

1.4 Determinarea poziţiei ţintelor în spaţiu

În radiolocaţie, pentru determinarea poziţiei ţintelor în spaţiu se folosesc sistemul de coordonate sferic sau cel cilindric. Cel mai utilizat este *sistemul de coordonate sferic*. În acest sistem poziţia ţintei este determinată prin următoarele trei coordonate: distanţa înclinată *D*, azimutul β şi unghiul de înălţare ε. Originea sistemului de coordonate sferic o reprezintă locul de dispunere a radarului O. În figura 1.1 sunt prezentate coordonatele unei ţinte aflată în punctul T.

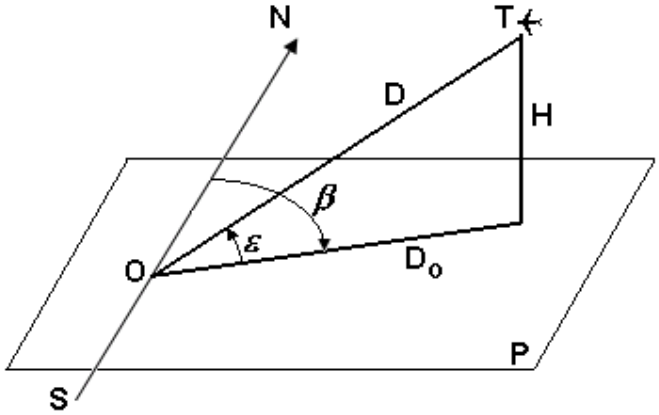


Fig. 1.1 – Coordonatele ţintei

Distanţa înclinată reprezintă distanţa în linie dreaptă dintre radar şi ţintă.

Azimutul este unghiul măsurat în locul de dispunere a radarului dintre direcţia nordului geografic şi proiecţia distanţei înclinate în planul orizontal P. Valoarea azimutului se calculează în sensul acelor de ceasornic, de la 0° la 360°, având ca origine , după cum am mai spus, direcţia nordului geografic.

Unghiul de înălţare, numit uneori şi unghi de elevaţie, reprezintă unghiul dintre direcţia distanţei înclinate la ţintă şi proiecţia acesteia pe planul orizontal P. În cazul radarelor cu baza la sol acest plan P este tangent la suprafaţa pământului în locul de dispunere a radarului.

Cele trei coordonate ale sistemului sferic pot fi determinate direct. Distanţa înclinată se calculează măsurând timpul de întârziere al semnalului de sondaj, adică timpul necesar semnalului să se deplaseze de la radar la ţintă şi înapoi, conform formulei 1.1.

Pentru determinarea coordonatelor unghiulare (azimut şi unghi de înălţare), antena radarului trebuie să fie directivă, adică să aibă o caracteristică de directivitate foarte îngustă în planul corespunzător coordonatei care se măsoară (orizontal pentru β, vertical pentru ε). Această caracteristică de directivitate îngustă este deplasată în planul respectiv, iar în momentul când antena se află pe direcţia ţintei, semnalul reflectat de la aceasta este maxim. În acest moment se măsoară coordonata respectivă, cu ajutorul unui dispozitiv cuplat mecanic la axul antenei. Acest tip de metodă de determinare a coordonatelor unghiulare se numeşte metodă de amplitudine şi este de mai multe feluri: metoda maximului, a minimului şi a zonei de semnal egal.

Cunoscând cele trei coordonate sferice se pot determina şi alte coordonate, cum ar fi distanţa orizontală D_O şi înălţimea ţintei H:

$$D_O = D \cdot \cos\varepsilon \tag{1.3}$$

$$H = D \cdot \sin\varepsilon \tag{1.4}$$

Distanţa orizontală reprezintă proiecţia distanţei înclinate în planul orizontal P. Azimutul, înălţimea şi distanţa orizontală formează *sistemul de coordonate cilindric*, care este utilizat uneori în locul celui sferic.

În formula de mai sus înălţimea a fost calculată faţă de planul orizontal P. Luând în considerare curbura Pământului, calculul înălţimii faţă de suprafaţa solului se face cu ajutorul expresiei:

$$H = D \cdot \sin\varepsilon + \frac{D^2}{2R_0} \tag{1.5}$$

unde R_0 reprezintă raza echivalentă a Pământului.

1.5 Schema bloc a unui sistem radar

În figura 1.2 este reprezentată schema bloc a unui sistem radar, ce cuprinde principalele subsisteme funcţionale ale acestuia, iar în figura 1.3 sunt prezentate diagramele de semnal ce caracterizează principiul de funcţionare al radarului. Am considerat cazul unui radar cu emisie în impulsuri, acesta fiind şi cel mai întâlnit tip de radar.

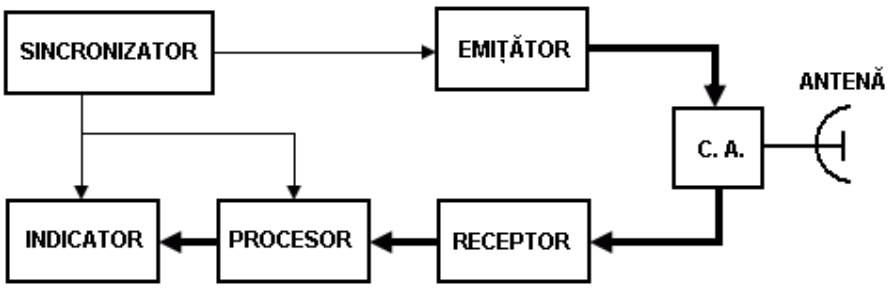


Fig. 1.2 – Schema bloc a unui radar

Sincronizatorul realizează sincronizarea tuturor proceselor ce au loc în timpul funcţionării radarului, astfel încât prelucrarea semnalelor recepţionate şi afişarea acestora pe indicator să fie sincronizate în timp cu emisia impulsurilor de sondaj în spaţiu. În acest scop el generează impulsuri foarte scurte de sincronizare numite şi impulsuri de pornire, impulsuri de punere în funcţiune, impulsuri de tact sau impulsuri de ceas. Aceste impulsuri se repetă la o perioadă constantă de timp, foarte bine determinată, numită *perioada de repetiţie a impulsurilor* T_r. Impulsurile de sincronizare sunt aplicate la emiţător, receptor, instalaţia de prelucrare, dar şi

la alte echipamente. Impulsurile de sincronizare comandă începerea prelucrării în fiecare echipament, în acest fel toate procesele desfăşurându-se sincron. Fenomenele din fiecare echipament se reiau la fiecare nou impuls de sincronizare. De exemplu, timpul de întârziere este calculat având ca referinţă impulsul de sincronizare.

Rolul *emiţătorului* este de a genera semnalul de frecvenţă foarte înaltă ce va fi emis în spaţiu, numit *semnal de sondaj*. Emiţătorul generează câte un impuls de radiofrecvenţă la fiecare impuls de sincronizare primit de la sincronizator. Impulsurile de sondaj sunt impulsuri scurte, de frecvenţă foarte înaltă şi de putere mare. Ele sunt trimise la antenă prin comutatorul de antenă pentru a fi radiate în spaţiu.

Comutatorul de antenă, numit şi comutator emisie – recepţie, asigură transmiterea semnalelor de sondaj la antenă şi a semnalelor reflectate de la ţinte către receptor. Altfel spus, el cuplează antena la emiţător pe timpul emisiei, respectiv asigură legătura dintre antenă şi receptor pe timpul recepţiei. În acest fel este posibilă utilizarea unei singure antene atât la emisie cât şi la recepţie.

Semnalele care circulă de la emiţător la antenă şi de la aceasta la receptor sunt semnale de frecvenţă foarte înaltă. De aceea legăturile dintre aceste echipamente sunt realizate cu ajutorul unor *trasee de frecvenţă foarte înaltă*, realizate pe diferite tipuri de linii de transmisie. Comutatorul de antenă este parte integrantă a acestor trasee.

Antena are rolul de a radia în spaţiu semnalele de sondaj şi de a capta semnalele reflectate de la ţinte. Emisia şi recepţia semnalelor se face directiv, pentru determinarea precisă a coordonatelor ţintelor.

Dacă pe direcţia de radiaţie a antenei există o ţintă, aceasta va reflecta impulsul de sondaj către radar. Acest semnal reflectat, numit *semnal ecou*, este captat de antenă şi trimis către receptor.

Receptorul amplifică semnalele foarte slabe reflectate de la ţintă, le filtrează şi le demodulează pentru a fi mai uşor de prelucrat.

Se observă că în funcţionarea unui radar în impulsuri întâlnim două etape: emisia, de durată scurtă, în timpul impulsurilor de sondaj, respectiv recepţia, ce durează de la sfârşitul impulsului de sondaj până la începutul următorului impuls.

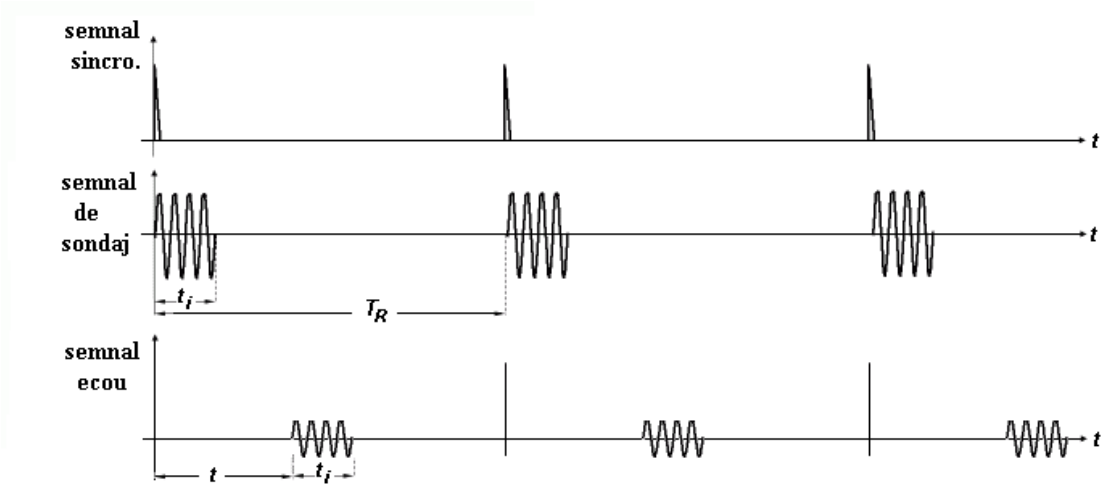


Fig. 1.3 – Diagramele de timp ce caracterizează funcţionarea radarului

Instalaţia de prelucrare sau procesorul realizează prelucrarea semnalelor ecou obţinând de la acestea toate informaţiile necesare. Principalele procese de prelucrare constau în detecţia automată a ţintelor, determinarea coordonatelor acestora, eliminarea perturbaţiilor etc. La radarele analogice mai vechi nu întâlnim o instalaţie dedicată pentru prelucrarea semnalelor.

Totuşi, aceste radare conţin o serie de instalaţii de protecţie la bruiaj şi de eliminare a semnalelor perturbatoare, semnalele ecou fiind trecute prin aceste instalaţii înainte de a fi aplicate la indicator.

La radarele digitale procesorul are şi rolul de comandă şi sincronizare a funcţionării radarului.

Indicatorul afişează informaţiile de radiolocaţie, adică ţintele şi informaţiile asociate acestora. Afişarea ţintelor pe indicator trebuie să fie sugestivă şi similară cu cea reală. Pe indicator mai pot fi afişate şi o serie de informaţii auxiliare: gradaţiuni, hărţi, starea echipamentelor etc.

În afara subsistemelor prezentate pe schema bloc, în compunerea unui radar mai întâlnim şi o serie de alte instalaţii care sprijină funcţionarea acestuia. Aceste instalaţii mai sunt numite şi *sisteme auxiliare* ale radarului: sisteme de alimentare, de rotire, de răcire şi ventilaţie, etc. *Sistemul de alimentare* cu energie electrică asigură alimentarea circuitelor radarului cu diferite tensiuni alternative şi continue. *Instalaţia de rotire* asigură deplasarea antenei pentru acoperirea întregului spaţiu de cercetare de către caracteristica de directivitate.

În capitolele următoare vor fi analizate pe rând principalele echipamente ale radarului, prezentate pe schema bloc.

1.6 Parametrii sistemelor radar

Parametrii sistemelor radar se împart în două categorii: parametri tactici şi tehnici. Caracteristicile tactice sunt acei parametri prin care se apreciază posibilitatea radarului de a-şi îndeplini misiunea. Parametrii tehnici caracterizează starea tehnică a sistemului radar, ei putând fi măsuraţi direct cu ajutorul unor instrumente de măsură. În continuare vom prezenta principalii parametrii ai sistemelor radar, particularizaţi pentru radare de observare circulară şi cu emisie în impulsuri.

1.6.1 Parametrii tactici

Principala categorie de parametrii tactici o reprezintă *zona de acţiune* a radarului, sau zona de observare. Aceasta reprezintă spaţiul în limitele căruia radarul îşi îndeplineşte rolul, adică descoperă ţintele cu valorile impuse ale probabilităţilor de descoperire şi de alarmă falsă. Caracteristicile zonei de observare sunt determinate de destinaţia radarului. Parametrii ce caracterizează zona de acţiune sunt:

- Distanţa maximă de descoperire D_{max}, respectiv distanţa minimă de descoperire D_{min};
- Unghiul minim ε_{min} şi unghiul maxim de înălţare ε_{max};
- Înălţimea maximă de descoperire H_{max} şi înălţimea minimă de descoperire H_{min};
- Raza conului mort R_{cm}.

Distanţa maximă este dată de ecuaţia radiolocaţiei, fiind condiţionată însă de perioada de repetiţie a impulsurilor, după cum vom vedea mai târziu. Din cauză că forma zonei de descoperire este dată de forma caracteristicii de directivitate, valoarea distanţei maxime depinde şi de înălţimea de zbor a ţintei.

Deoarece pe timpul emisiei impulsurilor de sondaj recepţia este blocată, distanţa minimă de descoperire este determinată în primul rând de durata impulsurilor de sondaj:

$$D_{\min} = \frac{c \cdot t_i}{2} \tag{1.6}$$

Valoarea distanţei minime de descoperire mai depinde şi de alţi factori, cum ar fi timpul de restabilire al comutatorului de antenă. Dacă se folosesc antene diferite pentru emisie şi recepţie, distanţa minimă este practic neglijabilă.

Raza conului mort este o funcţie de unghiul maxim de înălţare şi de înălţimea ţintei, putând fi determinat cu ajutorul formulei:

$$R_{cm} = H \cdot ctg\varepsilon_{\max} \tag{1.7}$$

Un alt parametru ce caracterizează zona de acţiune a radarului îl reprezintă posibilităţile de înclinare ale caracteristicii de directivitate, el influenţând valorile unghiului minim şi maxim de înălţare şi al înălţimii maxime şi minime de descoperire.

Înălţimea minimă de descoperire este dependentă de unghiul minim al caracteristicii de directivitate. Valoarea acesteia poate fi optimizată prin dispunerea antenei radarului la o înălţime mai mare şi înclinarea în jos a caracteristicii de directivitate.

Perioada de observare a spaţiului reprezintă timpul necesar pentru ca diagrama de directivitate să exploreze întreaga zonă de descoperire. La radarele de observare circulară, acest parametru este dat de viteza de rotire a antenei Ω. O viteză ridicată de rotire a antenei asigură o reîmprospătare mai rapidă a informaţiilor despre ţinte.

O altă caracteristică tactică este *capacitatea de separare* sau rezoluţia. Aceasta reprezintă capacitatea radarului de a asigura detecţia şi afişarea separată a două ţinte aflate foarte aproape una de cealaltă. Rezoluţia se defineşte pentru fiecare tip de coordonată în parte.

Capacitatea de separare în distanţă este distanţa minimă dintre două ţinte aflate pe aceeaşi direcţie faţă de radar la care ţintele mai sunt detectate şi afişate separat. Valoarea acesteia depinde de durata impulsului de sondaj:

$$\delta D = \frac{c \cdot t_i}{2} \tag{1.8}$$

Dacă două ţinte se află una faţă de cealaltă la o distanţă mai mică decât capacitatea de separare în distanţă atunci impulsurile reflectate de fiecare ţintă se suprapun şi astfel ţintele nu mai pot fi observate separat.

Capacitatea de separare în coordonate unghiulare reprezintă unghiul minim dintre direcţiile spre două ţinte aflate la aceeaşi distanţă faţă de radar la care ţintele mai sunt observate separat. Ea se exprimă pentru fiecare coordonată unghiulară, azimut şi unghi de înălţare: $\delta\beta$ şi $\delta\varepsilon$. Valoarea capacităţii de separare unghiulare depinde în principal de lăţimea caracteristicii de directivitate în planul respectiv.

Alţi paramentri tactici sunt:

- Precizia determinării coordonatelor;
- Stabilitatea la bruiaj este un parametru foarte important al radarelor cu destinaţie militară, reprezentând capacitatea radarului de a-şi îndeplini misiunea în condiţiile unui mediu electromagnetic ostil; ea este dată de posibilităţile de atenuare şi eliminare a diferitelor semnale perturbatoare,
- Fiabilitatea sau siguranţa în funcţionare este caracterizată în principal de următoarii parametri:
    - timpul mediu de bună funcţionare MTBF (Mean Time Between Failures), adică durata de funcţionare fără defecţiuni;
    - timpul mediu de reparare MTTR (Mean Time To Repair);
    - disponibilitatea.
- Mobilitatea şi transportabilitatea radarului, care includ greutatea sistemului, gabaritele, numărul unităţilor de transport, căile prin care poate fi transportat etc;
- Timpul de strângere şi de desfăşurare, adică timpul necesar trecerii de la configuraţia de transport la cea operaţională şi invers;
- Timpul de cuplare;

- Posibilităţile de alimentare cu energie electrică: parametrii tensiunii de alimentare, puterea consumată, consumul grupului electrogen, etc.;
- Condiţiile meteorologice în care poate funcţiona: temperatură, viteza vântului, umiditate, altitudine;
- Capacitatea de prelucrare, adică numărul de ţinte descoperite şi prelucrate simultan, în fiecare perioadă de observare;
- Posibilităţile de integrare în sistemele de comandă şi control, cei mai importanţi fiind tipul de legături de comunicaţii folosite şi formatul datelor transmise.

1.6.2 Parametrii tehnici

Caracteristicile tehnice ale radarului asigură obţinerea valorilor necesare ale parametrilor tactici pentru ca radarul să-şi îndeplinească rolul; astfel, ei depind de destinaţia sistemului radar. Parametrii tehnici sunt specifici fiecărui subsistem al radarului şi vor fi prezentaţi în capitolele următoare pentru fiecare subsistem în parte.

Cei mai importanţi parametri tehnici ai unui radar sunt: puterea de emisie, frecvenţa de lucru, durata impulsului şi frecvenţa de repetiţie a impulsurilor.

Frecvenţa de repetiţie a impulsurilor F_r reprezintă numărul de impulsuri emise de radar în unitatea de timp. Inversul frecvenţei de repetiţie se numeşte perioadă de repetiţie a impulsurilor T_r şi reprezintă durata dintre două impulsuri de sincronizare succesive. Se observă că frecvenţa de repetiţie este un parametru al sincronizatorului.

După cum vom vedea mai târziu în acest capitol, frecvenţa de repetiţie este dependentă de distanţa maximă de descoperire a radarului şi de numărul de impulsuri ce trebuiesc recepţionate de la o ţintă. Valoarea perioadei de repetiţie trebuie să fie mai mare decât durata corespunzătoare distanţei maxime dorite a radarului, în caz contrar apărând o serie de probleme în determinarea distanţei ţintelor:

$$T_r \geq \frac{2 \cdot D_{\max}}{c} \tag{1.9}$$

Durata impulsurilor de sondaj t_i influenţează o serie de alţi parametri ai radarului, cei mai importanţi fiind capacitatea de separare în distanţă şi distanţa minimă de descoperire. Pentru a asigura o rezoluţie în distanţă cât mai bună, dar şi o distanţă minimă cât mai mică, sistemele radar folosesc impulsuri de sondaj scurte, de ordinul microsecundelor şi zecimilor de microsecunde. Un caz special este cel al radarelor cu modulaţie internă a impulsurilor (de frecvenţă sau de fază). Acestea folosesc impulsuri de durată mai mare, iar asigurarea unei bune capacităţi de separare se face prin utilizarea tehnicii de compresie a impulsurilor.

Un alt parametru tehnic este *coeficientul* sau *factorul de umplere*. Acesta este egal cu raportul dintre durata impulsului şi perioada de repetiţie şi caracterizează timpul efectiv de emisie din timpul total de funcţionare. El este exprimat de obicei în procente:

$$Q = \frac{t_i}{T_r} \times 100\% = t_i \cdot F_r \times 100\% \tag{1.10}$$

Puterea de emisie este un parametru cu o influenţă majoră asupra distanţei maxime de descoperire. În cazul radarelor în impulsuri întâlnim două tipuri de putere: *puterea în impuls* (de vârf) şi *puterea medie*. După cum am văzut, radarul emite doar pe durata impulsurilor de sondaj, în restul timpului puterea emisă fiind zero. Între cele două puteri există următoarea relaţie:

$$P_{med} = \frac{P_i \cdot t_i}{T_r} = P_i \cdot Q \tag{1.11}$$

Puterea medie determină nivelul de putere consumat de emiţător de la sursa de alimentare.

Frecvenţa de lucru f_0 reprezintă frecvenţa purtătoare a impulsurilor de sondaj. *Lungimea de undă λ* poate fi calculată cu ajutorul formulei:

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \tag{1.12}$$

Valoarea frecvenţei de lucru a radarului este aleasă în funcţie de o serie de alţi parametri, ai acestuia, cum ar fi precizia determinării coordonatelor, dimensiunile sistemului de antenă, distanţa de descoperire, etc.

Pentru a fi posibilă reflexia semnalelor de sondaj de la ţinte este necesar ca lungimea de undă să fie mai mică sau comparabilă cu dimensiunile ţintelor. Din acestă cauză frecvenţele de lucru folosite de radare sunt în gama undelor metrice până la milimetrice. Un alt motiv al folosirii frecvenţelor foarte înalte de către radare îl reprezintă dimensiunile antenelor. Lăţimea caracteristicii de directivitate este direct proporţională cu lungimea de undă şi invers proporţională cu dimensiunile antenei. Pentru obţinerea unei caracteristici înguste trebuie aleasă o lungime de undă cât mai mică pentru o dimensiune rezonabilă a antenei. De exemplu, în cazul antenelor cu reflector parabolic, între lăţimea caracteristicii de directivitate θ_l, lungimea de undă λ şi dimensiunea reflectorului L există următoarea relaţie:

$$\theta_l = (60 \div 70)\frac{\lambda}{L} \tag{1.13}$$

Un alt factor care determină folosirea frecvenţelor de lucru foarte înalte îl reprezintă durata mică a impulsurilor de sondaj. Pentru a obţine o putere suficientă de emisie este necesar ca în fiecare impuls să existe un număr suficient de oscilaţii, de ordinul sutelor.

De asemenea, o importanţă deosebită în alegerea lungimii de undă o au condiţiile de propagare a undelor electromagnetice prin atmosferă, în principal absorbţia atmosferică. Atenuarea introdusă de atmosferă creşte puternic odată cu creşterea frecvenţei. Din acest motiv radarele ce lucrează cu frecvenţe de peste 40 GHz sunt folosite doar pe distanţe relativ scurte.

Gama frecvenţelor de lucru sau banda de frecvenţe reprezintă banda în care sunt cuprinse toate frecvenţele de lucru pe care poate funcţiona radarul. Pentru o bună protecţie împotriva diferitelor semnale perturbatoare, intenţionate sau nu, radarele lucrează într-o gamă relativ largă de frecvenţe, de ordinul sutelor de megaherţi.

1.7 Ecuaţia radiolocaţiei

Ecuaţia radiolocaţiei reprezintă expresia distanţei de descoperire a unui radar în funcţie de caracteristicile radarului, ţintei şi ale mediului de propagare. Distanţa maximă de descoperire, numită şi distanţa sau raza de acţiune a radarului, sau bătaia, este unul din principalii parametri ai radarului.

Distanţa de acţiune depinde de foarte mulţi factori, cum ar fi puterea emiţătorului, sensibilitatea receptorului, proprietăţile directive ale antenei, caracteristicile de reflexie ale ţintei, condiţiile de propagare ale undelor electromagnetice, proprietăţile atmosferei etc. Din acest motiv determinarea distanţei de descoperire este dificilă.

Vom analiza distanţa de descoperire în cazul ideal, în care nu vom ţine seama de toţi factorii ce o influenţează, ci doar de cei mai importanţi. De aceea vom porni de la următoarele ipoteze: undele electromagnetice se propagă în atmosferă fără a fi atenuate, iar Pământul nu exercită nicio influenţă asupra distanţei de descoperire. De asemenea, vom neglija toate pierderile din sistemul radar (cauzate de neadaptările de impedanţă în antenă, nealinierii antenei etc.). Deoarece se foloseşte aceeaşi antenă atât la emisie cât şi la recepţie, parametrii acesteia (câştigul, suprafaţa efectivă) vor fi aceeaşi în ambele cazuri.

Dacă antena ar fi una izotropă (omnidirecţională), atunci puterea de emisie P_E s-ar distribui uniform pe o sferă cu suprafaţa $4\pi D^2$. Astfel, densitatea de putere radiată la distanţa D de radar este:

$$S_I = \frac{P_E}{4\pi D^2} \tag{1.14}$$

În cazul unei antene directive cu câştigul G, densitatea de putere radiată va fi:

$$S_E = S_I \cdot G = \frac{P_E}{4\pi D^2} \cdot G \tag{1.15}$$

Puterea reflectată de ţintă depinde de suprafaţa efectivă de reflexie a acesteia σ:

$$P_T = S_E \cdot \sigma = \frac{P_E \cdot G}{4\pi D^2} \cdot \sigma \tag{1.16}$$

Deoarece ţinta reflectă undele electromagnetice în toate direcţiile, o vom considera o sursă de radiaţie izotropă; astfel, densitatea de putere radiată la distanţa D de ţintă (adică în punctul în care se află radarul) este:

$$S_T = \frac{P_T}{4\pi D^2} = \frac{P_E \cdot G}{4\pi D^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi D^2} \tag{1.17}$$

Antena radarului va recepţiona doar o parte din puterea radiată de ţintă, proporţională cu suprafaţa efectivă a antenei A_e :

$$P_R = S_T \cdot A_e = \frac{P_E \cdot G}{4\pi D^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi D^2} \cdot A_e \tag{1.18}$$

Între suprafaţa efectivă, câştigul antenei şi lungimea de undă există următoarea relaţie:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \Rightarrow \quad A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G \tag{1.19}$$

Rezultă că puterea recepţionată va avea expresia:

$$P_R = \frac{P_E \cdot G \cdot \sigma \cdot G \cdot \lambda^2}{\left(4\pi D^2\right)^2 \cdot 4\pi} = \frac{P_E \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{\left(4\pi\right)^3 \cdot D^4} \tag{1.20}$$

Atunci expresia distanţei va fi :

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_R \cdot \left(4\pi\right)^3}} \tag{1.21}$$

Dacă în relaţia de mai sus puterea recepţionată o considerăm ca fiind puterea minimă la intrarea receptorului la care mai poate fi detectată ţinta (adică sensibilitatea receptorului), atunci obţinem expresia distanţei maxime de descoperire a radarului:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_{R\min} \cdot 64\pi^3}} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot A_e^2 \cdot \sigma}{P_{R\min} \cdot 4\pi \cdot \lambda^2}} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G \cdot A_e \cdot \sigma}{P_{R\min} \cdot \left(4\pi\right)^2}} \tag{1.22}$$

Expresiile de mai sus reprezintă cele trei forme ale *ecuaţiei radiolocaţiei* în spaţiul liber, adică fără a lua în considerare influenţele pământului şi ale atmosferei. Din aceasta rezultă că principalii factori care influenţează distanţa maximă de descoperire a unei ţinte de către un radar sunt: puterea de emisie a radarului, câştigul antenei, lungimea de undă folosită, sensibilitatea receptorului (puterea minimă recepţionată) şi suprafaţa efectivă de reflexie a ţintei.

Ecuaţia este valabilă atât pentru radarele în impulsuri, caz în care P_E şi $P_{R\,min}$ sunt puteri în impuls, cât şi pentru radarele cu emisie continuă, P_E şi $P_{R\,min}$ fiind puteri medii.

Din ecuaţie rezultă o serie de concluzii importante atât pentru proiectarea sistemelor radar, dar şi pentru utilizarea acestora. Pentru creşterea distanţei de descoperire este necesară

mărirea semnificativă a puterii de emisie. Astfel, dacă puterea emiţătorului este mărită de două ori, distanţa de acţiune creşte cu aproximativ 20%. Pentru dublarea distanţei de descoperire, puterea de emisie trebuie crescută de 16 ori. Creşterea puterii de emisie pune o serie de probleme constructive, cum ar fi încălzirea circuitelor emiţătorului (necesitând dispozitive de disipare a căldurii), tensiuni de alimentare mai mari etc. De asemenea, cu cât puterea de emisie este mai mare, cu atât creşte distanţa de la care radarul este descoperit de mijloacele de atac electronic.

O altă posibilitate de creştere a distanţei de acţiune este prin scăderea puterii minime de recepţie (îmbunătăţirea sensibilităţii receptorului). Această metodă are ca principale dezavantaje creşterea numărului de ţinte false, deoarece nivelul semnalului se apropie de cel al zgomotelor, precum şi necesitatea folosirii de circuite cu zgomot redus în receptor.

De asemenea, creşterea distanţei maxime de descoperire se obţine şi prin mărirea câştigului antenei. Prin mărirea câştigului de patru ori se obţine dublarea distanţei de acţiune. Câştigul poate fi îmbunătăţit prin creşterea dimensiunilor antenei, în condiţiile menţinerii constante a lungimii de undă.

Influenţa frecvenţei de lucru a radarului asupra distanţei de acţiune trebuie discutată numai în legătură cu parametrii antenei prezenţi în ecuaţie. Dacă dimensiunea antenei nu se modifică, prin mărirea lungimii de undă se micşorează câştigul antenei. Păstrând constant câştigul G, distanţa de acţiune creşte odată cu mărirea lungimii de undă, fiind proporţională cu $\sqrt{\lambda}$. Pentru menţinerea constantă a câştigului este necesară mărirea dimensiunilor geometrice ale antenei.

Modificarea oricărui parametru al radarului discutat anterior are o influenţă destul de redusă asupra distanţei maxime de descoperire, deoarece principalul termen din ecuaţie este ordinul patru al radicalului. Creşterea distanţei de acţiune se realizează prin îmbunătăţirea tuturor parametrilor prezentaţi.

Distanţa maximă de descoperire depinde de caracteristicile ţintei, mai exact este proporţională cu radical de ordinul patru din suprafaţa efectivă de reflexie. Astfel, ţintele cu suprafaţa mare sunt descoperite de la distanţe mult mai mari decât cele cu suprafaţă mică. De exemplu, o ţintă cu σ de 10 m^2 va putea fi observată de la o distanţă cu aproape 80% mai mare decât una cu σ de 1 m^2.

Expresiile ecuaţiei radiolocaţiei prezentate în formula 1.22 permit determinarea distanţei maxime de descoperire a radarului în funcţie de principalii parametrii ai acestuia în condiţii ideale. În practică, rezultatele pot diferi foarte mult de cele calculate cu această formulă, datorită influenţei altor factori, uneori la fel de importanţi ca cei prezentaţi anterior: influenţa pământului şi a atmosferei asupra propagării undelor, fluctuaţiile suprafeţei efective de reflexie a ţintei, natura probabilistică a puterii minime de recepţie, pierderile în sistemul radar etc.

În literatura de specialitate se întâlnesc o serie de expresii mai detaliate ale ecuaţiei radiolocaţiei, fiecare luând în considerare şi alţi factori ce influenţează distanţa de descoperire; totuşi, cu ajutorul ecuaţiei în forma ei simplă se poate determina cu o foarte bună aproximare distanţa de acţiune a radarului.

În cele ce urmează vom da două exemple de modificare a ecuaţiei radiolocaţiei prin luarea în considerare a altor factori. Dacă se iau în considerare şi pierderile în liniile de transmisie L_T, respectiv atenuarea undelor datorită absorbţiei atmosferei L_α, aceasta devine:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{P_{R\min} \cdot 64\pi^3 \cdot L_T \cdot L_\alpha}} \tag{1.23}$$

Dacă se ţine cont de factorul de zgomot al receptorului, ecuaţia devine:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{64\pi^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot F_{zg} \cdot \left(P_R / P_{zg}\right)_{\min}}} \tag{1.24}$$

unde: k – constanta lui Boltzmann, T_0 – temperatura standard în grade Kelvin, B- banda de trecere a receptorului (care aproximează banda zgomotului), F_{zg} – factorul de zgomot al receptorului, $(P_R/P_{zg})_{min}$ – raportul semnal –zgomot minim detectabil.

1.8 Distanţa maximă univocă

Distanţa maximă corespunzătoare unei perioade de repetiţie a impulsurilor se numeşte *distanţă maximă instrumentală*, numită şi distanţă maximă univocă sau fără ambiguităţi în determinarea distanţei:

$$D_{\max instr} = \frac{c \cdot T_r}{2} \tag{1.25}$$

După cum am văzut, distanţa maximă la care poate fi descoperită o ţintă este dată de ecuaţia radiolocaţiei. Această distanţă poate să fie mai mare decât cea corespunzătoare perioadei de repetiţie. Dacă o ţintă se află la o distanţă mai mare decât distanţa maximă instrumentală, iar semnalul reflectat de la ea este suficient de puternic pentru a fi recepţionat de radar, pot apărea următoarele situaţii:

- impulsul reflectat de la ţintă va sosi simultan cu emisia următorului impuls de sondaj; în acest caz semnalul nu mai este recepţionat;
- impulsul reflectat de la ţintă soseşte după emisia celui de-al doilea (sau chiar al treilea) impuls de sondaj; în această situaţie ţinta va fi afişată pe indicator la o distanţă falsă, deoarece timpul de întârziere este calculat având ca referinţă al doilea impuls de sondaj şi nu primul, a cărui reflexie este impulsul recepţionat.

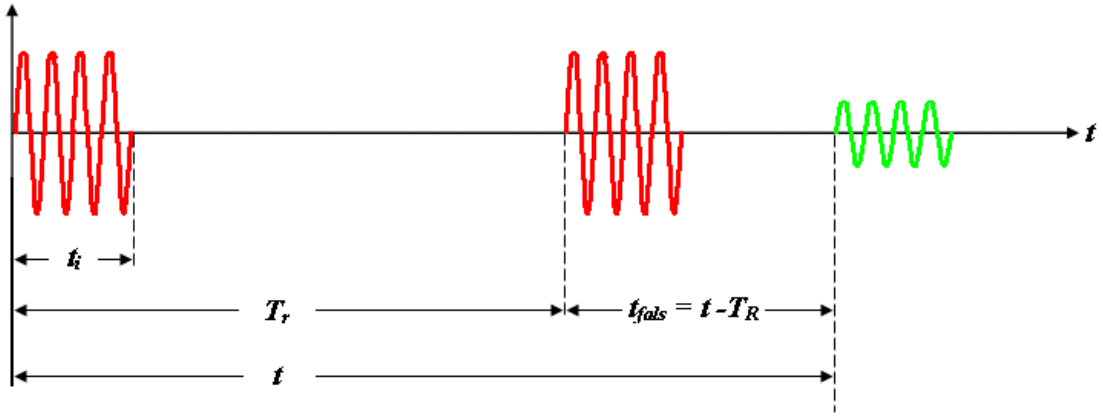


Fig. 1.4 – Diagramele de semnal pentru explicarea apariţiei ţintelor neunivoce

Ţintele din cea de-a doua situaţie, care au timpi de întârziere mai mari decât perioada de repetiţie, se numesc ţinte neunivoce sau ambigue (în engleză: second time around targets). Ele vor fi afişate pe indicator, dar la o distanţă falsă. Dacă t este timpul de întârziere al semnalului ecou, atunci distanţa la care va fi afişată ţinta va fi:

$$D' = \frac{c \cdot (t - k \cdot T_r)}{2} \tag{1.26}$$

unde k = 1, 2, 3 ..., astfel încât $(t - k \cdot T_r) < T_r$.

Cel mai utilizat procedeu de eliminare a ţintelor neunivoce îl reprezintă modificarea (vobularea) frecvenţei de repetiţie. În acest fel distanţa falsă la care va fi afişată ţinta se va modifica în funcţie de valoarea frecvenţei de repetiţie, iar ţintele neunivoce vor putea fi eliminate uşor printr-o metodă de integrare a impulsurilor.

1.9 Metode de explorare a spaţiului aerian

Explorarea spaţiului aerian reprezintă deplasarea caracteristicii de directivitate în scopul acoperirii întregului volum de cercetare al radarului. Deplasarea caracteristicii de directivitate se poate face prin deplasarea mecanică a sistemului de antenă sau a unor elemente ale acestuia, respectiv prin deplasarea electronică a caracteristicii, antena rămânând fixă.

Radarele utilizează diferite metode de explorare a spaţiului aerian. Cele mai utilizate metode pentru explorarea spaţiului aerian de către radarele de supraveghere aeriană sunt observarea circulară şi observarea prin baleiaj.

Observarea circulară a spaţiului aerian este metoda clasică folosită de radare, atât de cele cu baza la sol, cât şi cele de la bordul navelor sau avioanelor. Pentru observarea circulară antena sistemului radar execută o mişcare de rotaţie în plan azimutal, cu viteză constantă, de la 0 la 360°. Caracteristica de directivitate folosită este una îngustă în plan orizontal, pentru determinarea cu precizie a azimutului, şi largă în plan vertical, pentru acoperirea întregii zone în înălţime.

Timpul de iradiere reprezintă timpul cât ţinta se află în limitele caracteristicii de directivitate, fiind „iradiată" de impulsurile de sondaj. El depinde de lăţimea caracteristicii de directivitate în azimut θ_l şi de viteza de rotire a antenei Ω, conform formulei:

$$t_{ir} = \frac{\theta_l}{\Omega} \tag{1.27}$$

În acest timp ţinta este „iradiată" de un număr de N impulsuri de sondaj, acelaşi cu numărul de impulsuri recepţionate de la ţintă:

$$N = \frac{t_{ir}}{T_r} = t_{ir} \cdot F_r \tag{1.28}$$

unde T_r şi F_r sunt perioada respectiv frecvenţa de repetiţie a impulsurilor.

Înlocuind în această relaţie expresia timpului de iradiere de mai sus rezultă:

$$F_r = \frac{N \cdot \Omega}{\theta_l} \tag{1.29}$$

Expresia de mai sus reprezintă relaţia dintre frecvenţa de repetiţie a impulsurilor şi viteza de rotire a antenei.

Pentru o detecţie bună a ţintei se impune ca de la aceasta să fie recepţionate un număr suficient de impulsuri la fiecare rotire a antenei (în general 5 – 10). Rezultă că alegerea frecvenţei de repetiţie şi a vitezei de rotire trebuie făcută ţinând cont una de cealaltă. Pentru a asigura o determinare univocă a distanţei ţintelor, frecvenţa de repetiţie este determinată de valoarea distanţei maxime de descoperire. Din cele discutate rezultă că frecvenţa de repetiţie a impulsurilor trebuie să îndeplinească următoarea condiţie:

$$\frac{N_{\min} \cdot \Omega}{\theta_l} \le F_r \le \frac{c}{2 \cdot D_{\max}} \tag{1.30}$$

În concluzie, viteza de rotire a antenei radarului este limitată de distanţa maximă de descoperire. Cu cât este mai mare distanţa de acţiune, cu atât va fi mai mică valoarea admisă a vitezei de rotire, iar perioada de observare va fi mai mare.

Ca exemplu, radarele de descoperire îndepărtată trebuie să aibă o frecvenţă de repetiţie a impulsurilor nu foarte mare, pentru a asigura valoarea dorită a distanţei maxime instrumentale. Rezultă că viteza de rotire a antenei trebuie să fie redusă pentru a recepţiona un număr suficient de impulsuri de la ţintă. Astfel, timpul de împrospătare a informaţiei este mare (10 s pentru o viteză de 6 rotaţii pe minut). Acest lucru nu reprezintă o problemă, deoarece ţintele de interes se află la distanţe mari de radar şi de alte obiective.

În cazul radarelor pentru apărarea antiaeriană sau a celor de dirijare la aterizare este foarte important ca timpul de împrospătare a informaţiilor să fie mic, de obicei 1 s sau mai puţin. Rezultă că aceste radare trebuie să aibă o viteză de rotire a antenei mare, de ordinul zecilor de rotaţii pe minut. Astfel, frecvenţa de repetiţie va avea o valoare mare, rezultând o distanţă maximă instrumentală mică, de ordinul kilometrilor sau al câtorva zeci de kilometri. Aceste valori nu reprezintă o problemă, deoarece raza de acţiune a acestor tipuri de radare este redusă.

Observarea în sector reprezintă un caz particular al observării circulare, în care diagrama de directivitate este deplasată doar într-un anumit sector unghiular. O astfel de metodă este folosită de radarele pentru determinarea înălţimii, ale căror antene sunt balansate mecanic în plan vertical. Un alt exemplu este cel al radarelor de avertizare timpurie ce folosesc reţele fixe de antene, executând deplasarea electronică a caracteristicii de directivitate pentru acoperirea sectorului azimutal de cercetare.

Observarea prin baleiaj a spaţiului aerian se realizează folosind o caracteristică de directivitate îngustă în ambele planuri, de tip fascicul, asigurându-se astfel determinarea cu precizie a ambelor coordonate unghiulare.

Metodele de baleiaj sunt diferite, depinzând de destinaţia radarului respectiv. Se întâlnesc: baleiaj în formă de dinte de fierăstrău, liniar, elicoidal, spiral, conic etc.

O tendinţă actuală este aceea de a elimina deplasarea mecanică a antenelor. În acest scop se folosesc reţele fazate de antene cu baleiere electronică a fasciculului, dispuse astfel încât să acopere întreg volumul de 360° sau doar un anumit sector de interes. Explorarea volumului de cercetare se realizează după un anumit program, care poate fi modificat în scopul observării mai dese a unor ţinte a unor sau sectoare de interes.

1.10 Influenţa Pământului şi a atmosferei asupra distanţei de acţiune

Undele electromagnetice de frecvenţă foarte înaltă se propagă în linie dreaptă şi cu viteză constantă de la radar la ţintă şi înapoi. Prezenţa Pământului şi a atmosferei prezintă însă unele influenţe asupra propagării undelor şi implicit asupra funcţionării sistemelor radar.

Influenţa Pământului se manifestă în principal prin *reflexia* undelor la suprafaţa solului, respectiv prin *curbura* acestuia. Suprafaţa solului va reflecta o parte din energia undelor incidente, cealaltă parte refractându-se şi fiind apoi absorbită de pământ. Cantitatea de energie reflectată de suprafaţa pământului depinde în principal de următorii factori: natura solului (suprafeţei), unghiul de incidenţă, lungimea de undă şi polarizarea undei. Undele centimetrice vor fi mai puţin reflectate de suprafaţa solului, în timp ce undele metrice sunt aproape în totalitate reflectate. De asemenea, în gama undelor centimetrice reflexia este difuză, deoarece lungimea de undă este comparabilă cu neregularităţile suprafeţei; din acest motiv amplitudinea undei reflectate este destul de redusă.

În urma reflexiei unda reflectată îşi va modifica atât amplitudinea, cât şi faza. Reflexia la suprafaţa solului este caracterizată de coeficientul de reflexie. Pentru o suprafaţă perfect netedă şi conductoare, la un unghi de incidenţă foarte mic şi pentru o undă polarizată orizontal coeficientul de reflexie este $\Gamma = -1$. Aceasta înseamnă că în urma reflexiei unda reflectată are aceeaşi amplitudine cu cea incidentă, dar suferă un defazaj de 180°.

Principalul efect al reflexiei asupra funcţionării radarului o reprezintă *propagarea pe căi multiple* a undelor. După cum se observă din figura 1.5, semnalul emis de radar poate ajunge la ţintă pe două căi: una directă şi una prin reflexie la suprafaţa pământului. De asemenea, semnalul reflectat de ţintă ajunge la radar tot pe două căi separate. Astfel, la intarea în antenă vom avea două tipuri de unde, *unda directă*, respectiv *unda reflectată*. Cele două unde au amplitudinile şi fazele diferite, ca urmare a reflexiei şi a diferenţei de drum parcurse.

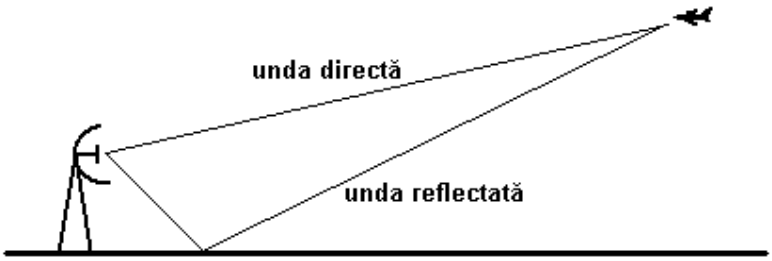


Fig. 1.5 – Propagarea pe căi multiple

În urma interferenţei undelor, semnalul recepţionat va diferi în amplitudine, în funcţie de diferenţa de amplitudine şi de fază dintre cele două unde. Pentru anumite unghiuri de înălţare, puterea semnalului creşte cu până la 16 ori faţă de cazul fără reflexii, în timp ce la alte unghiuri puterea semnalului scade, chiar până la valoarea zero. În acest fel distanţa de acţiune creşte la anumite unghiuri de înălţare şi se reduce la altele. Zona de descoperire în plan vertical va avea un aspect lobular. Numărul şi poziţia lobilor depinde de înălţimea antenei şi de lungimea de undă. În cazul ideal, când coeficientul de reflexie este egal cu unu, distanţa maximă de descoperire variază, în funcţie de unghiul de înălţare, de la zero la dublul valorii sale în spaţiul liber, deoarece amplitudinile celor două unde sunt egale. Când coeficientul de reflexie este subunitar, distanţa maximă va varia într-un domeniu mai restrâns, efectul de lobare fiind mai redus. De asemenea, efectul este mai mic în cazul undelor cu polarizare verticală.

În gama undelor centimetrice reflexia la suprafaţa pământului nu exercită o influenţă însemnată asupra distanţei de descoperire, fiind semnificativă doar la unghiuri de incidenţă mici. Din măsurători s-a constatat că în această gamă coeficientul de reflexie ia în general valori între 0,2 şi 0,5. Pentru undele metrice şi decimetrice pământul are o influenţă ridicată asupra distanţei de descoperire. Radarele de gamă metrică folosesc reflexia la suprafaţa solului pentru formarea caracteristicii de directivitate. Pentru aceasta, suprafaţa din imediata vecinătate a radarului (prima zonă Fresnel) trebuie să fie lipsită de denivelări, pentru a asigura o bună reflexie a undelor. De asemenea, există radare de gamă metrică ce folosesc fenomenul de propagare pe căi multiple pentru determinarea înălţimii ţintelor.

Influenţa reflexiei la suprafaţa pământului poate fi micşorată prin ridicarea unghiului de înclinare al caracteristicii de directivitate, dar are dezavantajul scăderii distanţei de descoperire pentru ţintele ce evoluează la înălţimi mici. O altă metodă este folosirea mai multor frecvenţe de lucru, dar diferenţa necesară între frecvenţe este uneori prea mare, depăşind banda de frecvenţe a radrului. O altă soluţie ar fi modificarea polarizării undelor.

În ceea ce priveşte curbura Pământului, aceasta se manifestă prin reducerea distanţei de descoperire în cazul ţintelor îndepărtate, din cauza limitării distanţei de vizibilitate directe. Deoarece undele se propagă în linie dreaptă, este imposibilă observarea ţintelor care se află sub linia orizontului. Distanţa până la care poate fi observată o ţintă ţinând cont de curbura Pământului se numeşte *distanţa vizibilităţii directe* sau distanţa orizontului radio. Valoarea ei depinde de înălţimea antenei h şi de înălţimea de zbor a ţintei H:

$$D_{dir} = \sqrt{2R}\left(\sqrt{h} + \sqrt{H}\right) \tag{1.31}$$

Formula se poate determina simplu prin câteva calcule geometrice, cu ajutorul figurii 1.6, considerând că raza Pământului este mult mai mare decât înălţimea ţintei sau a antenei. În calcule se pot folosi următoarele formule:

$$D_{dir}[km] = 3{,}57\left(\sqrt{h[m]} + \sqrt{H[m]}\right) = 113\left(\sqrt{h[km]} + \sqrt{H[km]}\right) \approx 3{,}57\sqrt{H[m]} \tag{1.32}$$

În formula de mai sus s-a luat în considerare raza geometrică a Pământului R, cu valoarea aproximativă de 6375 km. După cum vom vedea mai târziu, în practică se ia în considerare şi

efectul refracţiei undelor de către atmosferă, şi de aceea în locul razei geometrice se foloseşte o rază echivalentă a Pământului R_0, egală cu 4/3 din raza geometrică. În acest caz formula distanţei vizibilităţii directe devine:

$$D_{dir}[km] = 4{,}12\left(\sqrt{h[m]} + \sqrt{H[m]}\right) = 130\left(\sqrt{h[km]} + \sqrt{H[km]}\right) \approx 4{,}12\sqrt{H[m]} \qquad (1.33)$$

Din cauza curburii Pământului distanţa de acţiune a radarului se reduce foarte mult pentru ţinte care zboară la înălţimi mici. Pentru creşterea distanţei de descoperire trebuie mărită înălţimea antenei.

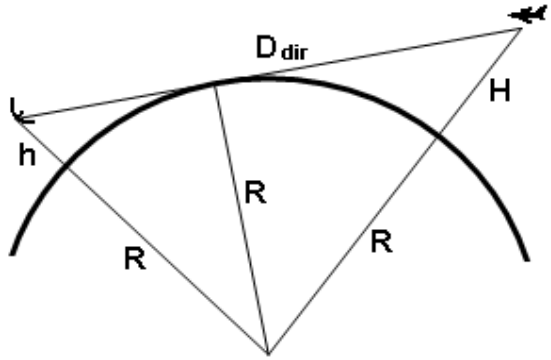


Fig. 1.6 – Distanţa vizibilităţii directe

După cum am văzut în formula 1.5, curbura Pământului influenţează şi calculul înălţimii. La ecuaţia simplă $H = D \cdot \sin\varepsilon$ se adaugă un factor de corecţie $D^2/2 \cdot R_0$ ce ţine cont de curbura Pământului. Utilizând raza echivalentă a Pământului, în factorul de corecţie este inclusă şi influenţa refracţiei. La această formulă mai pot fi adăugate şi alte corecţii, ce iau în considerare şi influenţa condiţiilor meteo (presiune atmosferică, temperatură) asupra indicelui de refracţie.

Un alt efect al pământului asupra distanţei maxime de descoperire se manifestă prin prezenţa în apropierea radarului a unor obstacole (forme de relief, vegetaţie, clădiri), care reduc distanţa de acţiune pentru ţintele aflate la înălţimi mici. Locul de dispunere al radarului trebuie ales astfel încât unghiurile de acoperire să fie reduse la minim, în special pe direcţiile principale de observare. Influenţa obstacolului depinde de înălţimea sa şi de distanţa până la acesta, exprimate prin unghiul de acoperire sau de mascare α. Prin calcule geometrice simple se poate calcula distanţa de acţiune în funcţie de unghiul de acoperire:

$$D = -(R+h)\sin\alpha + \sqrt{(R+H)^2 - (R+h)^2\cos^2\alpha} \qquad (1.34)$$

unde R – raza Pământului (geometrică sau echivalentă), h – înălţimea antenei, H – înălţimea ţintei.

Atmosfera influenţează distanţa maximă de descoperire a radarului prin *refracţia* şi *atenuarea* undelor electromagnetice. Deoarece atmosfera nu este uniformă, coeficientul său de refracţie se micşorează odată cu creşterea înălţimii. Coeficientul de refracţie depinde de presiunea atmosferică, temperatură şi umiditate. Datorită modificării coeficientului de refracţie cu înălţimea, traiectoria undelor electromagnetice se curbează în jos (figura 1.7). Fenomenul poartă numele de *refracţie pozitivă*, deoarece distanţa vizibilităţii directe creşte, ţintele putând fi descoperite de la distanţe mai mari, dincolo de limita orizontului optic.

Creşterea distanţei vizibilităţii directe ca urmare a refracţiei undelor poate fi interpretată ca o mărire a razei Pământului. De aceea, pentru a lua în considerare şi efectul refracţiei, se utilizează o valoare echivalentă a razei Pământului, de aproximativ 4/3 din raza geometrică, adică 8490 km (sau aproximativ 8500 km).

Refracţia undelor are ca efect şi apariţia unor erori în determinarea distanţei şi înălţimii ţintelor.

Fig. 1.7 – Refracţia pozitivă

Un caz particular al refracţiei pozitive îl reprezintă *suprarefracţia*, când coeficientul de refracţie *n* scade aşa de rapid cu înălţimea încât în straturile inferioare ale troposferei se produce o reflexie totală a undelor. Fenomenul este caracteristic unghiurilor mici de înălţare, sub 1,5°. Propagarea undelor are loc prin reflexii succesive, în troposferă şi la suprafaţa solului, ca printr-un ghid de undă (ghidul de undă troposferic), înălţimea acestuia fiind de câteva zeci de metri. Ca urmare a suprarefracţiei, distanţa de acţiune a radarului pentru ţintele aflate la înălţimi mici creşte considerabil de mult faţă de condiţiile standard. Suprarefracţia apare în general în zonele tropicale.

O altă situaţie, care apare când atmosfera este diferită de cea standard, o reprezintă *refracţia negativă*, când traiectoria undelor se curbează în sus.

O altă influenţă pe care atmosfera o are asupra razei de acţiune a radarului o reprezintă *atenuarea* undelor electromagnetice. Atenuarea undelor este cauzată de absorbţia energiei de către moleculele de gaz şi vaporii de apă, precum şi de dispersia undelor de către precipitaţii. Absorbţia este puternică pentru frecvenţe egale sau apropiate de cele de rezonanţă ale moleculelor de gaz sau de apă. Atenuarea este caracterizată de coeficientul de atenuare α, exprimat în dB/km.

Coeficientul de atenuare creşte odată cu creşterea frecvenţei undelor. Din acest motiv, radarele de descoperire îndepărtată folosesc frecvenţe de lucru mai mici. Pentru frecvenţe de lucru sub 1 GHz efectul atenuării este nesemnificativ; acesta devine considerabil pentru frecvenţe de peste 10 GHz. De asemenea, pentru frecvenţe sub 3 GHz, influenţa vaporilor de apă asupra atenuării poate fi neglijată. Datorită rarefierii atmosferei, coeficientul de atenuare scade aproape liniar cu creşterea înălţimii.

Capitolul 2

TRASEE DE FRECVENŢĂ FOARTE ÎNALTĂ

2.1 Noţiuni generale despre liniile de transmisie

Liniile de transmisie sunt acele dispozitive care asigură transmiterea dirijată a energiei de frecvenţă foarte înaltă dintr-un punct în altul. În cazul sistemelor radar ele asigură în principal transmiterea semnalelor de f.f.i. de la emiţător la antenă şi de la antenă la receptor. De asemenea, ele sunt folosite pe larg în traseele de semnal din sistemul de antenă. Segmente ale liniilor de transmisie sunt folosite pentru conectarea diverselor dispozitive şi circuite din compunerea radarului. Liniile de transmisie mai pot fi întâlnite şi sub denumirea de **fideri**.

În practică se întâlnesc mai multe tipuri de linii de transmisie, cele mai utilizate în traseele de frecvenţă foarte înaltă ale radarelor fiind de departe *cablurile coaxiale* şi *ghidurile de undă*. Folosirea unui anumit tip de linie depinde în principal de gama de frecvenţe şi de puterea u.e.m. transmise prin aceasta.

2.1.1 Parametrii liniilor de transmisie

Principalele caracteristici ale liniilor de transmisie sunt atenuarea, coeficientul de reflexie, randamentul liniei, lungimea electrică şi puterea maximă pe care o poate transmite.

Atenuarea este exprimată prin coeficientul de atenuare care reprezintă raportul dintre puterea transmisă la intrarea liniei şi puterea recepţionată de sarcină la ieşire. El este exprimat în decibeli pe unitatea de lungime (dB/m) şi creşte odată cu frecvenţa.

Principala cauză a atenuării o reprezintă pierderile în linii, care pot fi clasificate în trei mari categorii: pierderi prin radiaţie, pierderi în dielectric şi pierderi în conductor. *Pierderile în conductor* se manifestă în primul rând prin efectul Joule; din cauza rezistenţei conductoarelor, o parte din energie este disipată sub formă de căldură. Un alt efect care determină pierderi în conductor este *efectul de suprafaţă* sau *efectul pelicular*. La frecvenţe înalte, curenţii care trec prin conductor vor circula doar prin suprafaţa acestuia, crescând astfel rezistenţa conductorului. Grosimea stratului exterior al conductorului prin care circulă curenţii scade odată cu creşterea frecvenţei. Pentru a micşora pierderile anumite conductoare sunt acoperite cu un strat dintr-un material mai bun conducător decât cuprul, ca de exemplu argintul.

Pierderile în dielectric apar datorită efectului de încălzire al dielectricului dintre conductoarele liniei, fiind aproape nul când dielectricul este aerul. *Pierderile prin radiaţie* apar deoarece o parte din energie se va pierde prin radiaţia acesteia în exteriorul liniei, conductoarele comportându-se ca o antenă. Acest tip de pierderi pot fi reduse şi chiar eliminate prin ecranarea liniilor.

Randamentul sau eficienţa unei linii este un coeficient egal cu raportul dintre puterea transferată sarcinii (la ieşirea liniei) şi puterea la generator aplicată liniei (la

începutul liniei). În cazul ideal randamentul este egal cu unu, dar în practică este subunitar. Randamentul ia în considerare şi alţi factori în afară de atenuare, cum ar fi pierderile datorate neadaptării la capetele liniei (între generator şi linie, sau între linie şi sarcină).

Lungimea electrică a liniei reprezintă raportul dintre lungimea geometrică a liniei şi lungimea de undă. Acest parametru caracterizează defazajul introdus de linie. El este foarte important în acele aplicaţii în care trebuie să se ţină seama de faza semnalelor transmise prin linii, ca de exemplu tehnica monoimpuls sau reţelele fazate de antene.

Puterea maximă pe care o poate transmite o linie este limitată de străpungerea electrică a dielectricului dintre linii şi de supraîncălzirea conductoarelor şi izolatorilor. În practică se foloseşte o putere a undelor transmise prin linii de aproximativ 25 ÷ 30% din puterea maximă care poate fi transmisă prin linie.

Un alt parametru important este *impedanţa caracteristică*, care reprezintă raportul dintre amplitudinea tensiunii şi cea a curentului prin linie:

$$Z_0 = \frac{U_m}{I_m} \tag{2.1}$$

Viteza de propagare a undei printr-o linie depinde de mediul din jurul liniei şi anume:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}, \tag{2.2}$$

unde c este viteza luminii, ε_r şi μ_r sunt permitivitatea electrică, respectiv permeabilitatea magnetică relative ale mediul de propagare.

Coeficientul de reflexie Γ reprezintă raportul dintre amplitudinea undei reflectate şi cea a undei incidente care se propagă prin linie. În cazul în care la capătul liniei se conectează o sarcină cu impedanţa egală cu cea caracteristică a liniei Z_0, atunci la capătul liniei nu vor exista reflexii, deci Γ are valoarea zero. Putem exprima coeficientul de reflexie şi în funcţie de cele două impedanţe:

$$\Gamma = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0}. \tag{2.3}$$

Un alt parametru ce arată cât anume din puterea undei este reflectată înapoi în linie îl reprezintă *coeficientul pierderilor de reflexie* („return loss”). Acest coeficient este exprimat în decibeli şi e egal cu raportul dintre puterea undei incidente şi puterea undei reflectate, având întotdeauna valore pozitivă:

$$coef.\ pierderi\ de\ reflexie = 10\lg\left(\frac{P_I}{P_R}\right) = -20\lg\left(\frac{U_R}{U_I}\right) = -20\lg\left(\frac{CUS-1}{CUS+1}\right) = -20\lg|\Gamma| \tag{2.4}$$

Pentru a caracteriza regimul de undă dintr-o linie se foloseşte *coeficientul de undă progresivă* (CUP), care indică a câta parte din puterea undei directe este transferată sarcinii. Coeficientul de undă progresivă se defineşte ca raportul dintre tensiunea minimă (curentul minim) din linie şi tensiunea maximă (curentul maxim):

$$CUP = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{Z_0}{Z_S}, \text{ (pentru } Z_0<Z_S,\ Z_S \text{ – impedanţa de sarcină).} \tag{2.5}$$

Mai des folosit este inversul CUP, numit *coeficient de undă staţionară* (CUS):

$$CUS = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{Z_S}{Z_0}, \text{ (pentru } Z_0<Z_S). \tag{2.6}$$

Se observă că valoarea CUS poate fi între 1 şi ∞; pentru o undă progresivă (cazul ideal) CUS este egal cu unu. Astfel, cu cât valoarea CUS este mai mică, apropiindu-se de unitate, cu atât regimul din linie se apropie mai mult de cel de undă progresivă, adică mai

multă putere va fi transferată sarcinii de la generator. De obicei, o valoare a CUS ≤ 2 este considerată acceptabilă pentru majoritatea aplicaţiilor. CUS este mai des întâlnit în literatura de specialitate occidentală sub denumirea de **VSWR** (Voltage Standing Wave Ratio).

Coeficientul de reflexie Γ poate fi la rândul lui exprimat în funcţie de CUS:

$$|\Gamma| = \frac{U_R}{U_I} = \frac{CUS-1}{CUS+1}; \quad \Rightarrow \quad CUS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{2.7}$$

2.1.2 Adaptarea de impedanţă

După cum am văzut anterior, la conectarea unei sarcini la o linie de transmisie apar reflexii ca rezultat al diferenţei dintre impedanţa sarcinii şi impedanţa caracteristică a liniei.

Relaţia dintre impedanţa de sarcină Z_S, impedanţa caracteristică a liniei şi coeficientul de reflexie Γ este dată de expresia:

$$Z_S = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}. \tag{2.8}$$

Din relaţia de mai sus rezultă că pentru asigurarea unui transfer maxim de putere de la o linie la sarcină, neluând în seamă pierderile din linie, este necesar ca $Z_S=Z_0$ ($\Gamma=0$). Procesul de egalare al celor două impedanţe poartă denumirea de *adaptare de impedanţă*.

Pentru adaptarea de impedanţă dintre linie şi sarcină, între acestea se introduce un circuit de adaptare. Acest circuit de adaptare transformă impedanţa de intrare a sarcinii într-o impedanţă egală cu cea a liniei. Dacă unul din capetele unei linii sau portul unui dispozitiv nu trebuie conectat în circuit, la acesta se conectează o *sarcină echivalentă*, a cărei impedanţă este egală cu cea a liniei sau a portului respectiv.

Pentru adaptarea de impedanţă se pot folosi o serie de metode, din care amintim: ramificaţii de adaptare (serie sau derivaţie, simple sau multiple), transformatoare λ/4 (simple sau multiple); elemente cu constante concentrate sau combinaţii ale acestora.

2.2 Cabluri coaxiale

Cablurile coaxiale sunt de departe cele mai întâlnite tipuri de linii de transmisie, folosite în diverse aplicaţii cum ar fi conectarea componentelor şi dispozitivelor de microunde, transmiterea semnalelor de la un echipament la altul sau măsurătorile de microunde.

După cum se observă în figura 2.1, cablurile coaxiale sunt realizate dintr-un conductor interior şi unul exterior, dispuse concentric, separate de un dielectric. În exterior cablul este acoperit cu un material izolator, pentru protecţie. Conductorul exterior se conectează la masă, asigurându-se în acest fel ecranarea cablului.

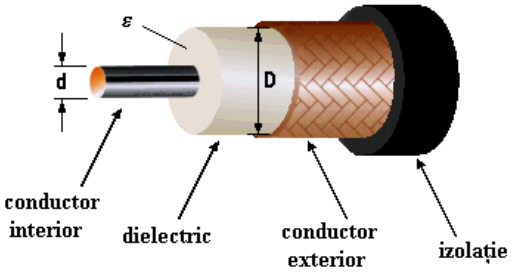


Fig. 2.1 – Construcţia cablului coaxial

Cele două conductoare sunt de obicei realizate din cupru. Pentru reducerea pierderilor de conducţie la frecvenţe înalte, conductorul interior şi uneori şi cel exterior sunt acoperite cu un strat subţire de argint sau alt material foarte bun conductor. Dielectricul este de obicei polietilena, dar mai sunt utilizate şi alte materiale, cum ar fi teflonul. Dielectricul poate fi realizat şi sub formă de spumă, fapt ce micşorează pierderile în dielectric datorită prezenţei aerului. Ca izolator exterior în cele mai multe cazuri se foloseşte PVC-ul, dar în unele aplicaţii se utilizează un material ignifug.

Principalii parametri ai cablurilor coaxiale sunt: impedanţa caracteristică, coeficientul de atenuare, tipul şi dimensiunile conductoarelor, tipul şi caracteristicile dielectricului, puterea sau tensiunea maximă, capacitatea pe unitatea de lungime.

Impedanţa caracteristică a cablului coaxial depinde de dimensiunile geometrice ale cablului şi de tipul dielectricului:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{D}{d}\right) \approx \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}}\lg\left(\frac{D}{d}\right). \tag{2.9}$$

unde d este diametrul conductorului interior, D diametrul dielectricului, iar ε_r permitivitatea electrică relativă a dielectricului.

Cablurile coaxiale sunt utilizate la frecvenţe pornind de la curentul continuu şi până în domeniul undelor milimetrice. În prezent ele funcţionează până la frecvenţe de 50 GHz. Impedanţele caracteristice cele mai întâlnite sunt de 50 Ω şi 75 Ω. Atât cablurile cât şi mufele coaxiale sunt standardizate, parametrii fiecărui tip fiind prezentate în cataloagele producătorilor.

În funcţie de aplicaţie, cablurile coaxiale sunt construite *flexibile* sau *semirigide*. La cele flexibile, conductorul exterior este realizat sub formă de plasă. În cazul celor semirigide conductorul exterior e realizat dintr-un tub metalic ce poate fi îndoit în anumite limite. În figura 2.2 sunt prezentate câteva exemple de cabluri coaxiale.

Fig. 2.2 – Exemple de cabluri coaxiale

Un alt tip de cablul coaxial este cel *rigid*, numit şi ghid de undă coaxial; acesta este format dintr-un conductor interior montat în interiorul unui cilindru conductor, care formează al doilea conductor. În unele aplicaţii conductorul interior este la rândul lui tubular. Cele două conductoare sunt izolate şi menţinute la distanţă constantă unul faţă de celălalt cu ajutorul unor şaibe izolatoare plasate la distanţe egale de-a lungul cablului. Avantajele principale ale acestui tip de linie sunt pierderile reduse prin radiaţie şi interferenţele exterioare mici. Faţă de cablul coaxial flexibil, acest tip de cablu permite transmiterea energiei la puteri mai mari. Dezavantajele cablului coaxial rigid sunt costul

ridicat de producţie, sensibilitatea ridicată la umiditate şi pierderile ridicate la frecvenţe mari.

Pentru conectarea cablurilor coaxiale între ele sau la diverse dispozitive sau echipamente se folosesc *mufele coaxiale*. Ca şi cablurile coaxiale, mufele au un conductor interior şi unul exterior, separate de un dielectric. Mufele au aceeaşi impedanţă cu a cablurilor la care se conectează. Pierderile introduse de mufe trebuie să fie cât mai mici şi în acest scop metalul din care sunt confecţionate este acoperit cu un metal foarte bun conductor, ca de exemplu aur, rodiu, nichel, cositor sau argint.

Fiecare tip de mufă are două variante constructive: *mamă* şi *tată*, în funcţie de construcţia conductorului interior. Pentru asigurarea conexiunii între tipuri diferite de mufe se folosesc adaptoare. *Adaptorul* reprezintă o interfaţă cu pierderi reduse între două tipuri diferite de mufe coaxiale. În prezent, datorită multitudinii de aplicaţii, există un număr foarte mare de tipuri de mufe coaxiale, cele mai utilizate fiind cele BNC, SMA şi de tip N (figura 2.3).

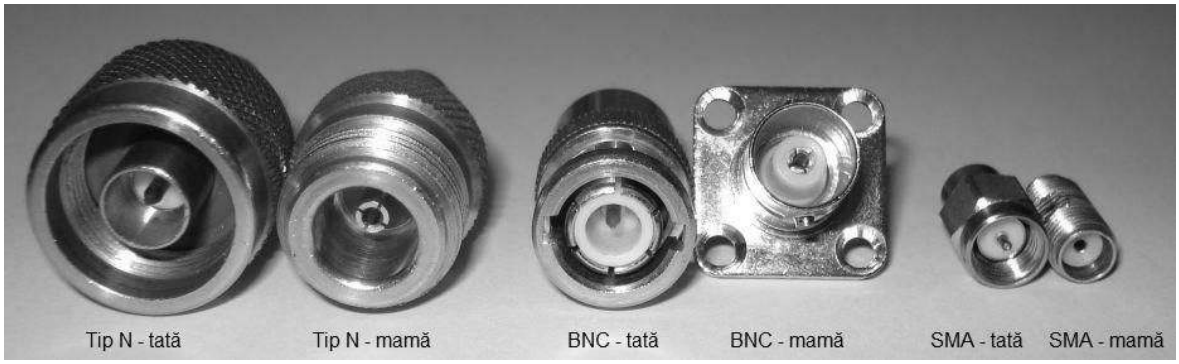


Figura 2.3 – Mufe coaxiale

Întreţinerea mufelor reprezintă un factor important în exploatarea traseelor de frecvenţă foarte înaltă. Prezenţa impurităţilor (ulei, grăsimi, praf) conduce la degradarea coeficientului de undă staţionară. Strângerea mufelor trebuie să fie suficient de puternică pentru a asigura o cuplare bună, dar nu excesivă, pentru a evita deteriorarea acestora. În acest scop se recomandă folosirea unei chei dinamometrice. La conectarea mufelor, întodeauna se roteşte partea mobilă a mufei şi nu cablul sau mufa fixă.

2.3 Ghiduri de undă

2.3.1 Noţiuni generale despre ghidurile de undă

Liniile bifilare şi cablurile coaxiale sunt folosite în general până în gama undelor centimetrice, deoarece odată cu creşterea frecvenţei cresc şi pierderile în linii. În gama undelor centimetrice cresc pierderile în dielectricul ce separă cele două conductoare şi se măreşte pericolul de străpungere a dielectricului în cazul transmiterii puterilor mai mari. În cazul cablurilor coaxiale, conductorul interior are o suprafaţă exterioară mică, iar la frecvenţe mai mari de câţiva GHz, datorită efectului de suprafaţă, rezistenţa conductorului creşte foarte mult astfel încât aceste cabluri nu mai pot fi folosite decât pentru distanţe foarte scurte. După cum se observă, aceste dezavantaje sunt legate de conductorul interior; din această cauză s-a căutat eliminarea acestuia, urmând ca transmiterea energiei să se facă prin interiorul unui tub gol; astfel a rezultat ghidul de undă.

Putem astfel defini *ghidul de undă* ca fiind o linie de transmisie formată dintr-un tub conductor cu secţiunea constantă prin interiorul căruia se propagă unde electromagnetice. În sens mai larg se consideră ghid de undă orice sistem mărginit fizic şi care permite propagarea ghidată a u.e.m. (ex. ghidul de undă troposferic, un dielectric solid etc.). Printr-un ghid undele se vor propaga prin reflexia succesivă de pereţii interiori ai acestuia.

Ghidurile de undă pot fi clasificate în funcţie de forma secţiunii: dreptunghiulare (figura 2.4), circulare, eliptice, tip H, Π sau U etc. În practică, cele mai folosite ghiduri sunt cele metalice, dreptunghiulare sau circulare. Ghidurile metalice au următoarele avantaje faţă de celelalte linii de transmisie:

- ecranează complet câmpul, pierderile prin radiaţie fiind nule;
- au pierderi mici în pereţi (suprafaţa interioară fiind mare, rezistenţa cauzată de efectul de suprafaţa redusă);
- pierderile în dielectric sunt mici, deoarece dielectricul este aerul;
- permit transmiterea unor puteri mari, fără pericol de străpungere;
- au construcţia simplă şi robustă.

Aceste avantaje ale ghidurilor de undă ne pot duce la concluzia că ele ar fi singurul tip de linii de transmisie folosit. Totuşi, ghidurile de undă au şi anumite dezavantaje, care le fac practice doar la frecvenţe ridicate. Principalele dezavantaje sunt:

- dimensiunile fizice ale ghidurilor sunt dependente de lungimea de undă, ceea ce le face improprii de utilizat la frecvenţe sub 1 GHz;
- ghidurile de undă sunt dificil de instalat datorită rigidităţii lor; pentru conectarea segmentelor de ghid sunt necesare joncţiuni speciale care cresc costurile de realizare;
- sunt grele şi au costul de fabricaţie ridicat;
- deşi au pierderile în dielectric mici, formarea undelor staţionare în ghiduri poate duce la străpungeri în dielectric şi care pot deteriora pereţii ghidurilor.

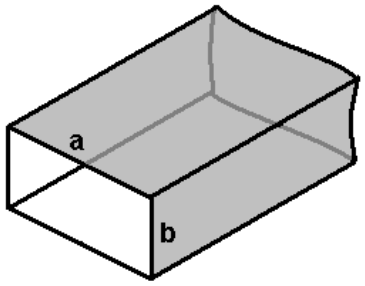


Fig. 2.4 – Ghidul de undă dreptunghiular

Grosimea pereţilor ghidurilor este aleasă doar pentru asigurarea unei rezistenţe mecanice mari. Pereţii sunt realizaţi dintr-un material bun conductor. Pentru creşterea stabilităţii oscilaţiilor undelor transmise prin ghid, pereţii interiori sunt acoperiţi cu lac, iar pentru reducerea pierderilor în conductor pot fi acoperiţi cu un strat subţire de argint, aur sau alt material foarte bun conducător.

Ghidurile de undă actuale sunt utilizate la frecvenţe pornind de la 250 MHz şi până la peste 300 GHz. Principalii parametri ai ghidurilor de undă sunt: frecvenţa critică pe modul H_{10}, gama frecvenţelor de lucru, atenuarea, dimensiunile fizice şi materialul conductor. Pentru construcţia pereţilor ghidurilor se folosesc următoarele materiale conductoare: cupru, alamă, argint şi aluminiu.

Pentru a descrie o anumită structură a câmpului într-un ghid se foloseşte termenul de *mod de undă*. Printr-un anumit ghid de undă se pot propaga mai multe moduri de undă. Pentru fiecare dintre acestea există o anumită frecvenţă critică, frecvenţă care depinde de

dimensiunile geometrice ale ghidului. Undele se vor propaga pe un anumit mod doar dacă frecvenţa lor este mai mare decât frecvenţa critică. Dacă frecvenţa undei este mai mică decât cea critică, unda va fi rapid atenuată.

Pentru un ghid de undă dreptunghiular lungimea de undă critică se determină cu formula:

$$\lambda_{cr} = \frac{c}{f_{cr}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \tag{2.10}$$

unde *a* este dimensiunea peretelui lat al ghidului, *b* cea a peretelui îngust, iar *m* şi *n* sunt indicii corespunzători modului de propagare.

Modul de undă fundamental pentru un anumit tip de ghid este acela care are cea mai mare lungime de undă critică (sau cea mai mică frecvenţă critică). Pentru ghidurile de undă dreptunghiulare, modul de undă fundamental este modul H_{10}. În acest caz lungimea de undă critică va fi:

$$\lambda_{cr_{10}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2}} = 2a, \tag{2.11}$$

iar frecvenţa critică:

$$f_{cr_{10}} = \frac{c}{2a}. \tag{2.12}$$

După cum am văzut, alegerea dimensiunilor ghidului este foarte importantă pentru a asigura o bună propagare a undelor. Gama de frecvenţe în care funcţionează un anumit ghid este strict dependentă de dimensiunile acestuia. Dimensiunile ghidului de undă se aleg astfel încât undele să se propage doar pe un singur mod (de obicei modul fundamental) pentru o anumită gamă de frecvenţe.

Domeniul de frecvenţe în care un anumit ghid de undă este proiectat să funcţioneze se întinde de la o frecvenţă mai mare decât cea critică a modului fundamental şi până aproape de frecvenţa critică a modului de ordinul doi. Astfel, conform relaţiei (2.10), lungimea de undă la care poate fi folosit un ghid de undă pe modul fundamental este cuprinsă între *a* şi *2a*. Practic, domeniul se alege mai mic pentru a evita alte probleme de propagare.

2.3.2 Elemente ale traseelor cu ghiduri de undă

În practică, traseele cu ghiduri de undă sunt realizate sub formă de segmente de ghid, cu lungimi care nu depăşesc câţiva metri. Astfel, ghidurile sunt mai uşor de montat şi transportat, mai simplu de fabricat şi mai ieftin de înlocuit.

Pentru realizarea întregului traseu, segmentele de ghid de undă trebuiesc îmbinate. Îmbinările ghidurilor de undă pot fi *rotative* sau *fixe*. Îmbinările fixe sunt realizate sub formă de *flanşe*, legate între ele cu ajutorul şuruburilor. Cel mai simplu tip de flanşă folosită la îmbinarea ghidurilor este *flanşa netedă*, dar există şi alte tipuri mai speciale, cel mai folosit fiind *flanşa drosel*. Aceasta asigură reducerea la minim a pierderilor cauzate de imperfecţiunile îmbinării.

În cazul radarelor, datorită rotirii antenei este necesară transmiterea energiei de f.f.i. de la elementele fixe ale traseului ghid de undă la cele mobile. Acest lucru se realizează prin intermediul *îmbinării rotative*. În cazul îmbinărilor rotative se utilizează în general un

ghid de undă circular, deoarece rotirea ghidului dreptunghiular ar duce la apariţia distorsiunilor în structura câmpului electromagnetic din ghid.

Traseele cu ghiduri de undă pot avea diverse forme. De aceea este necesară îndoirea ghidurilor de undă, pentru aceasta utilizându-se *coturile*. Dimensiunile şi forma ghidului, precum şi proprietăţile dielectricului trebuie menţinute constante de-a lungul cotului, pentru a nu produce reflexii şi pierderi. Acelaşi lucru este valabil şi în cazul *răsucirii* ghidului. De aceea coturile şi răsucirile trebuie să îndeplinească anumite condiţii.

Ghidul de undă flexibil permite realizarea unor îndoiri şi răsuciri care se pot modifica. Ghidurile flexibile sunt realizate în general cu pereţii sub forma unor panglici crestate din alamă, cromate în interior. Deoarece suprafaţa interioară a ghidului flexibil nu este netedă, pierderile sunt mai mari decât în cazul ghidurilor rigide. Din această cauză ghidurile flexibile sunt realizate la lungimi mici.

În practică apare necesitatea ca energia de f.f.i. să fie dirijată prin mai multe circuite în diverse scopuri: pentru măsurători, pentru schimbare de frecvenţă etc. În acest scop se utilizează ramificaţiile în ghiduri de undă. Ramificaţiile sunt de două tipuri*: ramificaţii de tip T* şi *ramificaţii hibride*. Ramificaţiile hibride sunt combinaţii ale celor de tip T, cele mai folosite fiind *T-magic* şi *inelul hibrid*. Ramificaţiile hibride sunt folosite la construcţia amestecătoarelor de semnal (mixere) sau a comutatoarelor de antenă.

Pentru introducerea sau extragerea energiei din ghiduri se folosesc *sonde*, *bucle* sau *fante*, acestea reprezentând de fapt mici antene care radiază energia în ghid. Cea mai folosită este *sonda*, care se dispune într-un punct din peretele ghidului în care câmpul electric este maxim, orientarea sondei fiind paralelă cu liniile de câmp electric. În cazul ghidului dreptunghiular, sonda se dispune la jumătatea peretelui lat, paralelă cu pereţii înguşti şi la o distanţă de $\lambda/4$ de un capăt închis al ghidului. Cantitatea de energie care se transferă ghidului poate fi redusă prin micşorarea lungimii sondei, prin modificarea poziţiei ei sau prin ecranare. Mărimea, forma şi dispunerea sondei determină parametrii semnalului transferat în ghid. În cazul transmiterii puterilor mari, construcţia sondei este mai deosebită, fiind folosite sonda cu tijă transversală sau sonda cu clopot.

Bucla se montează într-un punct în care câmpul magnetic este maxim, planul buclei fiind perpendicular pe liniile de câmp magnetic. Prin creşterea diametrului buclei se poate mări puterea transferată ghidului. Deoarece sondele şi buclele sunt conectate la un cablu coaxial, aceste dispozitive se mai numesc şi treceri ghid de undă – cablu coaxial. *Fanta* reprezintă o fereastră dreptunghiulară şi se realizează într-un punct al peretelui ghidului în care curenţii de suprafaţă au intensitate maximă, orientarea ei fiind perpendiculară pe direcţia acestor curenţi. Fantele sunt folosite în special pentru transferul de energie dintr-un ghid în altul.

Un alt mod de a dirija energia dintr-un circuit în altul se realizează prin utilizarea *cuplorului directiv (direcţionale).* Cuploarele directive sunt dispozitive simple care permit câmpului electromagnetic dintr-un ghid, numit ghid principal, să treacă în alt ghid, secundar. Legătura dintre ghiduri se realizează prin intermediul unei fante. Fanta poate fi circulară, eliptică, dreptunghiulară sau în cruce. Majoritatea cuploarelor asigură transferul energiei doar într-un singur sens, dar există şi cuploare care permit trecerea undei în ambele sensuri. Acestea se numesc bidirecţionale.

Atenuatoarele sunt dispozitive care au rolul de a reduce valoarea puterii transmise prin ghiurile de undă**.** Atenuatoarele disipative realizează atenuarea cu ajutorul unui mediu dielectric cu pierderi, acesta disipând energia sub formă de căldură. Ghidul de undă este umplut pe o porţiune a sa cu un material cu pierderi, atenuatorul fiind în acest caz fix (cu atenuare constantă). Un alt tip de atenuator este cel cu pană de dielectric. Avantajul acestuia este că poate fi realizat variabil. Variaţia atenuării se obţine prin modificarea poziţiei penei în interiorul ghidului. Pentru micşorarea reflexiilor, dielectricul se

prelucrează sub o formă înclinată, asigurându-se trecerea lentă a undei de la un mediu la celălalt.

Sarcina absorbantă reprezintă o terminaţie a ghidului de undă, întreaga energie fiind absorbită de sarcină. Astfel, sarcina absorbantă introduce o atenuare totală, întreaga energie de f.f.i. transformându-se în căldură. Sarcinile absorbante sunt folosite în general pentru înlocuirea antenelor pe timpul verificărilor şi măsurătorilor.

Datorită proprietăţilor speciale ale feritei, aceasta este un material folosit în construcţia mai multor dispozitive pe ghid de undă: sarcini absorbante, defazoare, atenuatoare, izolatoare, circulatoare etc.

Izolatorul este un dispozitiv pe ghid de undă cu ferită ce permite trecerea undei electromagnetice prin ghid într-un singur sens, blocând propagarea în sens invers. El este construit prin introducerea unui bloc de ferită într-un ghid de undă dreptunghiular sau circular. Ferita este montată într-un câmp magnetic generat cu ajutorul unui electromagnet sau a unui magnet permanent.*Defazorul* cu ferită se realizează similar cu izolatorul, cu mici diferenţe constructive. Prin rotirea planului de polarizare cu un anumit unghi, unda va fi defazată proporţional cu acest unghi.

Circulatorul este realizat în mod similar, singura deosebire fiind că are 3 sau 4 porturi. El este realizat fie cu un ghid cu ramificaţie T, fie cu un cuplor directiv. Circulatorul este un dispozitiv care permite undei aplicate la un anumit port să se propage doar la portul următor, împiedicând propagarea către celelalte porturi.

Pentru realizarea adaptării impedanţei ghidului cu cea a sarcinii sunt folosite diferite dispozitive de transformare a impedanţei, montate la intrarea sarcinii. Cele mai folosite dispozitive de adaptare sunt *diafragmele*. Acestea sunt nişte membrane metalice dispuse în interiorul ghidurilor şi care au o deschizătură prin care trec undele.

Un alt tip de dispozitive de adaptare sunt *tijele* şi *şuruburile*. Folosirea şuruburilor permite reglarea impedanţei ghidului, asigurând adaptarea în cazul mai multor lungimi de undă.

2.3.3 Cavităţi rezonante

În domeniul microundelor se folosesc circuite oscilante speciale, realizate cu constante distribuite. În cazul ghidurilor de undă, aceste circuite poartă denumirea de cavităţi rezonante. *Cavitatea rezonantă* reprezintă un domeniu dielectric închis de o suprafaţă metalică foarte bună conducătoare, care se comportă ca un circuit rezonant, conţinând în interior un câmp electromagnetic oscilant.

Cele mai simple tipuri de cavităţi rezonante se obţin din segmente de ghiduri de undă, închise la ambele capete. Vom avea astfel cavităţi rezonante *paralelipipedice*, *cilindrice* şi *coaxiale*. În afara acestora, mai există şi alte tipuri de cavităţi, de construcţie specială, cum sunt cele *toroidale* sau *sferice*.

Parametrii cei mai importanţi ai cavităţilor rezonante sunt frecvenţa de rezonanţă, factorul de calitate şi impedanţa de rezonanţă. Frecvenţa de rezonanţă a unei cavităţi depinde de dimensiunile fizice ale acesteia, precum şi de forma ei.

Schimbarea frecvenţei de rezonanţă a unei cavităţi (acordul frecvenţei) poate fi realizată prin modificarea dimensiunilor, capacităţii sau inductanţei cavităţii. Modificarea dimensiunilor cavităţii este realizată cu ajutorul *pistoanelor* cu şurub. Astfel, cu cât cavitatea are un volum mai mic, cu atât frecvenţa de rezonanţă este mai mare. Acordul frecvenţei prin schimbarea capacităţii sau inductanţei se realizează cu ajutorul *şuruburilor*. Introducerea şi extragerea energiei din cavităţi se realizează prin aceleaşi metode ca şi în cazul ghidurilor, adică prin intermediul sondelor, buclelor şi fantelor.

Cavităţile rezonante sunt utilizate pe scară largă în domeniul microundelor. Ele sunt folosite la construcţia unor tuburi electronice speciale (magnetronul, clistronul, amplitronul), frecvenţa de rezonanţă a cavităţii determinând frecvenţa de lucru a dispozitivului respectiv. Cavităţile rezonante sunt utilizate în diverse măsurători, ca de exemplu în măsurarea frecvenţei şi a lungimii de undă.

2.4 Linii de transmisie planare

O categorie importantă de linii de transmisie utilizate în circuitele de frecvenţă foarte înaltă o reprezintă *liniile planare*, numite şi *linii subţiri***.** Acestea sunt structuri realizate dintr-un substrat dielectric subţire, metalizat pe una sau ambele suprafeţe. Liniile planare se folosesc în general la realizarea circuitelor integrate în gama microundelor (MIC, MMIC) sau a undelor radio (RFIC).

Există o mare varietate de linii planare, utilizate într-o gamă diversă de aplicaţii, fiecare având anumite avantaje şi dezavantaje. Se pot distinge două mari categorii de linii planare: simetrice şi nesimetrice, cele mai întâlnite tipuri fiind *linia microstrip* şi linia simetrică *stripline*.

Cea mai simplă formă de linie planară o reprezintă linia microstrip. Aceasta este o linie planară nesimetrică, formată dintr-un conductor central şi un plan de masă, separate de un substrat dielectric. Linia microstrip este utilizată pe scară largă în circuitele de microunde datorită simplităţii constructive şi a posibilităţii de realizare a unei game largi de componente pasive.

Parametrii geometrici ai liniei microstrip sunt: lăţimea conductorului – w şi grosimea dielectricului – h. Dielectricul este caracterizat de permitivitatea dielectrică relativă ε_r. Printre materialele cele mai folosite ca substrat dielectric se numără duroidul (ε_r=3,6), cuarţul (ε_r=3,8), alumina (ε_r=9,7), siliciul (ε_r=11,7) şi GaAs (ε_r=12,3). Pentru un anumit dielectric, caracteristicile liniei sunt determinate de parametrii geometrici.

Capitolul 3

COMUTATOARE DE ANTENĂ

3.1 Noţiuni generale despre comutatoarele de antenă

Comutatoarele de antenă, denumite şi comutatoare emisie – recepţie, sunt acele dispozitive din compunerea radarelor care realizează conectarea emiţătorului la antenă pe timpul emisiei, respectiv a antenei la receptor pe durata recepţiei. În acest fel se utilizează o singură antenă atât pentru emisie cât şi pentru recepţie. Acest lucru este posibil doarece pe timpul emisiei şi al recepţiei se foloseşte aceeaşi frecvenţă, iar cele două procese, emisia şi recepţia, sunt separate în timp la radarele cu emisie în impulsuri.

În afară de comutarea emisie – recepţie, o altă funcţie importantă a comutatoarelor de antenă este aceea de a bloca pe timpul emisiei calea către receptor, pentru a împiedica distrugerea componentelor sensibile din receptor de către impulsurile puternice de sondaj. Această funcţie este îndeplinită de comutatorul de antenă împreună cu circuitele de intrare în receptor (circuitele de protecţie ale receptorului).

O altă cerinţă impusă comutatoarelor de antenă este ca timpii de comutare să fie reduşi la minim. Comutarea de pe recepţie pe emisie trebuie să se facă foarte rapid, pentru a evita ca semnalul foarte puternic de sondaj să pătrundă în receptor. O valoare acceptabilă a acestui timp trebuie să fie una mai mică de 0,01 din durata impulsului de sondaj.

Trecerea de pe emisie pe recepţie trebuie la rândul ei să fie foarte scurtă, astfel încât distanţa minimă de descoperire să fie cât mai redusă, iar radarul să fie capabil să descopere ţintele aflate în apropierea sa. Acest timp de comutare de la emisie la recepţie este un parametru foarte important al comutatoarelor de antenă, în special la cele cu descărcători, caz în care se mai numeşte şi timp de revenire sau de restabilire (de deionizare sau dezamorsare a descărcătorului).

Pentru a asigura o distanţă de descoperire cât mai mare, comutatoarele de antenă trebuie să introducă pierderi cât mai mici atât pe timpul emisiei, cât şi pe cel al recepţiei. Din ecuaţia radiolocaţiei ne amintim că distanţa de descoperire depinde atât de puterea de emisie, cât şi de sensibilitatea receptorului.

Parametrii cei mai importanţi ai comutatoarelor de antenă sunt: gama frecvenţelor de lucru, puterea maximă, coeficienţii de inserţie (la emisie şi la recepţie), izolaţia sau factorul de decuplare, timpii de comutare, impedanţa caracteristică.

În funcţie de tehnologia de realizare, întâlnim trei clase mari de comutatoare de antenă: cu descărcătoare, cu ferită şi cu semiconductoare.

Din punct de vedere al traseelor de frecvenţă foarte înaltă pe care sunt instalate, comutatoarele de antenă pot fi pe linii bifilare, pe cablu coaxial sau pe ghid de undă.

3.2 Comutatoare de antenă cu descărcătoare

3.2.1 Noţiuni generale despre descărcătoare

Descărcătoarele, numite şi eclatoare, sunt tuburi cu descărcare în gaze folosite în special în comutatoarele de antenă. Ele sunt alcătuite dintr-un tub de sticlă umplut cu gaz (de obicei argon), cu doi electrozi sub formă de conuri sau de tije, acoperiţi cu un strat activ de oxid.

La aplicarea unei tensiuni mari pe electrozi, gazul din descărcător se ionizează, între electrozi apare plasma, iar rezistenţa dintre electrozi devine foarte mică (1 – 2 Ω). Acest proces poartă numele de amorsare sau aprindere a descărcătorului. La dispariţia tensiunii înalte gazul se deionizează, proces numit dezamorsare. Rezistenţa dintre electrozi devine foarte mare, practic infinită.

Pentru reducerea timpului de ionizare, descărcătoarele mai conţin un electrod de preionizare la care se aplică o tensiune continuă de 600 – 1200 V („keep-alive voltage"), tensiune ce asigură o ionizare prealabilă a gazului din descărcător. Tot pentru micşorarea timpului de amorsare, în afară de argon se mai introduc în tub şi un amestec de vapori de apă şi hidrogen.

O categorie specială de descărcătoare o reprezintă *descărcătoarele dreptunghiulare*, folosite în special pentru protecţia receptorului. Acestea sunt realizate dintr-un segment de ghid de undă de lungime λ/4, terminat la ambele capete cu diafragme. Capetele sunt etanşeizate cu sticlă sau cuarţ. Descărcătorul este umplut cu argon şi vapori de apă. În interiorul descărcătorului mai pot fi dispuse perechi de conuri, similare electrozilor.

Când este dezamorsat, descărcătorul se comportă ca un filtru trece bandă. Parametrii filtrului depind de dimensiunile acestuia şi ale elementelor componente (diafragme, conuri). În momentul când descărcătorul este parcurs de un semnal puternic, gazul se ionizează şi aproape întreaga energie este reflectată înapoi.

Pentru creşterea vitezei de amorsare a descărcătoarelor dreptunghiulare şi acestea pot avea un electrod de preionizare. Tot în acest scop, în interiorul tubului se introduce un material slab radioactiv (tritiu). Practic, toate descărcătoarele actuale conţin material radioactiv.

Principalele avantaje ale descărcătoarelor sunt:

- asigură o foarte bună protecţie a receptorului, la costuri relativ reduse;
- descărcătoarele dreptunghiulare realizează şi o selecţie în frecvenţă a semnalelor, datorită modului lor de realizare;
- funcţionează la puteri mari;
- prezintă o gamă dinamică largă.

Dezavantajele majore ale descărcătoarelor sunt:

- au durata de viaţă redusă, chiar dacă nu au funcţionat;
- prezintă timpi de dezamorsare (de revenire) destul de mari.

În figura 3.1 sunt prezentate câteva tipuri de descărcătoare.

3.2.2 Comutatoare de antenă cu ramificaţii în linii

În practică se întâlnesc mai multe tipuri de comutatoare de antenă cu descărcătoare. Unul dintre acestea este cel cu ramificaţii în liniile de transmisie. Acesta este cel mai vechi tip de comutator, fiind utilizat şi în prezent, în special la radarele mai ieftine. Comutatoarele de antenă cu ramificaţii pot fi realizate în următoarele configuraţii: cu ramificaţii serie, cu ramificaţii paralel, respectiv cu ramificaţii mixte.

Pentru a descrie principiul de funcţionare al acestor tipuri de comutatoare de antenă, vom folosi exemplul unui comutator pe ghid de undă, cu ramificaţii mixte. În figura 3.2 sunt prezentate comutatorul de antenă şi schema echivalentă cu linii a acestuia.

Comutatorul este realizat cu ajutorul a două descărcătoare, unul cilindric şi celălalt dreptunghiular. Descărcătorul cilindric este dispus într-o cavitate rezonantă cilindrică pe peretele îngust al ghidului, ce comunică cu ghidul prin intermediul unei fante. Diametrul cavităţii rezonante este de λ/2, descărcătorul fiind dispus la distanţa de λ/4 de ghid, într-o ramificaţie paralelă a ghidului. Cavitatea rezonantă împreună cu descărcătorul formează circuitul de blocare al emiţătorului, CBE.

Descărcătorul dreptunghiular este montat la distanţa de λ/2 de cel cilindric, pe peretele lat al ghidului de undă. El este realizat dintr-un segment de ghid de lungime λ/4, cu diafragme la capete, în interiorul căruia se află argon şi vapori de apă. Diafragmele au rolul de circuite oscilante foarte selective. Descărcătorul dreptunghiular împreună cu ramificaţia serie în care se montează formează circuitul de protecţie a receptorului, CPR.

Funcţionarea acestui descărcător poate fi simplu explicată cu ajutorul schemei echivalente a acestuia. La emisie, datorită impulsului puternic de sondaj, ambele descărcătoare se amorsează. Impedanţa foarte mică a descărcătorului cilindric se transmite la distanţa λ/4, între conductoarele liniei principale, ca impedanţă foarte mare, practic infinită. Astfel, cele două conductoare sunt izolate între ele, iar semnalul de sondaj se transmite de la emiţător către antenă. Amorsarea descărcătorului dreptunghiular asigură continuitatea circuitului din dreptul său. Descărcătorul dreptunghiular se comportă ca o placă metalică dispusă pe peretele ghidului, împiedicând semnalul să pătrundă către receptor. Deoarece amorsarea acestui descărcător nu este instantanee, o parte din energia impulsului de sondaj pătrunde spre receptor, fiind nevoie de circuite suplimentare de protecţie la intrarea receptorului.

La recepţie, după terminarea impulsului de sondaj descărcătoarele se dezamorsează. Impedanţa foarte mare dintre electrozii descărcătorului cilindric se transmite ca impedanţă foarte mică (scurtcircuit) la distanţa λ/4, între conductoarele liniei de transmisie principale. Această impedanţă se transmite tot ca scurtcircuit la distanţa λ/2, în dreptul ramificaţiei către receptor. În acest fel calea către emiţător este blocată, iar întreaga energie de la antenă este transmisă către receptor.

Cele mai importante avantaje ale comutatoarelor cu ramificaţii sunt simplitatea constructivă şi costul redus. Principalul dezavantaj îl constituie banda relativ îngustă de frecvenţe de lucru, datorită faptului că funcţionarea se bazează pe tronsoane de linii de lungime λ/4.

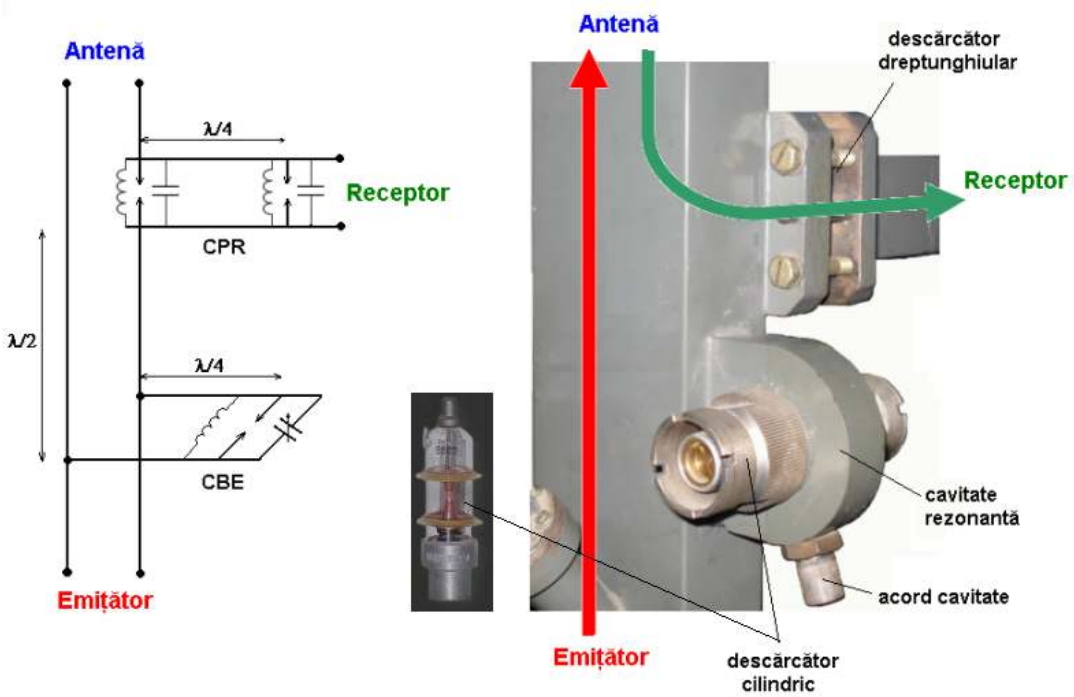
3.2.3 Comutatoare de antenă cu cuploare direcţionale

După cum am văzut, principalul dezavantaj al comutatoarelor de antenă cu ramificaţii în linii este că funcţionează doar într-o gamă foarte îngustă de frecvenţe. Sistemele radar moderne lucrează într-o bandă largă de frecvenţe, de ordinul a câteva sute de megaherţi. Rezultă că este nevoie de utilizarea unor comutatoare de antenă cu o bandă mai largă de frecvenţe. Un astfel de comutator este cel cu cuploare direcţionale, prezentat în figura 3.3.

Comutatorul este format din două cuploare de 3 dB şi două descărcătoare cu rol de element de comutare. Cuploarele sunt realizate cu ajutorul a două ghiduri de undă lipite pe peretele îngust, ce comunică între ele prin două fante. Reamintim că două ghiduri conectate prin intermediul unei fante formează un cuplor direcţional de 3 dB. La trecerea semnalului prin fantă, dintr-un ghid în celălalt, el va fi defazat cu 90°. În fiecare ghid de undă, între cele două fante, este dispus câte un descărcător.

La emisie, energia semnalului de sondaj pătrunde în braţul dinspre emiţător şi va fi împărţită în două părţi egale în cele două braţe. Descărcătoarele se vor amorsa, iar semnalul de sondaj va fi reflectat înapoi. Semnalele reflectate de fiecare descărcător vor ajunge la capătul dinspre antenă în fază (fiecare semnal a fost defazat cu 90° la trecerea prin fantă). La capătul dinspre emiţător vor ajunge două semnale în antifază (cel provenit din braţul superior a trecut de două ori prin fantă); ele se vor anula reciproc, având aceeaşi putere. Astfel, întreaga energie este transferată de la emiţător către antenă.

Fig. 3.1 – Exemple de descărcători dreptunghiulari



a) b)

Fig. 3.2 – Comutator de antenă cu ramificaţii mixte:
a) schema echivalentă cu linii, b) elementele componente

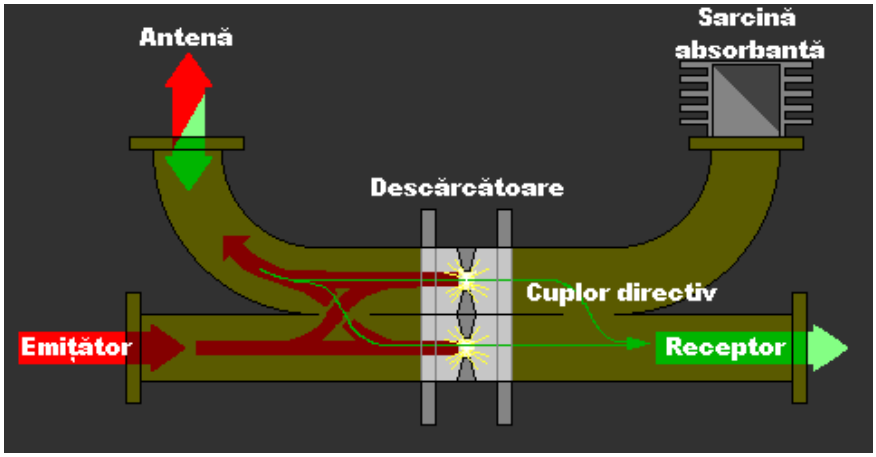


Fig. 3.3 – Comutator de antenă cu cuploare directive (sursa: www.radartutorial.eu)

Deoarece descărcătoarele nu oferă o izolaţie completă, o anumită parte din energie va trece prin ele. Această energie reziduală este eliminată cu ajutorul celui de-al doilea cuplor. Se observă că semnalele care ajung la ieşirea către receptor se anulează reciproc, fiind în antifază (unul din ele a trecut prin ambele fante, fiind defazat cu 180°). La capătul dinspre sarcina echivalentă semnalele vor ajunge în fază şi se vor însuma. În concluzie, întreaga energie reziduală este disipată pe sarcina echivalentă, iar spre receptor energia va fi zero. În practică, datorită imperfecţiunilor constructive ale comutatorului, există o anumită cantitate de energie de la emiţător care se propagă către receptor. Eliminarea acesteia se poate realiza prin montarea unor circuite suplimentare de protecţie a receptorului.

Pe timpul recepţiei descărcătoarele sunt dezamorsate, iar semnalul de la antenă se va propaga prin cele două braţe. Datorită proprietăţilor defazoare ale fantelor, la capătul dinspre receptor vor ajunge două semnale în fază, în timp ce la ieşirea către sarcina echivalentă semnalele vor fi în antifază. Astfel, întreaga energie a semnalului recepţionat va fi dirijată către intrarea în receptor.

Avantajele principale ale comutatoarelor cu cuploare direcţionale constau în nivelul ridicat de putere la care pot funcţiona şi în banda suficient de largă de frecvenţe. Dezavantaje majore pot fi dimensiunile mari, precum şi posibilitatea pătrunderii unei puteri destul de mari către receptor pe timpul emisiei, în cazul în care comutatorul nu este bine echilibrat.

3.3 Comutatoare de antenă cu ferită

Comutatoarele de antenă cu ferită sunt probabil cele mai folosite tipuri de comutatoare de antenă. Ele sunt întâlnite şi sub denumirea de *circulatoare cu ferită*. După cum spune şi numele, circulatorul este un dispozitiv cu mai multe porturi folosit pentru dirijarea semnalului de la un port doar către portul următor. În figura 3.4 sunt prezentate simbolul circulatorului şi schema de utilizare ca şi comutator de antenă. Semnalul de intrare aplicat la portul 1 este transmis doar la portul 2, un semnal aplicat la portul 2 va fi trimis doar la portul 3, iar unul ce intră la portul 3 va fi transmis doar la portul 1, conform sensului săgeţii. Semnalele care circulă în sens invers sunt scurgeri a căror putere este determinată de gradul de izolaţie al circulatorului.

Principiul de funcţionare al circulatoarelor se bazează pe diferenţa dintre constantele de propagare ale undelor care se propagă în sensuri diferite prin ferita polarizată. Circulatoarele cu trei porţi sunt realizate dintr-un rezonator la care sunt conectate porturile; acestea sunt dispuse la 120°, întregul ansamblu având o simetrie în Y. În interiorul rezonatorului se află ferita de formă rotundă, triunghiulară sau hexagonală, pentru a se menţine simetria ansamblului. Ferita este polarizată cu ajutorul unui câmp magnetic constant, produs de un magnet permanent. Circulatoarele simetrice cu trei porturi sunt realizate pe ghid de undă sau în tehnologie stripline. Exemple de circulatoare cu trei porturi sunt prezentate în figura 3.5.

Circulatoarele simple cu trei porturi sunt mai rar utilizate în sistemele radar, deoarece există posibilitatea ca o mare parte din energia semnalului de sondaj să fie reflectată înapoi în emiţător. Astfel, majoritatea comutatoarelor de antenă cu ferită sunt configurate ca circulatoare cu patru porturi. Cea mai simplă soluţie în acest scop o reprezintă conectarea a două circulatoare cu trei porturi.

Circulatoarele cu ferită prezintă avantajele că sunt mai compacte şi lucrează într-o bandă largă de frecvenţe (20 – 30 %). Atenuările de inserţie sunt de ordinul 0,1 – 0,3 dB. Un avantaj major al circulatoarelor îl reprezintă şi faptul că sunt circuite pasive şi nu necesită circuite suplimentare de comandă. Principalul dezavantaj constă în nivelul relativ redus de izolaţie (10 – 40 dB), ceea ce necesită luarea unor măsuri suplimentare de protecţie la intrarea în receptor (descărcătoare, limitatoare cu diode pin).

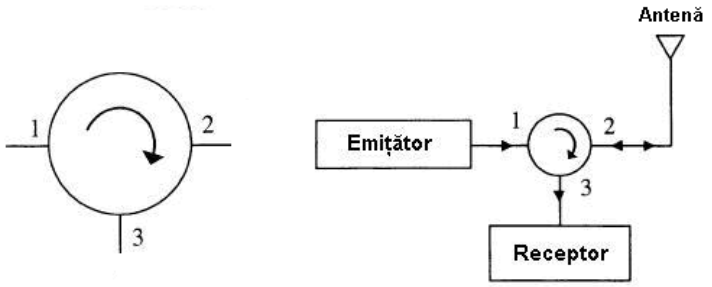


Fig. 3.4 – Simbolul circulatorului şi schema de utilizare ca şi comutator de antenă

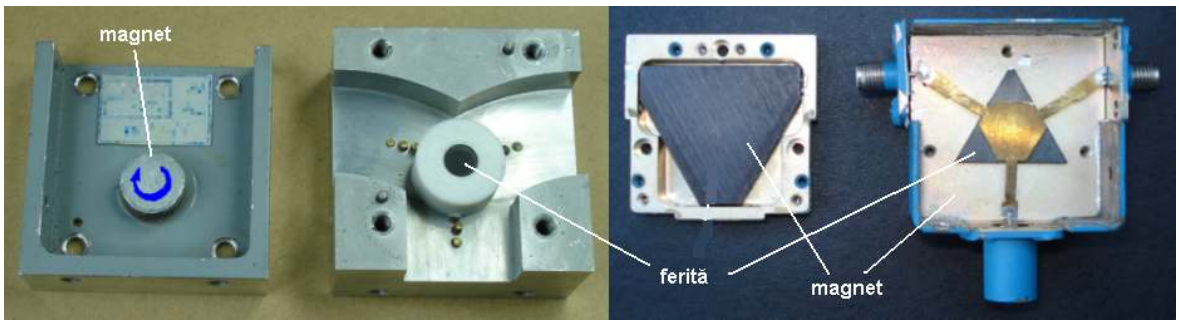


Fig. 3.5 – Exemple de circulatoare

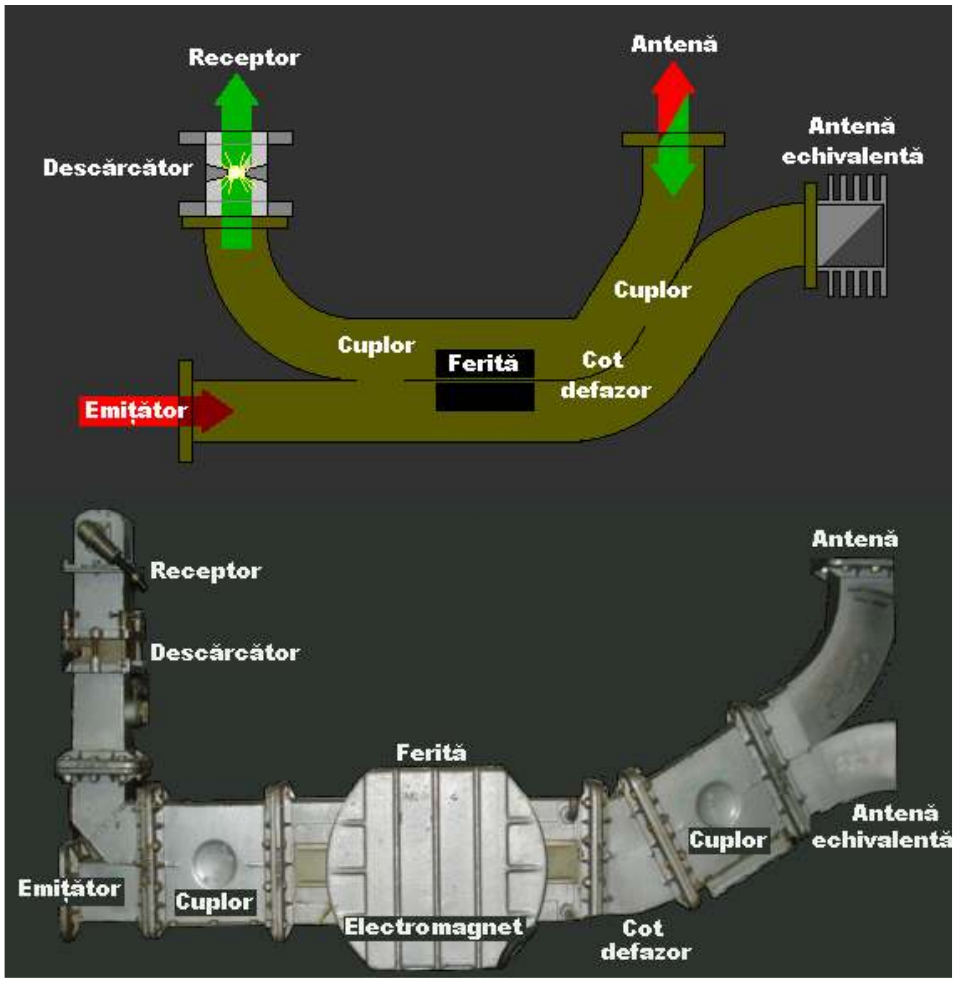


Fig. 3.6 – Circulator cu ferită pe ghid de undă

În continuare vom prezenta funcţionarea unui comutator de antenă cu ferită ce lucrează la puteri mari. Elementele componente ale acestuia sunt prezentate în figura 3.6. Comutatorul este format din două ghiduri de undă lipite pe peretele îngust, ce comunică între ele prin două fante care formează fiecare câte un cuplor direcţional de 3 dB. Între cele două fante, în fiecare ghid este dispusă câte o bucată de ferită. În plus, comutatorul mai conţine un cot defazor. Comutatorul are patru porţi, la care sunt cuplate emiţătorul, receptorul, antena şi o sarcină echivalentă. Capătul dinspre receptor se continuă cu un descărcător dreptunghiular, cu rol de protecţie a receptorului.

Principiul de funcţionare al comutatorului se bazează pe proprietăţile defazoare ale elementelor componente. Cele două cuploare de 3 dB defazează semnalul care trece prin fantă cu 90°. Cotul defazor va introduce un defazaj de 90° semnalului din braţul inferior, faţă de cel din braţul superior. Ferita va defaza semnalul în funcţie de sensul de propagare. Astfel, dacă ferita se află în dreapta sensului de propagare a semnalului, ea va introduce un defazaj de 90°, iar dacă este în stânga sensului de propagare defazajul va fi nul. Pentru magnetizarea feritei se foloseşte un electromagnet montat în exteriorul comutatorului.

La emisie, semnalul de la emiţător este introdus în braţul inferior. Acest semnal va trece prin primul cuplor şi va fi împărţit în două părţi egale în fiecare braţ; cel din braţul superior va avea un defazaj de 90°. La trecerea prin dreptul feritei, semnalul din braţul superior va fi defazat cu încă 90° (ferita este în dreapta sensului de propagare), iar cel din braţul inferior nu va fi defazat (ferita este în stânga sensului de propagare). La trecerea prin cotul defazor semnalul din braţul inferior va fi defazat cu 90°. După al doilea cuplor de 3 dB, la ieşirea dinspre antenă vom avea două semnale în fază care se vor însuma (fiecare semnal este defazat cu 180° faţă de intrarea în comutator). La ieşirea dinspre antena echivalentă cele două semnale vor fi în antifază şi se vor anula reciproc (semnalul din braţul inferior are un defazaj de 90°, iar cel provenit din braţul superior un defazaj de 270° = - 90°). În acest fel întreaga energie de la emiţător este transferată la ieşirea spre antenă, iar la ieşirea spre sarcina echivalentă semnalul va fi nul.

La recepţie semnalul intră în comutator pe la capătul dinspre antenă. Acest semnal trece prin primul cuplor direcţional, fiind împărţit în două semnale egale, cel din braţul inferior fiind defazat cu 90°. Cotul defazor va defaza acest semnal cu încă 90°. La trecerea prin ferită, semnalul din braţul inferior va fi defazat cu 90°, iar cel din braţul superior nu va fi defazat. După trecerea prin al doilea cuplor, la ieşirea spre emiţător vom avea două semnale în antifază care se anulează. La capătul dinspre receptor semnalele provenite din cele două braţe vor fi în fază şi se vor însuma; rezultă că întreaga energie de la antenă este transferată către emiţător.

În cazul unor semnale foarte puternice care pătrund spre receptor, acestea provoacă amorsarea descărcătorului şi vor fi reflectate înapoi în comutator. Din funcţionarea comutatorului se poate observa că aceste reflexii vor fi dirijate către sarcina echivalentă.

În unele situaţii, pe timpul operaţiunilor de mentenanţă la emiţător, nu se doreşte radiaţia impulsurilor de sondaj în spaţiu. Ele vor fi dirijate spre sarcina echivalentă. Pentru aceasta, se schimbă sensul câmpului de magnetizare a feritei prin schimbarea sensului de alimentare a electromagnetului. În acest caz ferita va defaza cu 90° dacă este în stânga sensului de propagare şi nu va defaza semnalul dacă se află în dreapta sensului de propagare al acestuia. Studiind funcţionarea comutatorului, se poate observa simplu că întreaga energie de la emiţător este dirijată către sarcina echivalentă, iar la ieşirea către antenă semnalul va fi nul.

3.4 Comutatoare de antenă cu semiconductoare

Comutatoarele de antenă cu semiconductoare folosesc diode PIN. Ele pot fi realizate pe toate tipurile de linii de transmisie: cablu coaxial, ghid de undă sau microstrip.

Dioda PIN este realizată din două regiuni p şi n puternic dopate, separate de o regiune intrinsecă puţin mai groasă, de unde şi numele acestui tip de diodă. La frecvenţe foarte înalte

dioda PIN se comportă ca o rezistenţă variabilă, comandată prin tensiunea de polarizare. La polarizare directă dioda are o impedanţă foarte mică, de câţiva ohmi, în timp ce la polarizare inversă dioda PIN prezintă o impedanţă mare, de ordinul kilohmilor şi o capacitate aproximativ constantă. Astfel dioda funcţionează ca un comutator electronic, comandat prin sensul polarizării.

Comutatoarele de antenă cu diode PIN pot fi realizate fie ca circuite pasive, folosind limitatoare cu diode, fie ca circuite active, cu comutatoare. Configuraţiile cu limitatoare sunt folosite în general la puteri mici. Capacitatea diodelor de a lucra la puteri mai ridicate depinde în principal de puterea în impuls şi de factorul de umplere al semnalului. Diodele care lucrează la puteri mai mari vor avea timpii de revenire mai lungi.

Pentru niveluri mai mari de putere sunt folosite circuite active cu comutatoare. Închiderea şi deschiderea diodelor este comandată prin intermediul tensiunilor de polarizare, comenzile fiind sincronizate cu impulsurile de sondaj. Dezavantajul circuitelor active cu diode constă în existenţa circuitelor suplimentare de comandă; un eventual defect în aceste circuite poate duce la distrugerea diodelor şi chiar a receptorului.

În practică se întâlnesc şi comutatoare de antenă ce folosesc combinaţii de comutatoare şi limitatoare. Primul etaj este un comutator activ, cu rol de protecţie la semnale mai puternice (eventuale scurgeri pe timpul emisiei), urmat de unul sau mai multe limitatoare, cu rol de protecţie pe timpul recepţiei. Pentru a rezista la niveluri mai ridicate de putere, sunt conectate mai multe diode în cascadă. O protecţie suplimentară, la eventuale semnale foarte puternice, se poate realiza şi prin montarea înaintea circuitelor cu diode a unui descărcător.

Principalele avantaje ale comutatoarelor cu diode PIN constau în durata ridicată de viaţă (practic nelimitată) şi viteza mare de comutare. Spre deosebire de tuburile descărcătoare, diodele nu necesită tensiuni de preamorsare şi nu folosesc materiale radioactive. De asemenea, ele pot fi utilizate în circuite multifuncţionale, îndeplinind şi alte roluri (de exemplu, folosirea ca circuite de reglare automată a amplificării). Nu în ultimul rând, un alt avantaj îl reprezintă gabaritul redus al unor astfel de comutatoare.

Dezavantajul major al acestor comutatoare este că nu pot fi folosite la niveluri foarte mari de putere, ca şi celelalte tipuri de comutatoare.

Sistemele radar folosesc deseori combinaţii ale celor trei clase de comutatoare, îmbinând avantajele fiecăruia. Există chiar situaţii în care sunt folosite toate cele trei tehnologii: circulatoare cu ferită, descărcătoare şi comutatoare / limitatoare cu diode PIN.

Capitolul 4

ANTENE

4.1 Noţiuni generale despre antene

Antena este acel subsistem al radarului care asigură radiaţia undelor electromagnetice în spaţiu (antenă de emisie), respectiv captarea undelor din spaţiu (antenă de recepţie). Ea face trecerea de la propagarea ghidată a undelor la propagarea în spaţiul liber şi invers, asigurând o interfaţă între linia de transmisie şi mediul de propagare. Când este utilizată la emisie, antena are rolul de a transforma energia curenţilor de înaltă frecvenţă în energia undelor electromagnetice, iar la recepţie transformă energia undelor electromagnetice în energia curenţilor de înaltă frecvenţă. Atât la emisie cât şi la recepţie antena asigură o anumită selectivitate în frecvenţă a undelor.

Orice antenă are proprietatea de *reversibilitate*, adică poate fi folosită atât la emisie cât şi la recepţie. Denumirea de antenă vine din cuvântul latinesc *antena*, însemnând bară sau tijă.

Antenele de radiolocaţie realizează următoarele funcţii principale:

- radiază în spaţiu energia semnalelor de sondaj de la emiţător şi recepţionează semnalele reflectate de la ţinte pe care le trimite la receptor;
- concentrează întreaga energie radiată în direcţia dorită; în acest fel se asigură şi o selecţie spaţială, recepţionându-se semnale doar de la ţintele de pe direcţia de interes;
- asigură acoperirea întregii zone de observare a radarului;
- permite măsurarea uneia sau ambelor coordonate unghiulare ale ţintelor (β, ε).

Sistemele radar utilizează diferite tipuri de antene. După destinaţie antenele pot fi clasificate ca antene de emisie, de recepţie şi de emisie-recepţie. În funcţie de lungimea de undă întâlnim antene de unde lungi, medii, scurte sau ultrascurte; în radiolocaţie se folosesc în general cele de unde ultrascurte, care pot fi de gamă metrică, decimetrică, centimetrică sau milimetrică. După banda frecvenţelor de lucru întâlnim antene de bandă largă şi de bandă îngustă. Din punct de vedere al formei caracteristicii de directivitate antenele se împart în antene omnidirecţionale şi directive.

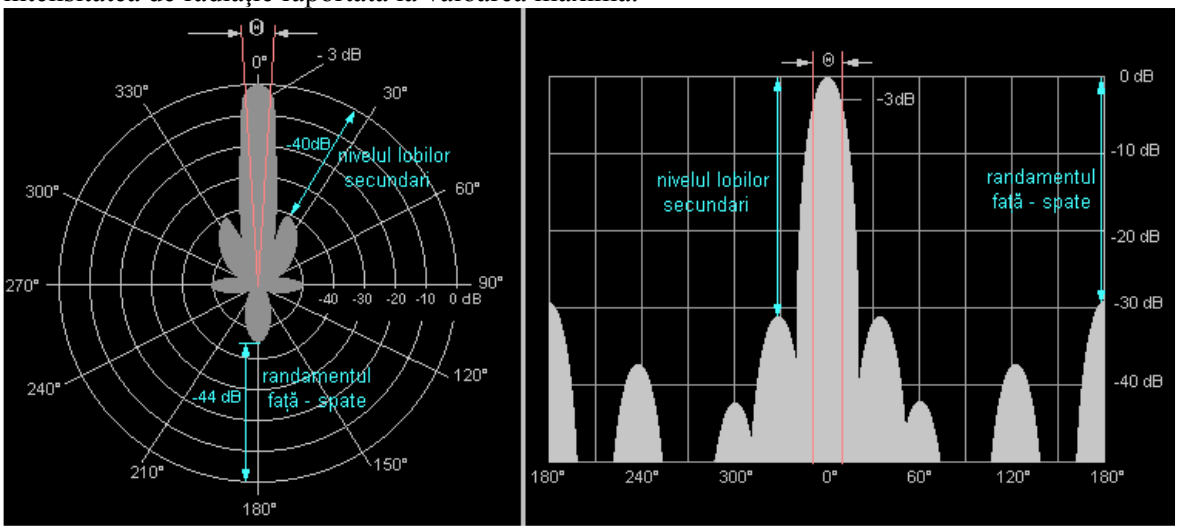
După forma constructivă întâlnim diverse tipuri de antene: antene cu reflector (de obicei parabolic), antene canal de undă sau Yagi, reţele fazate de antene, antene spirale, elicoidale, fantă etc. Cele mai folosite tipuri de antene în radiolocaţie sunt *antenele cu reflector* şi *reţelele fazate de antene*.

4.2 Parametrii antenelor

Unul din principalii parametri ai antenelor îl reprezintă *caracteristica de directivitate*. Aceasta este o reprezentare grafică a proprietăţilor de radiaţie ale antenei, în funcţie de coordonatele unghiulare β şi ε. În general caracteristica de directivitate se reprezintă ca distribuţia în spaţiu a intensităţii câmpului sau a densităţii fluxului de putere creat de antenă în puncte egal depărtate de ea (punctele egal depărtate se află pe suprafaţa unei sfere).

Caracteristica de directivitate se reprezintă în cele două planuri de interes: orizontal, când e o funcţie de azimut, şi vertical, când este o funcţie de unghiul de înălţare. De asemenea, reprezentarea se face de obicei în unităţi de măsură relative, având ca referinţă intensitatea câmpului sau a densităţii de putere pe direcţia de radiaţie maximă; ca unitate de măsură se foloseşte decibelul.

Afişarea caracteristicii de directivitate se poate face în coordonate polare sau rectangulare (figura 4.1). Graficul în coordonate polare este foarte util deoarece diagrama este redată exact cum apare în realitate, ca nivel al intensităţii funcţie de unghiul de radiaţie. Reprezentarea rectangulară poate fi liniară sau logaritmică, având pe abscisă direcţia de radiaţie, iar pe ordonată intensitatea de radiaţie raportată la valoarea maximă.



a) b)

Fig. 4.1 – Caracteristica de directivitate a unei antene: a) în coordonate polare, b) în coordonate carteziene (sursa: www.radartutorial.eu)

Deoarece proprietăţile antenelor sunt reversibile, rezultă că diagrama de directivitate are aceeaşi formă şi la emisie şi la recepţie. Caracteristica de directivitate se poate determina prin calcule sau prin măsurare. Pentru a determina caracteristica de directivitate prin măsurare, energia radiată este măsurată în puncte aflate la aceeaşi distanţă dar pe direcţii diferite faţă de antenă.

Antenele radarelor sunt antene directive, ceea ce înseamnă că intensitatea câmpului radiat are valori diferite, fiind maximă pe direcţia dorită de observare a ţintelor. După cum se observă şi din figura 4.1, o caracteristică directivă este formată dintr-un lob principal şi mai mulţi lobi secundari. Lobul principal reprezintă zona de radiaţie maximă a caracteristicii de directivitate, iar lobii secundari (laterali) sunt lobi de putere mai mică, dispuşi pe alte direcţii faţă de lobul principal. Aceşti lobi reprezintă energia radiată sau recepţionată de antenă pe direcţii nedorite şi nu pot fi complet eliminaţi.

Nivelul lobilor secundari reprezintă un parametru important ce caracterizează o diagramă de directivitate. El este definit ca diferenţa dintre puterea lobului principal şi cea a celui secundar şi este exprimat în decibeli. Nivelul lobilor secundari trebuie să aibă o valoare mică, în general sub -30 dB.

Lobul secundar aflat pe direcţia diametral opusă faţă de cel principal se numeşte lob posterior. Nivelul acestui lob mai poartă denumirea şi de *randamentul faţă-spate* al antenei.

Lăţimea caracteristicii de directivitate sau unghiul de radiaţie al acesteia, notat θ, reprezintă unghiul format de direcţiile în care densitatea de putere radiată scade la jumătate faţă de valoarea maximă (sau la -3 dB). Valoarea lăţimii caracteristicii de directivitate este reprezentată în ambele planuri.

Câştigul antenei caracterizează capacitatea antenei de a concentra puterea primită pe o anumită direcţie. Pentru a caracteriza câştigul se folosesc doi parametri: câştigul directiv sau directivitatea, respectiv câştigul în putere.

Coeficientul de directivitate D sau directivitatea antenei reprezintă raportul dintre densitatea fluxului de putere radiată de antenă pe o anumită direcţie şi cea radiată de o antenă

nedirectivă pe aceeaşi direcţie, ambele antene având aceeaşi putere la intrare. Caracteristica de directivitate este reprezentată de obicei în funcţie de acest parametru.

Câştigul în putere G sau simplu câştigul, numit şi coeficient de amplificare, este raportul dintre densitatea fluxului de putere radiată de antenă pe direcţia de radiaţie maximă şi cea radiată de un radiator izotrop ideal, pentru aceeaşi putere de intrare în antenă. Câştigul este un parametru similar cu directivitatea, numai că ia în calcul şi pierderile disipative ale antenei. În ecuaţia radiolocaţiei se foloseşte câştigul în putere.

Între câştigul antenei şi directivitatea acesteia există următoarea relaţie:

$$G = \eta \cdot D \tag{4.1}$$

unde η este randamentul antenei.

De asemenea, câştigul poate fi exprimat în funcţie de suprafaţa efectivă de radiaţie a antenei:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \tag{4.2}$$

Câştigul este reprezentat de multe ori în decibeli (dBi – decibeli faţă de izotrop):

$$G_{dBi} = 10 \lg G \tag{4.3}$$

Deoarece un radiator izotrop ideal nu poate fi construit, în practică se mai utilizează exprimarea câştigului având ca antenă de referinţă dipolul simetric; în acest caz unitatea de măsură este dBd (decibeli faţă de dipol).

Câştigurile antenelor au fost definite pentru antene de emisie. Datorită reversibilităţii antenelor, valorile de câştig la recepţie sunt aceleaşi ca şi la emisie.

Randamentul antenei η reprezintă raportul dintre puterea totală radiată de antenă şi puterea aplicată antenei de la emiţător. Acesta arată cât din energia curenţilor de înaltă frecvenţă se transformă în energie a undelor electromagnetice.

Suprafaţa efectivă a unei antene, numită şi aria sau apertura efectivă, exprimă capacitatea antenei de a capta şi transmite la receptor energia undelor incidente. Ea este egală cu raportul dintre puterea maximă transferată la ieşire către receptor şi densitatea fluxului de putere al câmpului electromagnetic incident pe suprafaţa antenei.

Între suprafaţa efectivă A_e şi cea geometrică A a antenei există următoarea relaţie:

$$A_e = k \cdot A \tag{4.4}$$

unde k este coeficientul de utilizare a suprafeţei antenei.

Coeficientul de utilizare a suprafeţei k depinde de distribuţia curenţilor de înaltă frecvenţă pe suprafaţa antenei (iluminarea antenei). În cazul unei iluminări uniforme, $k = 1$. Iluminarea uniformă, deşi asigură un coeficient de utilizare mare, prezintă dezavantajul unui nivel mare al lobilor secundari. Pentru reducerea nivelului lobilor secundari se foloseşte iluminarea ponderată, aceasta fiind mai puternică pe centrul antenei şi mai redusă pe laterale.

Un alt parametru important al antenelor îl reprezintă *polarizarea* undelor radiate şi recepţionate de acestea. Polarizarea se defineşte ca orientarea vectorului câmp electric. Semnalul recepţionat de o antenă va fi maxim când polarizarea antenei este aceeaşi cu cea a undelor electromagnetice. Majoritatea radarelor folosesc polarizarea liniară, care poate fi orizontală sau verticală. Radarele de supraveghere aeriană folosesc în general polarizarea orizontală, iar cele de urmărire polarizarea verticală. Polarizarea circulară este folosită pentru a îmbunătăţi descoperirea ţintelor pe fondul reflexiilor de la precipitaţii.

Pe lângă cei prezentaţi, antenele mai prezintă şi alţi parametri:

- *puterea de radiaţie*, adică puterea undelor electromagnetice radiate de antenă în spaţiu;
- *impedanţa de intrare* a antenei, care trebuie adaptată la cea a liniei de transmisie;
- *gama frecvenţelor de lucru*.

4.3 Antene elementare folosite în radiolocaţie

4.3.1 Antene dipol

Dipolul simetric este cea mai simplă antenă şi este formată dintr-un conductor liniar sau o tijă metalică împărţită în două jumătăţi identice. Dipolul simetric λ/2 este cel mai folosit, lungimea totală a acestuia fiind egală cu jumătate din lungimea de undă (fiecare segment are un sfert de lungime de undă). În practică se foloseşte o lungime mai mică a dipolului, de aproximativ 0,47 λ.

Alimentarea dipolului simetric se face prin intermediul unui cablu coaxial; cele două conductoare ale cablului se conectează la cele două segmente ale dipolului. Impedanţa caracteristică a unui dipol λ/2 este de 73,1 Ω ≅ 75 Ω, ceea ce înseamnă că el poate fi conectat la un cablu coaxial cu impedanţa caracteristică de 75 Ω fără a mai fi necesară adaptarea de impedanţă.

Caracteristica de directivitate a dipolului este slab directivă, având formă toroidală. Radiaţia este maximă pe direcţia perpendiculară pe dipol şi nulă pe direcţiile conductoarelor. Secţiunea caracteristicii într-un plan ce conţine dipolul este formată din doi lobi cu lăţimea de aproximativ 70 - 80° (figura 4.2). Prin dispunerea în spatele dipolului, la distanţa λ/4, a unei suprafeţe reflectoare legată la masă, întreaga energie va fi radiată doar într-o parte, lăţimea caracteristicii îngustându-se.

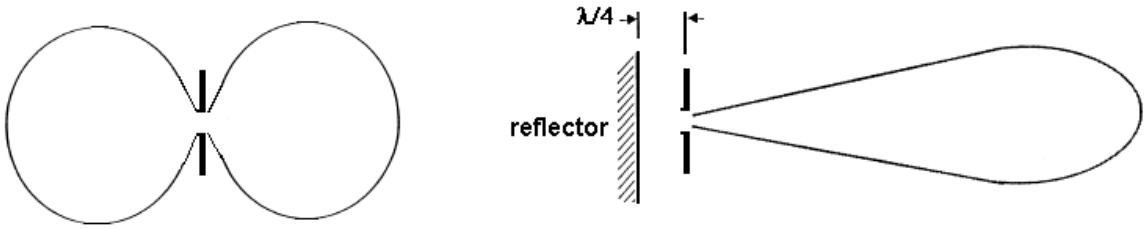


Fig. 4.2 – Caracteristica de directivitate a dipolului simetric

Coeficientul de directivitate nu depinde de lungimea de undă şi de aceea dipolul simetric se utilizează ca antenă de referinţă pentru exprimarea directivităţii altor tipuri de antene. Câştigul unei antene dipol este de aproximativ 1,64.

Antenele dipol se folosesc în general în gama undelor metrice şi decimetrice, şi mai puţin a celor centimetrice. În radiolocaţie, dipolul nu este folosit ca antenă independentă, el fiind întâlnit ca element în compunerea unor sisteme de antene (element de antenă în reţelele fazate, sursă primară în antenele cu reflector). Având o caracteristică apropiată de cea omnidirecţională, el este folosit ca antenă de referinţă, de exemplu pentru exprimarea câştigului altor antene. În telecomunicaţii el este folosit datorită caracteristicilor de directivitate omnidirecţionale, îndeosebi în varianta de antenă baston.

Antena baston este formată doar dintr-un singur braţ a unui dipol simetric. Dacă antena baston se află dispusă cu un capăt perpendicular pe o suprafaţă plană conductoare (metal sau pământ), atunci ea are caracteristici identice cu cele ale unui dipol cu aceleaşi dimensiuni.

Un alt tip de dipol este cel tip buclă. Acesta are o impedanţă caracteristică de 300 Ω, rezultând necesitatea folosirii unui circuit de adaptare la conectarea cu cablul coaxial, de obicei o buclă de simetrizare.

4.3.2 Antena Yagi - Uda

Antena Yagi-Uda, numită şi antenă *canal de undă*, este o antenă formată dintr-o serie de dipoli dispuşi în paralel în acelaşi plan. Această antenă nu este o antenă elementară, dar am inclus-o aici deoarece în radiolocaţie ea nu este folosită independent, ci în compunerea altor tipuri de antene.

Antena Yagi (figura 4.3) este formată dintr-un *dipol activ*, cuplat la linia de transmisie, un dipol pasiv numit *reflector* şi mai mulţi dipoli pasivi numiţi *directori*. Dipolul activ radiază unde electromagnetice atât în faţă cât şi în spate, unda radiată în spate se va reflecta de reflector şi se va întoarce spre dipolul activ. Distanţa dintre dipolul activ şi reflector este $\lambda/4$, astfel încât unda directă şi unda reflectată să fie în fază şi să se însumeze. Distanţa între directori este de obicei $\lambda/4$, dar poate lua diverse valori, în funcţie de aplicaţii.

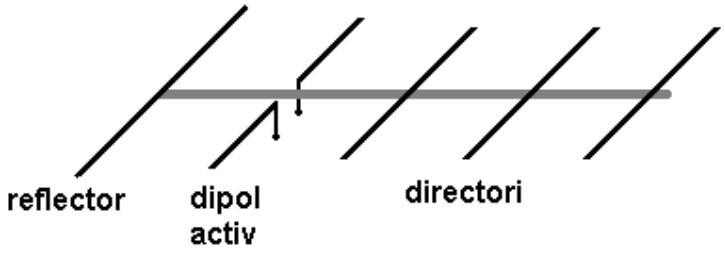


Fig. 4.3 – Antena Yagi-Uda

Din considerente practice lungimea reflectorului este cu circa 10% mai mare decât a dipolului activ, iar directorii sunt mai mici decât dipolul activ. Reflectorul şi directorii sunt dispuşi pe o bară conductoare, dipolul activ fiind izolat electric de aceasta. Ca dipol activ se poate utiliza şi unul tip buclă.

Antena Yagi are o caracteristică foarte directivă (figura 4.1-a). Caracteristica de directivitate depinde de numărul directorilor, fiind cu atât mai îngustă cu cât numărul directorilor este mai mare. Creşterea numărului de directoare are ca efect îngustarea benzii de frecvenţe.

Principalele avantaje ale antenei Yagi sunt simplitatea constructivă, gabaritul mic şi directivitatea crescută. Marele dezavantaj îl reprezintă banda îngustă de frecvenţă.

Antena Yagi este utilizată în general în gama undelor metrice. În radiolocaţie ea este folosită ca antenă elementară în reţelele de antene de gamă metrică sau ca sursă primară la antenele cu reflector. Ea este folosită pe larg în sistemele de radionavigaţie, radiocomunicaţie sau televiziune.

4.3.3 Antena horn

Orice ghid de undă excitat la un capăt şi deschis la celălalt se comportă ca o antenă care radiază unde electromagnetice prin capătul deschis. La acest capăt apar însă reflexii puternice, din cauza neadaptării între ghidul de undă şi spaţiul liber. Adaptarea se realizează prin mărirea treptată a uneia sau ambelor dimensiuni ale ghidului de undă, rezultând astfel *antena horn* (figura 4.4).

În funcţie de forma secţiunii ghidului de undă, antenele horn pot fi piramidale sau conice. Cele piramidale se împart în sectoriale (în planul E sau H), când o dimensiune a ghidului este menţinută constantă ($a=A$ sau $b=B$), respectiv piramidale, când ambele dimensiuni sunt modificate ($a<A$ şi $b<B$).

Parametrii de directivitate ai antenei horn depind de cei geometrici. Caracteristica de directivitate diferă în funcţie de geometria hornului, de la forme foarte directive până la forme

slab directive, cu mai multe maxime ale lobului principal. Directivitatea antenei horn creşte odată cu creşterea deschiderii şi îngustarea unghiului de deschidere al antenei. Pentru o lungime dată a antenei horn, există o valoare optimă a unghiului de deschidere pentru care se obţine cea mai îngustă caracteristică de directivitate. Antena horn corespunzătoare se numeşte antenă horn optimă.

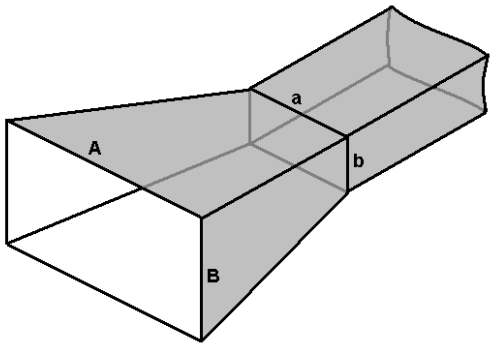


Fig. 4.4 – Antena horn

Antenele horn se folosesc în special în gama undelor centimetrice şi uneori în a celor decimetrice sau milimetrice, ca surse primare în antenele cu reflector. Ca antene independente ele se folosesc în sistemele de război electronic, în poligoanele de testare sau în laboratoare.

În afara antenelor prezentate, în diferite aplicaţii se întâlnesc şi alte tipuri de antene elementare: antene fantă, antene spirale sau elicoidale, antene dielectrice, etc.

4.4 Antene cu reflector

Antenele cu reflector sunt antene cu câştig ridicat, realizate din următoarele trei elemente componente principale: reflector, sursă primară (radiator) şi fider (figura 4.5). Sursa primară radiază undele electromagnetice către reflector, iar acesta le reflectă în spaţiu. Prin alegerea corespunzătoare a tipului de sursă primară, a poziţiei acesteia faţă de reflector şi a formei reflectorului se asigură obţinerea formei dorite a caracteristicii de directivitate.

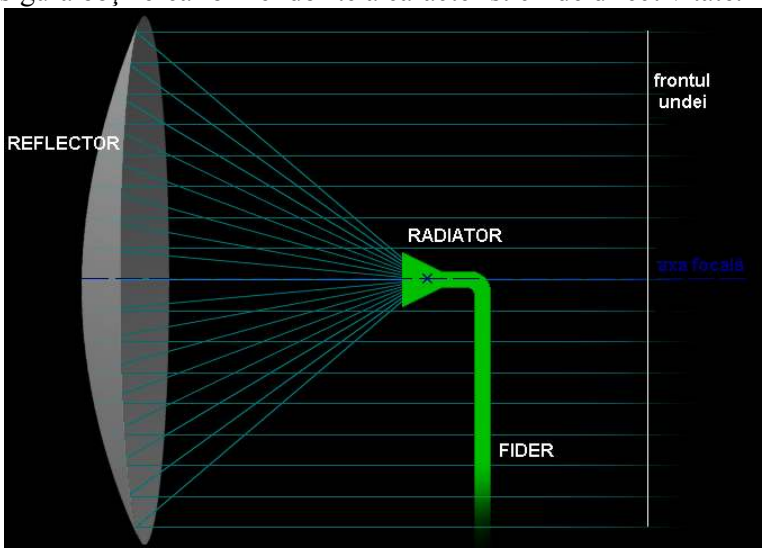


Fig. 4.5 – Antena cu reflector

Reflectorul are în general formă de paraboloid de rotaţie sau cilindru parabolic. Antenele cu reflector parabolid de rotaţie transformă frontul sferic al undelor radiate de sursa primară într-un front plan, paralel cu axa focală a paraboloidului. Caracteristica rezultată este de forma unui fascicul foarte îngust în ambele planuri. O astfel de antenă este utilizată de radarele de urmărire.

Dacă se foloseşte o secţiune dintr-un paraboloid de rotaţie, se obţine o caracteristică asimetrică, îngustă într-un plan şi largă în planul în care a fost secţionat paraboloidul. Radarele de supraveghere folosesc un astfel de tip de antenă cu reflector, cu o caracteristică îngustă în plan orizontal şi largă în cel vertical.

Lăţimea caracteristicii de directivitate depinde de dimensiunea reflectorului. Pentru antenele cu reflector parabolic se poate folosi următoarea relaţie:

$$\theta_l = \frac{70\lambda}{L} \tag{4.5}$$

unde L este lungimea reflectorului în planul în care se măsoară lăţimea caracteristicii.

Caracteristica de directivitate este afectată de o serie de factori cum ar fi efectul de umbrire cauzat de prezenţa radiatorului, iluminarea inegală a suprafeţei reflectorului, emisia unei părţi din energie de către sursa primară în afara suprafeţei reflectorului, etc.

Reflectorul este o suprafaţă foarte bună conductoare. El este realizat fie sub formă de suprafaţă plină, fie sub formă de plasă. Suprafaţa plină poate fi metalică sau din materiale compozite, acoperite cu un strat metalic subţire. Reflectorul sub formă de plasă oferă o rezistenţă mai mică la vânt, fiind realizat de obicei din plasă de duraluminiu. Dimensiunile ochiurilor plasei trebuie să fie mai mici de $\lambda/10$).

Fiderul poate fi orice tip de linie de transmisie: ghid de undă, cablu coaxial sau chiar linie bifilară.

Ca surse primare sunt folosite antenele horn, antenele ghid de undă, dipolii cu reflector, antenele Yagi sau antenele fantă. Cele mai utilizate sunt cele horn, care asigură o foarte bună directivitate, pot fi folosite şi la puteri mari şi permit obţinerea cu uşurinţă a unei caracteristici asimetrice. Radiatorul poate fi dispus în centrul focal al reflectorului, pentru obţinerea frontului plan, sau deplasat în plan vertical (offset). Prin deplasarea radiatorului pe o direcţie perpendiculară pe axa focală, caracteristica de directivitate nu îşi schimbă forma prea mult, dar se modifică direcţia de radiaţie maximă.

Radiatoarele sunt antene directive, cu frontul undelor sferic. Energia radiată de sursa primară trebuie să fie dirijată aproape în totalitate către reflector. Efectul de umbrire cauzat prin acoperirea deschiderii antenei de către sursa primară şi elementele de fixare ale acesteia din faţa reflectorului trebuie redus la minim. De asemenea, este necesar ca radiatorul să fie adaptat cu linia de transmisie şi să funcţioneze în toată banda de frecvenţe a radarului.

Antenele cu reflector cilindric folosesc un radiator de formă liniară. Acesta este realizat de obicei dintr-un număr mare de radiatoare, ceea ce asigură un control mai bun al iluminării reflectorului şi implicit al nivelului lobilor laterali.

Antenele cu reflector sunt folosite pe larg în radiolocaţie, în gama undelor centimetrice, decimetrice, milimetrice şi foarte rar metrice. De asemenea, ele sunt folosite ca antene directive în radioastronomie şi în telecomunicaţii: legături radioreleu, comunicaţii prin satelit (inclusiv televiziune), reţele fără fir, etc.

4.5 Reţele fazate de antene

O reţea de antene este formată dintr-un anumit număr de antene elementare (de obicei dipoli, dar pot şi alte tipuri: horn, ghid de unda, antene fantă), dispuse în acelaşi plan, pe rânduri şi coloane. Elementele reţelei sunt dispuse unul faţă de celălalt la distanţe egale d, iar în spatele

acestora se află un reflector. Aceste elemente trebuie să aibă proprietăţi identice şi să fie ieftine şi fiabile.

Reţelele de antene oferă două avantaje principale: producerea unei caracteristici de forma dorită şi posibilitatea deplasării electronice a acesteia.

Caracteristica de directivitate a întregii reţele se obţine prin combinarea în spaţiu a caracteristicii fiecărui dipol, pe baza fenomenului de interferenţă a undelor electromagnetice. Prin dispunerea în spatele dipolilor a unui reflector la distanţa $\lambda/4$, întreaga energie va fi radiată doar într-o singură direcţie, iar caracteristica dipolului se îngustează (figura 4.2). Dacă doi dipoli sunt aşezaţi unul lângă altul, energia radiată de fiecare se va combina în spaţiu, rezultând o caracteristică mai îngustă şi mai puternică (figura 4.6). În afara lobului principal, în urma interferenţei mai apar şi o serie de lobi secundari. Fenomenul se repetă la scara întregii reţele, rezultând o caracteristică formată dintr-un lob principal îngust în ambele planuri şi o serie de lobi secundari.

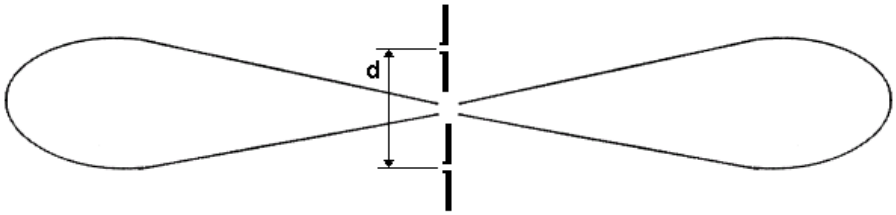


Fig. 4.6 – Caracteristica de directivitate a doi dipoli dispuşi unul lângă altul

Reţelele de dipoli au avantajul că pot fi obţinute caracteristici de directivitate cu lăţimi foarte mici şi implicit câştiguri foarte mari. Caracteristica de directivitate este de obicei de tip "creion" (fascicul foarte îngust în ambele planuri), caracteristică ce permite determinarea cu precizie a ambelor coordonate unghiulare. Lăţimea caracteristicii depinde de numărul elementelor, precum şi de distanţa dintre acestea.

Nivelul lobilor secundari poate fi redus prin alimentarea ponderată a elementelor reţelei. Aceasta presupune alimentarea mai puternică a elementelor dispuse în partea centrală şi mai slabă a celor din extremităţi. În practică se folosesc o serie de funcţii de ponderare: Taylor, Bayliss etc. Alimentarea ponderată are ca efect negativ creşterea lăţimii caracteristicii de directivitate şi scăderea câştigului. Rezultă astfel că trebuie stabilit un compromis între lăţimea caracteristicii şi nivelul lobilor secundari.

Un alt avantaj important al reţelelor de dipoli îl reprezintă posibilitatea deplasării electronice a caracteristicii de directivitate. Deplasarea fasciculului se realizează prin controlul fazei semnalului aplicat fiecarui element. În acest scop, înaintea fiecarui dipol este dispus un defazor comandat electronic. Ca defazoare se folosesc cele cu diode PIN sau cu ferită.

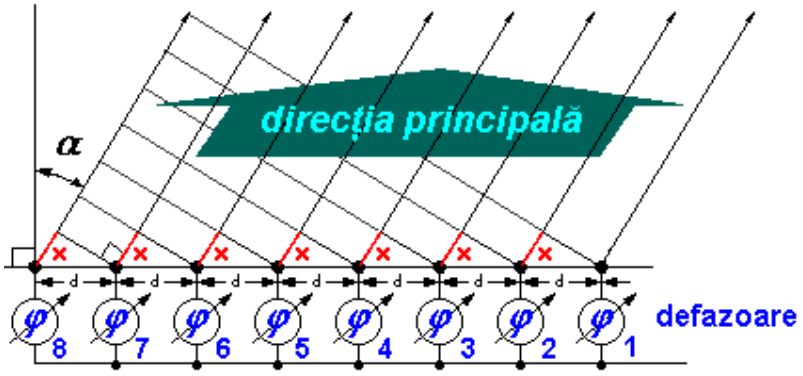


Fig. 4.7 – Explicaţia înclinării electronice a caracteristicii (sursa: www.radartutorial.eu)

Cu ajutorul figurii 4.7 se poate explica uşor principiul înclinării electronice a fasciculului. Între semnalele aplicate fiecărui element există un defazaj $\Delta\varphi$, constant de la un element la altul. Defazajele dintre elemente conduc la întârzieri ale semnalului radiat în spaţiu de fiecare element. Frontul de undă al întregii reţele va fi înclinat faţă de direcţia normală la suprafaţa reţelei. Între drumul parcurs de undele radiate de fiecare element apare o diferenţă de drum $x = d \cdot \sin\alpha$. Această diferenţă de drum depinde de valoarea defazajului:

$$x = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{360^\circ} \tag{4.6}$$

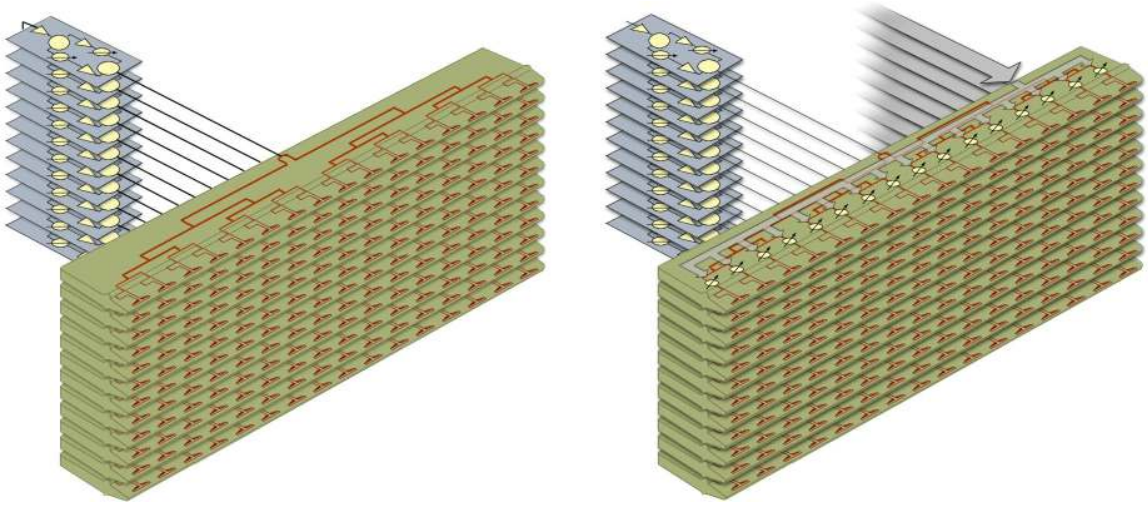
Egalând cele două expresii ale lui x rezultă că relaţia matematică dintre unghiul de înclinare al caracteristicii şi defazajul dintre elemente este următoarea:

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \cdot d}{\lambda} \cdot \sin\alpha\,, \tag{4.7}$$

unde $\Delta\varphi$ este defazajul dintre semnalele aplicate la două elemente succesive, exprimat în grade, d este distanţa dintre două elemente succesive, α reprezintă unghiul de înclinare al caracteristicii, iar λ este lungimea de undă.

Prin modificarea valorii defazajului se modifică unghiul de înclinare α. Dacă elementele sunt alimentate în fază, valoarea unghiului de înclinare este nulă, iar caracteristica este orientată perpendicular pe planul reţelei.

Deplasarea electronică a unei caracteristici de directivitate este mult mai rapidă decât deplasarea mecanică. În plus, sistemele mecanice au o fiabilitate mai redusă decât cele electronice. Câştigul antenei scade odată cu creşterea unghiului de înclinare a fasciculului, lăţimea caracteristicii mărindu-se pe măsură ce unghiul α de înclinare creşte. Din acest motiv, zona de observare utilizând baleierea electronică este limitată la circa 120°.



a) b)

Fig. 4.8 – Tipuri de reţele: a) reţea liniară, b) reţea plană (sursa: www.radartutorial.eu)

Din punct de vedere al numărului de planuri în care se execută baleierea caracteristicii, reţelele de antene pot fi de două tipuri: liniare şi plane (figura 4.8). În cazul reţelelor *liniare*, fasciculul este baleiat într-un singur plan. Un exemplu este cel al radarelor de supraveghere aeriană ce folosesc rotirea mecanică în azimut a antenei şi baleierea electronică a fasciculului doar în planul vertical. Astfel, este nevoie de un singur defazor pentru fiecare rând al reţelei. Principalul avantaj al acestor reţele este că au o construcţie mai simplă şi că necesită un număr mic de comenzi pentru defazoare.

Reţelele *plane* permit deplasarea caracteristicii de directivitate în ambele planuri. Pentru aceasta fiecare element al reţelei are asociat câte un defazor. Rezultă astfel o structură mult mai complexă şi un număr foarte mare de comenzi pentru defazoare.

Alimentarea elementelor reţelelor de antene se poate face prin intermediul liniilor de transmisie sau prin radiaţie. Cea mai folosită este alimentarea în paralel prin linii de transmisie (cabluri coaxiale sau ghiduri de undă). Distribuirea semnalelor la elemente se face cu ajutorul divizoarelor de putere. Pentru a nu afecta faza semnalelor, liniile trebuie să aibă aceeaşi lungime electrică.

Avantajele principale ale reţelelor de antene sunt:

- pot fi obţinute caracteristici de directivitate cu lăţimi foarte mici, câştig ridicat şi un nivel redus al lobilor laterali;
- deplasarea electronică a caracteristicii de directivitate permite orientarea aproape instantanee a acesteia pe orice direcţie dorită;
- caracteristica de directivitate de tip fascicul foarte îngust asigură determinarea tuturor celor trei coordonate ale ţintelor;
- permit implementarea tehnicii monoimpuls;
- pot fi folosite la radarele multirol, prin emisia mai multor fascicule simultan, cu roluri diferite: de supraveghere, de urmărire, de dirijare.

Printre dezavantajele reţelelor amintim: structura foarte complexă, costul ridicat de producţie, unghiul limitat de baleiere al fasciculului şi deformarea fasciculului odată cu creşterea unghiului de înclinare.

4.6 Antene monoimpuls

Metoda monoimpuls foloseşte mai multe canale de recepţie şi prin prelucrarea simultană a tuturor semnalelor recepţionate determină coordonatele unghiulare ale ţintei, folosind de obicei un singur impuls recepţionat de la aceasta.

Metoda monoimpuls poate fi de amplitudine sau de fază. Cea mai folosită este metoda *monoimpuls de amplitudine*, care pentru determinarea coordonatei unghiulare realizează comparaţia amplitudinii semnalelor recepţionate pe două caracteristici orientate pe direcţii uşor diferite.

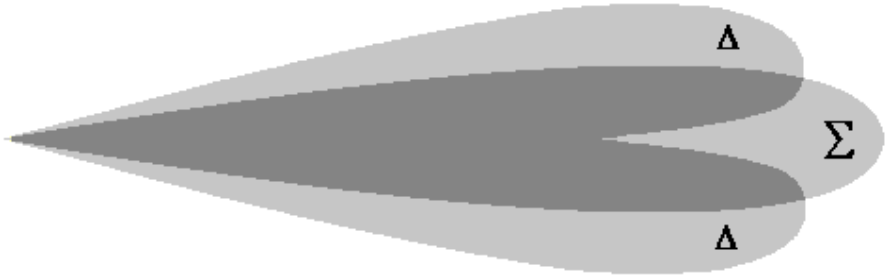


Fig. 4.9 – Caracteristicile monoimpuls într-un plan

Vom considera mai întâi cazul mai simplu al aplicării metodei monoimpuls de amplitudine pentu o singură coordonată unghiulară. Principiul constă în folosirea la recepţie a două caracteristici de directivitate, numite sumă şi diferenţă (figura 4.9). Cele două caracteristici sunt obţinute cu ajutorul a două antene elementare dispuse în planul unghiului care se măsoară. Antenele sunt orientate pe direcţii puţin diferite. Caracteristica sumă este o caracteristică directivă care se obţine prin însumarea semnalelor recepţionate de cele două antene. La emisie se

foloseşte doar caracteristica sumă, iar la recepţie ambele caracteristici. Semnalul de sondaj este emis pe caracteristica sumă. La recepţie ea este folosită pentru descoperirea ţintei la distanţa maximă posibilă, pentru măsurarea distanţei şi pentru determinarea aproximativă a coordonatei unghiulare, β sau ε. Determinarea coordonatei unghiulare este imprecisă deoarece sistemul presupune că ţinta se află pe direcţia de radiaţie maximă, indiferent care ar fi poziţia ei în interiorul caracteristicii de directivitate.

Caracteristica diferenţă se foloseşte pentru creşterea preciziei determinării coordonatei unghiulare respective. Ea este formată din doi lobi uşor decalaţi în planul respectiv. Caracteristica se obţine prin scăderea semnalelor recepţionate pe cele două antene. Valoarea diferenţei şi semnul acesteia depinde de deviaţia ţintei faţă de direcţia normală de radiaţie a antenei. Precizia determinării coordonatei unghiulare este mult mai mare decât cea a caracteristicii sumă.

Adunarea sau scăderea semnalelor se face cu ajutorul unor circuite pasive de frecvenţă foarte înaltă, cele mai folosite fiind joncţiunea T pe ghid de undă sau inelul hibrid. Ansamblul circuitelor şi liniilor de transmisie necesare pentru obţinerea semnalelor monoimpuls este numită comparator, în special la radarele de urmărire.

Metoda *monoimpuls de fază* este similară cu cea de amplitudine. Pe caracteristica diferenţă sunt folosite tot două caracteristici, singura deosebire fiind că ele sunt orientate în aceeaşi direcţie. Semnalele recepţionate de cele două antene vor avea aceeaşi amplitudine dar faze diferite. Eroarea unghiulară se obţine măsurând defazajul semnalelor recepţionate de cele două antene.

Metoda monoimpuls aplicată pentru determinarea ambelor coordonate unghiulare β şi ε foloseste 3 caracteristici de directivitate: Σ (suma), ΔAZ (delta azimut) şi ΔEL (delta elevatie); astfel în fiecare plan vom avea o caracteristică sumă şi o caracteristică diferenţă. Rezultă astfel trei semnale recepţionate, numite semnale monoimpuls.

Pentru obtinerea celor trei semnale monoimpuls, antenele cu reflector folosesc patru surse primare. În cazul reţelelor de antene, întreaga reţea este împărţită în patru zone: A, B, C şi D (figura 4.10). Cele trei semnale se obţin prin însumarea sau scăderea semnaleor recepţionate de fiecare sursă primară sau de fiecare zonă a reţelei de antene astfel:

$$\Sigma = A + B + C + D, \quad \Delta AZ = (A+C) - (B+D), \quad \Delta EL = (A+B) - (C+D)$$

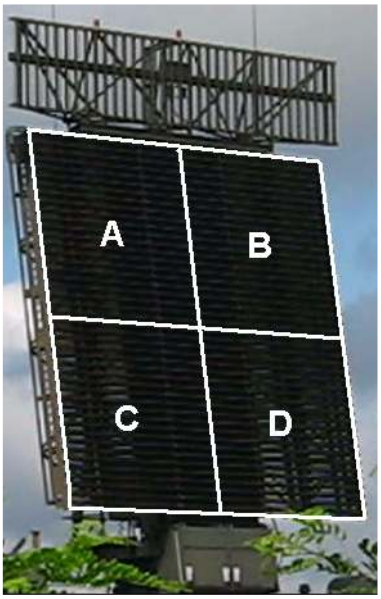


Fig. 4.10 – Reţea de antene monoimpuls

Valoarea şi semnul celor două semnale diferenţă sunt proporţionale cu deviaţia unghiulară a ţintei faţă de axa optică a antenei în cele două planuri. Astfel se calculează cu precizie cele două coordonate unghiulare ale ţintei.

Pentru obţinerea celor trei semnale monoimpuls sunt necesare un număr de patru circuite hibride. În figura 4.11 este prezentat un exemplu de obţinere al celor trei semnale folosind inele hibride.

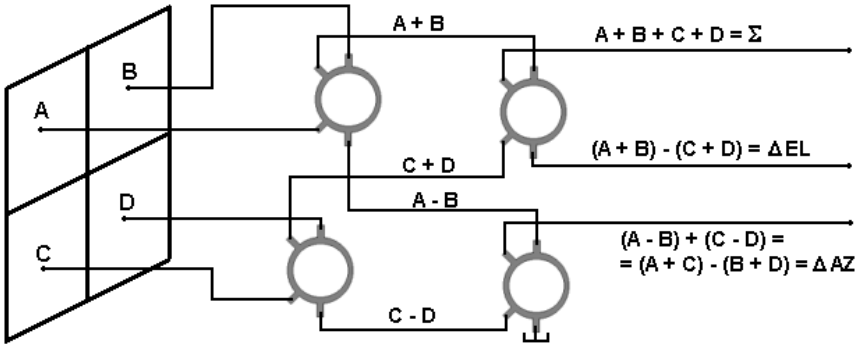


Fig. 4.11 – Obţinerea semnalelor monoimpuls

Distanţa se calculează simplu din timpul de întârziere al semnalului ecou. Cunoscând distanţa şi unghiul de înălţare se poate calcula foarte uşor şi înălţimea ţintei.

4.7 Caracteristici de directivitate utilizate de sistemele radar

Forma caracteristicii de directivitate a unui radar depinde de misiunea acestuia, de metoda de explorare a spaţiului, de metoda de determinare a coordonatelor unghiulare etc. Diagrama de directivitate a unui radar trebuie să aibă lăţimea specificată în cele două planuri, pentru a asigura determinarea coordonatelor unghiulare, şi o anumită formă pentru a asigura acoperirea întregii zone de observare, acestea la un nivel redus al lobilor secundari.

Radarele pentru supravegere aeriană folosesc o caracteristică de directivitate îngustă în plan orizontal (1- 3°) pentru a determina cât mai precis azimutul ţintelor, dar relativ largă în plan vertical (20 - 30°) pentru a acoperi un spaţiu cât mai mare în înălţime. Cea mai simplă caracteristică de acest fel este cea tip *„evantai”* (figura 4.12).

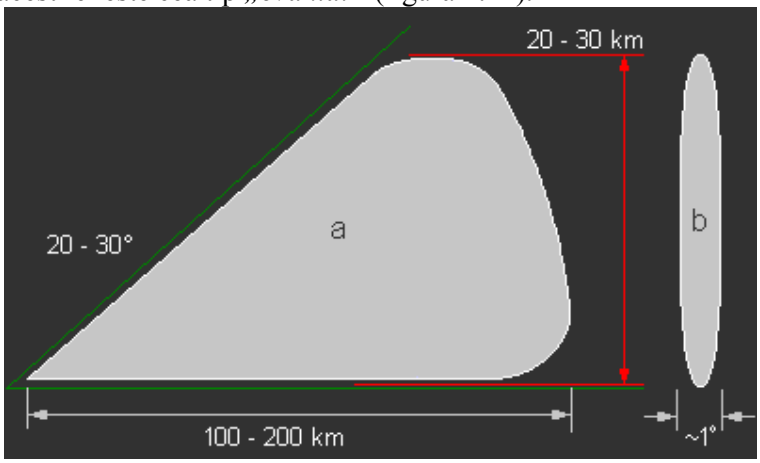


Fig. 4.12 – Caracteristica evantai (sursa: www.radartutorial.eu)

O astfel de caracteristică se poate obţine cu ajutorul unui reflector cu forma de paraboloid secţionat sau de cilindru parabolic. Deoarece lăţimea caracteristicii depinde de dimensiunea reflectorului, reflectorul trebuie să fie îngust în planul vertical şi lat în cel orizontal.

O altă metodă de realizare a unei astfel de caracteristici constă în folosirea mai multor fascicule înguste decalate în plan vertical (caracteristică multifascicul) sau a unui singur fascicul baleiat electronic sau mecanic în plan vertical. Datorită utilizării unor fascicule înguste în ambele planuri, această metodă are avantajul că permite determinarea unghiului de înălţare şi implicit a înălţimii ţintelor.

Un alt exemplu de utilizare al unei caracteristici tip evantai este cel al radarelor pentru determinarea înălţimii. În acest caz reflectorul este îngust în planul orizontal şi lat în cel vertical. Rezultă astfel o caracteristică îngustă în plan vertical, pentru o determinare precisă a unghiului de înălţare, şi puţin mai largă în plan orizontal (5 - 7°), pentru a putea orienta antena pe azimutul ţintei a cărei înălţime se doreşte a fi determinată.

O caracteristică de directivitate special proiectată pentru radarele de supraveghere aeriană şi folosită de majoritatea acestora este caracteristica de tip *consecant pătratică* sau cosecant pătrat (figura 4.13). Acest tip de caracteristică asigură o mai bună distribuţie a energiei radiate în plan vertical, rezultând o mai bună explorare a spaţiului aerian. Forma caracteristicii în plan vertical este proporţională cu pătratul cosecantei unghiului de înălţare, în timp ce în plan orizontal caracteristica este foarte îngustă.

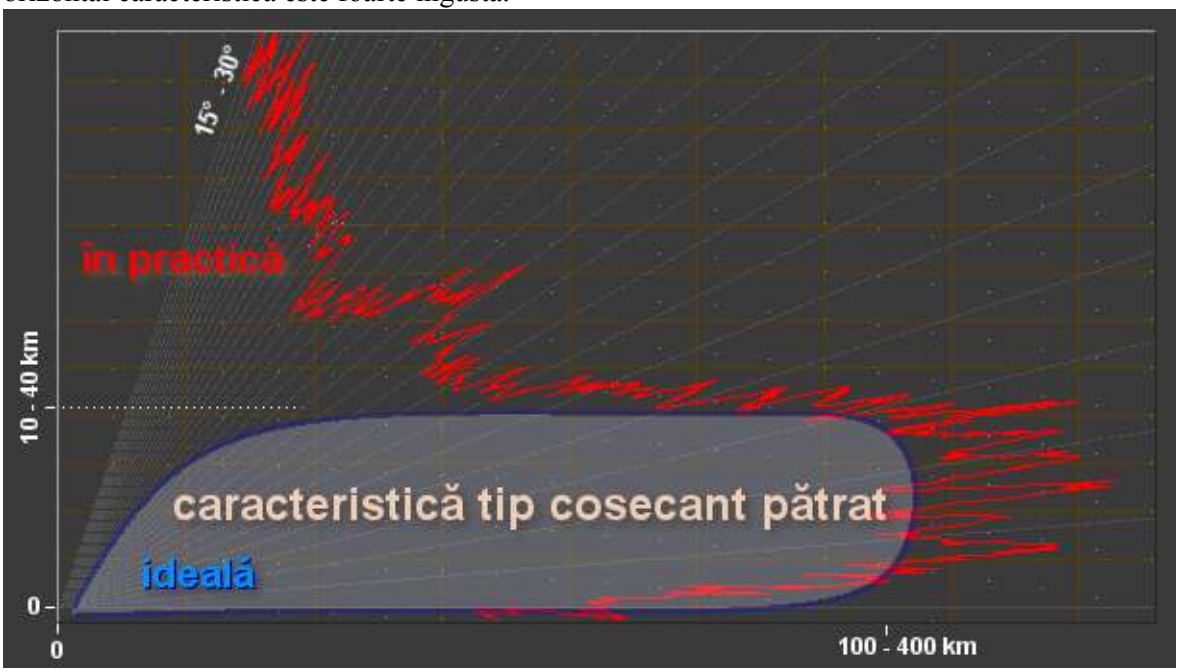


Fig. 4.13 – Caracteristica de tip cosecant pătratică (sursa: www.radartutorial.eu)

Caracteristica a rezultat din necesitatea de a avea la intrarea în receptor semnale de putere egală de la o ţintă care zboară la aceeaşi înălţime, indiferent de distanţa acesteia faţă de radar.

Denumirea provine din trigonometrie, de la funcţia cosecantă: $\csc\alpha = 1/\sin\alpha$. În continuare vom explica legătura dintre caracteristica de directivitate şi funcţia cosecantă. Din relaţia 1.4, exprimăm distanţa în funcţie de înălţime şi unghiul de înălţare:

$$D = \frac{H}{\sin\varepsilon} = H \cdot \csc\varepsilon \tag{4.8}$$

Din ecuaţia radiolocaţiei, puterea recepţionată depinde de distanţă şi de câştigul antenei:

$$P_R \sim \frac{G^2}{D^4} \tag{4.9}$$

Deoarece puterea recepţionată este constantă, rezultă că distanţa la puterea a patra este proporţională cu pătratul câştigului antenei:

$$G^2 \sim D^4 \Leftrightarrow G \sim D^2 \tag{4.10}$$

Înlocuind în formulă expresia distanţei funcţie de înălţime, avem:

$$G \sim H^2 \cdot \csc^2 \varepsilon \tag{4.11}$$

Ţinând cont că înălţimea este constantă, rezultă expresia matematică ce descrie caracteristica de tip cosecant pătratică:

$$G \sim \csc^2 \varepsilon \tag{4.12}$$

Pentru obţinerea unei caracteristici de directivitate consecant pătratică, în practică se folosesc două metode:

- modificarea formei antenei;
- utilizarea unei caracteristici multifascicul.

Prima metodă constă în modificarea formei reflectorului parabolic. Pentru obţinerea unei caracteristici de formă cosecant pătratică este necesar ca o parte din energia radiată să fie dirijată în sus. Aceasta se poate realiza prin curbarea la un unghi mai mic a părţii superioare a reflectorului, sau prin îndoirea mai accentuată a părţii inferioare a reflectorului. Deoarece energia la marginile reflectorului este mai slabă decât la centru, energia radiată în sus va fi limitată.

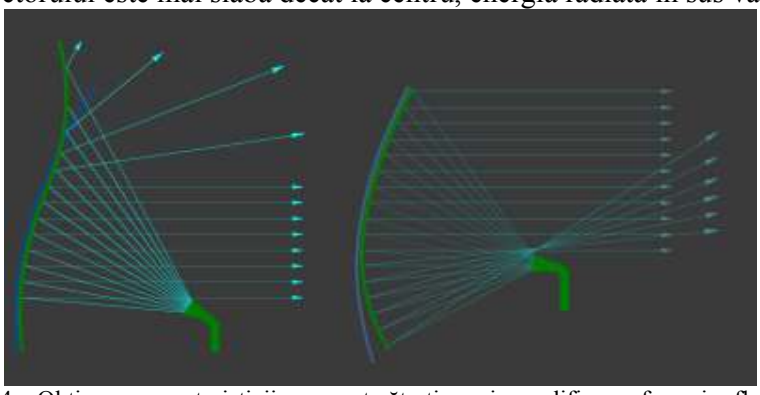


Fig. 4.14 – Obţinerea caracteristicii cosecant pătratice prin modificarea formei reflectorului (sursa: www.radartutorial.eu)

Caracteristica multifascicul sau multilob este formată din mai multe fascicule înguste decalate în plan vertical, şi care se suprapun parţial, care acoperă împreună spaţiul de observare dorit (figura 4.15). Ea se obţine prin utilizarea mai multor radiatoare, dispuse unul deasupra celuilalt. Prin alimentarea cu puteri diferite a radiatoarelor se obţine o caracteristică de formă cosecant pătratică.

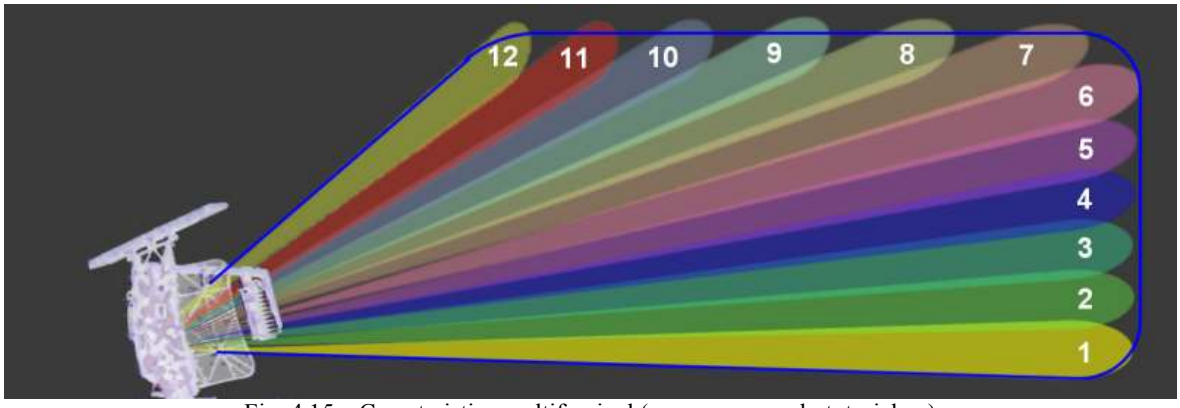


Fig. 4.15 – Caracteristica multifascicul (sursa: www.radartutorial.eu)

Folosind pentru fiecare radiator un canal de recepţie separat, cu ajutorul caracteristicii multifascicul se poate realiza şi măsurarea înălţimii ţintelor. Aceasta se determină prin măsurarea unghiului de înclinare al fasciculului în care este recepţionat cel mai puternic semnal ecou de la ţintă.

Caracteristica de tip cosecant pătrat poate fi obţinută şi cu alte tipuri de antene. De exemplu, în gama undelor metrice, folosind o reţea de antene Yagi, această caracteristică se obţine cu ajutorul reflexiilor la suprafaţa solului.

Radarele pentru observarea ţintelor de suprafaţă folosesc o caracteristică de tip consecant pătratică inversă. În acest fel se obţine o putere constantă a semnalelor recepţionate de la ţintele de suprafaţă. Exemple de radare ce utilizează o astfel de caracteristică sunt: radarele aeropurtate pentru descoperirea ţintelor terestre, radarele de aeroport pentru dirijarea traficului la sol şi radarele de coastă pentru descoperirea ţintelor maritime.

În afară de a asigura o putere constantă a semnalului recepţionat de la o ţintă ce zboară la aceeaşi înălţime, un alt avantaj al caracteristicii cosecant pătratice este că asigură o observare mai eficentă a ţintelor ce evoluează la înălţimi mari şi distanţe mici faţă de radar decât în cazul caracteristicii tip evantai. Radarele moderne merg şi mai departe, folosind caracteristici modificate astfel încât să ia în considerare şi curbura Pământului şi să asigure observarea ţintelor la unghiuri mari de înălţare (60 - 70°). Acoperirea la unghiuri mari de înălţare este necesară pentru a compensa reducerea amplificării receptorului la distanţe mici prin utilizarea circuitelor de reglare în timp a amplificării RATA.

Antenele cu *fascicul dublu* folosesc două caracteristici de directivitate decalate în plan vertical (în engleză: „high beam / low beam”). Cele două caracteristici pot fi de tip cosecant pătratice sau evantai. Radiatorul este format din două antene horn. La emisie este folosită doar caracteristica inferioară (low beam). În acest fel se măreşte distanţa de descoperire la înălţimi mici. La recepţie se utilizează ambele caracteristici. Acest tip de antene permit reducerea amplificării semnalelor de la ţintele fixe din apropierea radarului (schema RATA) fără a influenţa descoperirea ţintelor apropiate ce zboară la înălţimi mari.

Folosirea la recepţie a două caracteristici de directivitate decalate în plan vertical prezintă unele avantaje în descoperirea ţintelor. Caracteristica inferioară permite descoperirea aeronavelor ce evoluează la înălţimi mici, iar cea superioară a celor ce zboară la înălţimi mai mari. În plus, semnalul recepţionat pe caracteristica superioară este mult mai puţin influenţat de reflexiile din teren (clutter-ul terestru). Un alt avantaj al acestor antene este că prin folosirea tehnicii monoimpuls se poate estima înălţimea de zbor a ţintelor.

Caracteristica de tip „*creion*” (pencil în engleză) este o caracteristică foarte îngustă atât în plan orizontal cât şi în cel vertical (1 - 2°), ceea ce asigură o măsurare precisă atât a azimutului cât şi a unghiului de înălţare. Ea este utilizată în special de radarele de supraveghere tridimensionale, precum şi de cele de urmărire.

Acoperirea spaţiului de observare se realizează prin baleierea electronică şi mai rar mecanică a fasciculului.

În cazul radarelor pentru supraveghere aeriană, această caracteristică este utilizată de radarele tridimensionale cu reţea fazată de antene. În afară de posibilitatea determinării tuturor celor trei coordonate ale ţintelor, un alt avantaj este acela că permite utilizarea tehnicii monoimpuls.

4.8 Alte noţiuni legate de antene

4.8.1 Reducerea lobilor secundari

După cum am mai spus, lobii secundari reprezintă radiaţii nedorite pe alte direcţii decât cea de interes. Prezenţa lobilor secundari are o serie de efecte nedorite asupra funcţionării sistemelor radar.

Un prim efect este acela că ţintele sunt iradiate şi pe lobii secundari. În cazul ţintelor mari sau aflate la distanţe apropiate de radar, semnalele reflectate sunt suficient de puternice pentru a fi recepţionate. În urma recepţionării pe lobii secundari a reflexiilor de la ţinte apar o serie de ţinte false; numărul lor este egal cu cel al principalilor lobi secundari. Ţinta este afişată pe un azimut fals, deoarece azimutul asociat unui semnal ecou este dat de direcţia lobului principal.

Un alt efect este acela că lobii secundari reprezintă căi suplimentare de intrare în receptor a semnalelor perturbatoare. Semnalele de bruiaj sau reflexiile de la ţintele fixe din apropiere (clutter terestru) sunt suficient de puternice pentru a satura receptorul, chiar dacă nivelul lobilor laterali este redus. În acest fel radarul este bruiat nu numai când antena se află pe direcţia sursei de bruiaj. La puteri mari ale semnalului perturbator, efectul poate fi continuu.

Din cele de mai sus rezultă că pentru a minimiza sau chiar elimina efectele nedorite cauzate de prezenţa lobilor secundari este necesară reducerea nivelului acestora sau chiar suprimarea completă a acestora.

Din proiectarea antenelor se poate obţine un nivel foarte mic al lobilor secundari, chiar mai mic de -50 dB (prin iluminarea ponderată a suprafeţei antenei). Totuşi, odată cu scăderea nivelului lobilor secundari, se reduce câştigul antenei şi coeficientul de utilizare al suprafeţei, şi se măreşte lăţimea lobului principal. Apare astfel necesitatea unui compromis, care constă în alegerea unui nivel optim al lobilor secundari pentru care ceilalţi parametri ai antenei nu sunt afectaţi prea mult.

O altă metodă este aceea de a identifica semnalele recepţionate pe lobii secundari şi a le atenua sau chiar elimina. Această metodă poartă numele de *suprimarea lobilor secundari SLS*. Ea presupune folosirea unei antene suplimentare, numită antenă de suprimare sau SLS. Aceasta are o caracteristică de directivitate omnidirecţională, cu un nivel puţin mai mare decât cel al lobilor secundari. Uneori se foloseşte o caracteristică de tip cardioidă, care prezintă un minim pe direcţia lobului principal. Semnalele recepţionate pe antena principală şi pe cea de suprimare sunt comparate. Dacă semnalul recepţionat pe antena principală este mai mare decât cel de la antena de suprimare, rezultă că el este recepţionat pe lobul principal; în caz contrar, semnalul provine de la unul din lobii secundari şi trebuie eliminat. Metoda este aplicată la toate radarele secundare dar şi la unele radare primare.

4.8.2 Radomuri

Radomul este o structură ce acoperă sistemul de antenă pentru a-l proteja de factorii de mediu, fără a-i reduce semnificativ performanţele electromagnetice.

Scopul unui radom este de a proteja antena de ploaie, zăpadă, îngheţ sau vânt puternic. În acest fel antena poate avea un motor de rotire mai puţin puternic şi poate funcţiona în condiţii adverse de mediu. Radomul trebuie să aibă proprietăţi electromagnetice foarte bune astfel încât să nu afecteze funcţionarea radarului, dar acest lucru nu este practic posibil. Un radom introduce anumite pierderi prin reflexie şi absorbţie. De asemenea, el modifică prin refracţie direcţia lobului principal şi distorsionează forma caracteristicii de directivitate. Influenţa acestor fenomene este redusă la minim prin proiectarea corespunzătoare a radomului şi folosirea unor materiale adecvate.

După locul de dispunere al radarului, radomurile pot fi cu baza la sol (inclusiv cele de pe nave) sau aeropurtate.

Radomurile cu baza la sol sunt în general de formă sferică (figura 4.16), aceasta asigurând o structură mecanică solidă şi având proprietăţi aerodinamice foarte bune la acţiunea vânturilor puternice. De asemenea, precipitaţiile aderă mai greu la o structură sferică. Radomurile sferice sunt construite din panouri de diferite forme, montate pe o structură metalică sau conectate direct între ele. Panourile sunt realizate din materiale transparente electromagnetic, ca de exemplu fibră de sticlă acoperită cu teflon. Pe exterior este dispus un material special care face ca apa de ploaie să curgă în şiroaie (mult mai mici decât lungimea de undă) şi nu ca un strat, pentru a nu afecta propagarea undelor. Pentru eliminarea zăpezii care se strânge pe radom se poate încălzi radomul, dat această soluţie este scumpă datorită dimensiunilor acestuia. O soluţie mai simplă şi ieftină este folosirea unei frânghii legate deasupra radomului şi îndepărtarea zăpezii cu ajutorul acesteia.

Fig. 4.16 – Exemplu de radom

În ceea ce priveşte radomurile aeropurtate, ele trebuie să îndeplinească în primul rând condiţiile aerodinamice impuse avionului. Radomurile radarelor din vârful avioanelor de vânătoare au formă conică sau de ogivă şi sunt suficient de solide pentru a rezista la vitezele mari de zbor. De asemenea, ele trebuie să îndeplinească şi alte condiţii specifice zborului. De exemplu, pentru protecţia radarului împotriva fulgerelor, radomul conţine o serie de conductoare pe suprafaţa exterioară.

Capitolul 5

EMIŢĂTOARE

5.1 Noţiuni generale despre emiţătoarele de radiolocaţie

Emiţătorul este acel subsistem al radarului care generează semnalul de frecvenţă foarte înaltă ce va fi radiat în spaţiu, adică semnalul de sondaj. În cazul radarelor ce funcţionează în impulsuri, semnalul de sondaj este format dintr-o serie de impulsuri de radiofrecvenţă (FFI), de mare putere şi durată mică.

Toate emiţătoarele de radiolocaţie îndeplinesc două funcţii principale, şi anume:

- generarea semnalului de sondaj: generarea directă a semnalului de sondaj sau generarea şi amplificarea în putere a acestuia, la parametrii ceruţi.
- modulaţia semnalului de sondaj.

În compunerea sistemelor radar se întâlnesc mai multe tipuri de emiţătoare. Din punct de vedere al configuraţiei schemei emiţătoarele de radiolocaţie se împart în două mari categorii: *emiţătoare cu generare directă* şi *emiţătoare cu lanţ de amplificare*. Emiţătoarele cu generare directă au ca element principal un tub electronic special de frecvenţă foarte înaltă (de obicei magnetron), care generează oscilaţiile de FFI la puterea dorită la ieşire, nefiind nevoie de o amplificare suplimentară a impulsurilor de sondaj. În cazul emiţătoarelor cu lanţ de amplificare, impulsul de radiofrecvenţă este generat mai întâi la o putere mică şi este amplificat ulterior printr-unul sau mai multe etaje de amplificare, realizate cu tuburi electronice speciale (amplitron, tub cu undă progresivă, clistron) sau cu dispozitive semiconductoare.

În funcţie de tehnologia constructivă utilizată, întâlnim emiţătoare cu tuburi electronice şi emiţătoare cu semiconductoare (tehnologie „solid-state”). După caracterul emisiei emiţătoarele pot fi cu emisie continuă sau cu emisie în impulsuri. După cum am menţionat şi în primul capitol, ne vom concentra îndeosebi asupra celor cu emisie în impulsuri.

Semnalul de sondaj trebuie să îndeplinească o serie de cerinţe, comune tuturor emiţătoarelor de radiolocaţie. În primul rând puterea acestui semnal trebuie să fie foarte mare, de ordinul sutelor de kilowaţi şi chiar megawaţi. Ne amintim din ecuaţia radiolocaţiei că distanţa maximă de descoperire a unui radar este proporţională cu radical de ordinul patru din puterea de emisie, deci cu cât puterea de emisie este mai mare, va creşte şi distanţa de acţiune a radarului. O a doua cerinţă este ca durata impulsurilor de sondaj să fie cât mai mică, de câteva microsecunde şi chiar mai puţin, pentru a asigura o capacitate de separare în distanţă cât mai bună. Excepţie de la aceste două cerinţe fac radarele ce utilizează o modulaţie internă a impulsurilor de sondaj (de fază sau de frecvenţă); cea mai utilizată este *modulaţia liniară de frecvenţă (MLF)*. La aceste radare impulsurile au o durată mare (zeci, sute de microsecunde), şi implicit o putere în impuls mai redusă. Capacitatea de separare în distanţă se imbunătăţeste prin folosirea la recepţie a tehnicii de *compresie a impulsurilor*.

O altă cerinţă care se impune semnalului de sondaj este ca acesta să aibă o frecvenţă purtătoare foarte înaltă, pentru a asigura propagarea în bune condiţii a acestuia în spaţiu. În plus, dimensiunile antenelor sunt strict dependente de lungimea de undă folosită, deci este necesară folosirea unor lungimi de undă mici, pentru dimensiuni acceptabile ale antenelor. De asemenea, forma impulsurilor de sondaj trebuie să fie cât mai apropiată de cea dreptunghiulară. Acest lucru este necesar în primul rând pentru a avea o precizie cât mai bună de măsurare a distanţei.

Emiţătoarele moderne trebuie să aibă o foarte bună stabilitate a frecvenţei impulsurilor generate, pentru a asigura coerenţa semnalelor. Gama de frecvenţe de lucru trebuie să fie

suficient de largă pentru a permite utilizarea eficientă a diferitelor metode de protecţie la bruiaj (ECCM).

Principalii parametrii ai emiţătoarelor sunt în general aceiaşi cu cei ai radarului în ansamblu, şi anume: frecvenţa de lucru (banda de frecvenţe) şi lungimea de undă, puterea de emisie (medie şi în impuls), durata impulsului, perioada şi frecvenţa de repetiţie a impulsurilor, coeficientul de umplere, parametrii de fiabilitate, randamentul etc. Majoritatea acestor parametrii au fost discutaţi pe larg în primul capitol, aşa că nu vom insista asupra lor.

Randamentul sau eficienţa unui emiţător se exprimă în general ca raportul între puterea medie de emisie şi puterea consumată de la sistemul de alimentare. Eficienţa emiţătoarelor are în general valori destul de reduse, nu atât din cauza circuitelor propriuzise, ci mai ales din cauza prezenţei circuitelor auxiliare, ca de exemplu sistemele de răcire. Parametrul de fiabilitate cel mai important îl reprezintă timpul mediu de bună funcţionare MTBF. Valoarea acestuia depinde într-o foarte mare măsură de circuitele auxiliare ale emiţătorului, cum ar fi ventilatoarele, sistemele de răcire cu lichid, defecte ale mufelor etc.

5.2 Emiţătoare cu generare directă

Această categorie de emiţătoare a fost până nu demult cea mai folosită în construcţia sistemelor radar. Ea este specifică radarelor analogice şi este încă întâlnită la radarele mai ieftine, cum ar fi cele de navigaţie de la bordul navelor de dimensiuni mici. După cum am menţionat, emiţătoarele cu generare directă folosesc un tub oscilator de mare putere (în general magnetron) pentru a genera direct impulsul de frecvenţă foarte înaltă şi mare putere, fără a mai fi nevoie de amplificarea ulterioară a acestuia.

Schema bloc a unui astfel de emiţător se compune din două elemente principale, generatorul de f.f.î. şi modulatorul de impulsuri. În figura 5.1 este prezentată o astfel de schemă, precum şi diagramele de semnal asociate.

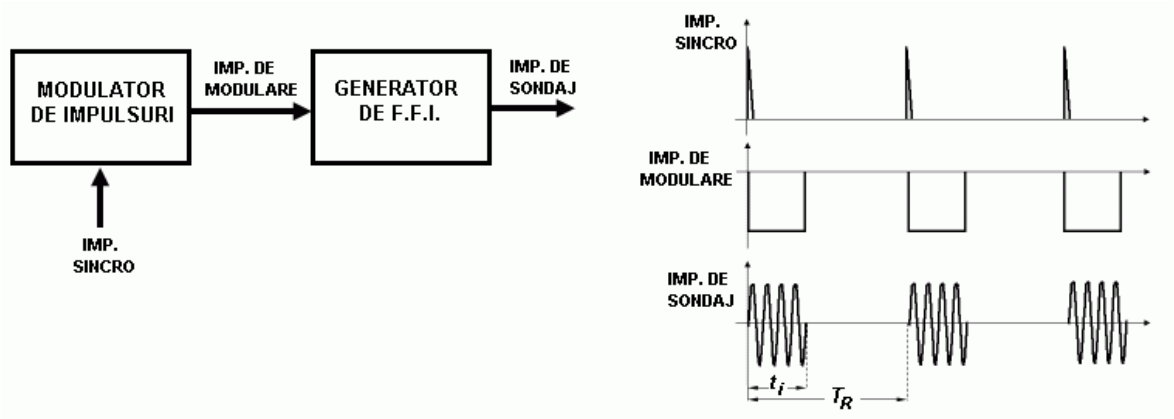


Fig. 5.1 – Emiţător cu generare directă

Atunci când este alimentat, generatorul produce oscilaţii de frecvenţă foarte înaltă şi putere mare. Pentru a genera impulsuri de radiofrecvenţă, oscilaţiile sunt modulate de impulsurile primite de la modulator. La fiecare impuls de sincronizare modulatorul generează un impuls scurt de înaltă tensiune, a cărui durată este egală cu durata impulsului de sondaj. Altfel spus, generatorul de f.f.î. este alimentat în impulsuri. În cazul magnetronului impulsurile modulatoare sunt negative deoarece se aplică la catod, anodul fiind legat la masă. Frecvenţa de repetiţie a impulsurilor de sondaj este dată de cea a impulsurilor de sincronizare.

Principiul de funcţionare al modulatoarelor de impulsuri folosite la emiţătoarele cu generare directă constă în acumularea lentă între impulsurile de sondaj a energiei de la o sursă de alimentare şi descărcarea rapidă a energiei acumulate la fiecare impuls de sincronizare, sub forma impulsurilor de modulare. Marea majoritate a modulatoarelor de impulsuri folosesc drept element de acumulare a energiei o linie rezonantă de încărcare, numită şi linie de acumulare.

În figura 5.2 este prezentată schema bloc a unui emiţător cu linie de acumulare, aceasta fiind cea mai întâlnită schemă de emiţător cu generare directă. Redresorul de înaltă tensiune asigură redresarea tensiunii alternative de alimentare a emiţătorului, transformând-o într-o tensiune continuă de valoare foarte mare (ex. 7 kV). Principalele elemente constructive ale redresorului sunt un transformator trifazic ridicător şi o punte cu diode redresoare.

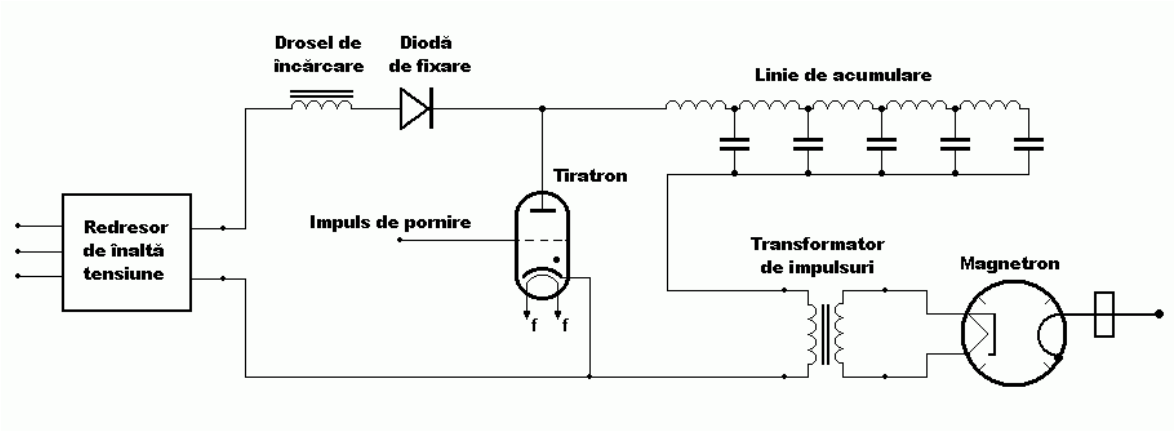


Fig. 5.2 – Emiţător cu magnetron

Droselul de încărcare asigură încărcarea liniei de acumulare la o tensiune aproape dublă faţă de cea de la ieşirea redresorului. Aceasta este posibil datorită fenomenului de auotinducţie. În momentul în care linia este încărcată la o tensiune egală cu cea a redresorului, intensitatea curentului în drosel este maximă. Scăderea curentului în drosel determină apariţia unei tensiuni de autoinducţie. Datorită acestei tensiuni linia continuă să se încarce până la o tensiune aproape dublă faţă de cea a redresorului. O altă funcţie a droselului de încărcare este de a limita curentul de încărcare a liniei.

Deoarece linia este încărcată la un potenţial mai mare decât tensiunea la ieşirea redresorului, există pericolul ca linia să se descarce înapoi pe redresor. Pentru a evita acest lucru, s-a introdus o diodă de fixare.

Linia de acumulare, numită şi de încărcare, este o linie rezonantă formată din circuite LC. Ea se va încărca rezonant cu o tensiune aproape dublă faţă de cea de la ieşirea redresorului. Procesul de încărcare este unul lent, care are loc între impulsurile de sondaj.

La aplicarea impulsului de pornire de la sincronizator pe grila tiratronului, acesta se deschide, asigurând descărcarea tensiunii acumulate de linie pe primarul transformatorului de impulsuri. Tiratronul joacă rolul unui comutator electronic, comandat de impulsurile de sincronizare. Descărcarea liniei are loc foarte rapid, pe durata unui impuls de sondaj. Timpul de descărcare depinde de numărul de celule din compunerea liniei de acumulare. Ca elemente de comutare pot fi folosite şi alte dispozitive, dar cele mai întâlnite sunt tiratroanele, cu gaz sau metaloceramice.

Transformatorul de impulsuri aduce amplitudinea impulsului de tensiune la valoarea necesară la ieşire (ex. 30 kV), pentru alimentarea magnetronului. Deoarece magnetronul are anodul legat la masă, catodul acestuia se alimentează cu tensiune negativă. Pentru aceasta, secundarul transformatorului de impulsuri este conectat invers faţă de primar, pentru a obţine la

ieşire o polaritate negativă a impulsului. Un alt rol al transformatorului de impulsuri este de a asigura adaptarea de impedanţă între linie şi magnetron.

Pe durata fiecărui impuls modulator aplicat pe catodul magnetronului, acesta va genera oscilaţii de frecvenţă foarte înaltă. Astfel, prin alimentarea în impulsuri a magnetronului se obţine generarea unor oscilaţii modulate în impulsuri. Impulsurile de sondaj sunt aplicate de la ieşirea magnetronului la antenă, pentru a fi radiate în spaţiu.

După ce linia s-a descărcat complet, tiratronul se închide şi rămâne aşa pînă la următorul impuls de pornire.

În concluzie, în funcţionarea unui modulator de impulsuri întîlnim două etape principale: încarcarea lentă a liniei de acumulare, respectiv descărcarea rapidă a liniei la aplicarea fiecărui impuls de sincronizare.

În figura 5.3 este prezentat un exemplu de modulator din compunerea unui radar. Se observă în figură bobinele şi condensatoarele din compunerea liniei de acumulare, precum şi tiratronul cu gaz.

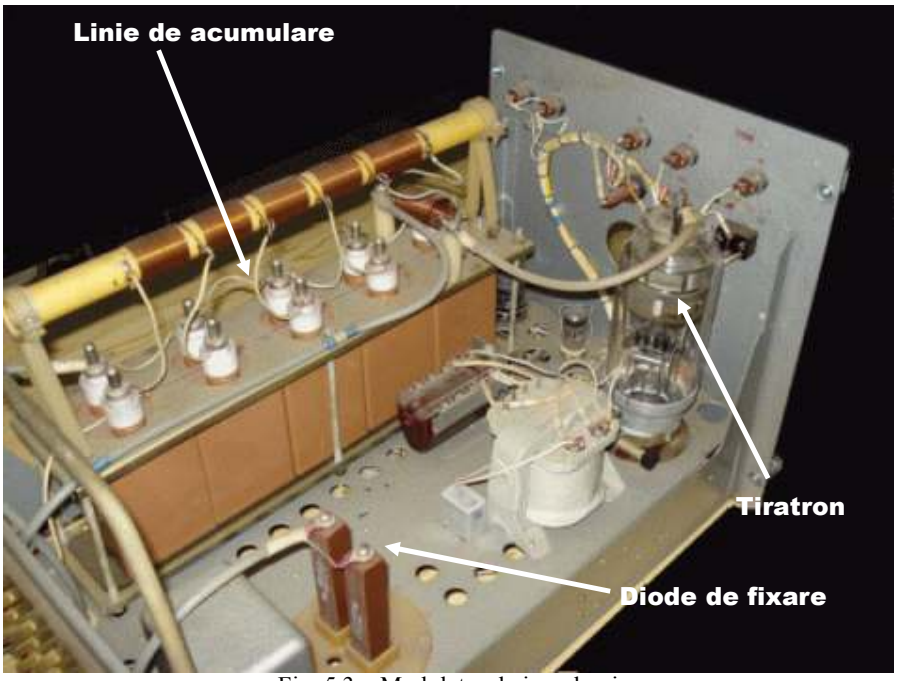


Fig. 5.3 – Modulator de impulsuri

În schema de mai sus au fost incluse doar acele elemente necesare pentru a înţelege principiul de funcţionare al acesteia. Schemele emiţătoarelor mai conţin în afara acestora şi alte circuite, cum ar fi: circuite de corecţie a formei impulsului modulator, circuit de amplificare a impulsurilor de sincronizare, circuite de alimentare etc.

5.3 Emiţătoare cu lanţ de amplificare

Emiţătoarele cu lanţ de amplificare sunt acele emiţătoare în care semnalul de sondaj este generat la o putere mică şi apoi amplificat până la puterea necesară la ieşire. Ele sunt folosite în majoritatea radarelor moderne, în special la radarele digitale.

În cazul emiţătoarelor cu generare directă, oscilaţiile de mare putere au tendinţa de a aluneca în frecvenţă, din diferite cauze, cum ar fi variaţia temperaturii sau modificarea impedanţei antenei. Modificarea frecvenţei semnalului de sondaj se compensează parţial prin folosirea în receptor a reglării automate a frecvenţei. Emiţătoarele cu lanţ de amplificare prezintă mai puţine probleme de stabilitate a frecvenţei.

Un alt dezavantaj al emiţătoarelor cu generare directă este acela că nu sunt coerente. Coerenţa este o condiţie absolut necesară pentru prelucrarea Doppler a semnalelor ecou. Un anumit nivel de coerenţă poate fi obţinut prin diverse metode (fazarea heterodinei coerente), dar în prezent acest lucru nu mai este suficient.

Concluzionând, putem spune că principalele avantaje ale emiţătoarelor cu lanţ de amplificare faţă de cele cu generare directă sunt *stabilitatea frecvenţei* semnalelor generate şi *coerenţa*. Alte avantaje, la fel de importante, sunt agilitatea de frecvenţă şi posibilitatea utilizării unor forme complexe de semnale de sondaj. Totuşi, aceste avantaje vin cu dezavantajul creşterii complexităţii şi ridicării costului.

Emiţătoarele cu lanţ de amplificare pot fi atât cu tuburi electronice, cât şi cu semiconductoare. Indiferent de tehnologia utilizată, schema unui astfel de emiţător este formată din partea de generare a semnalului la o putere redusă dar frecvenţă foarte înaltă, respectiv din lanţul de amplificare (vezi figura 5.4).

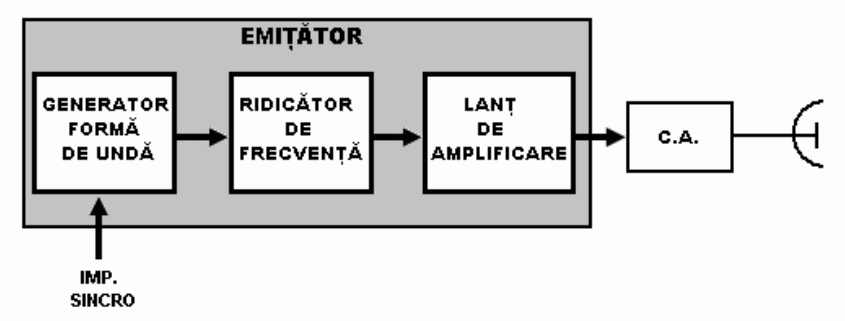


Fig. 5.4 – Emiţător cu lanţ de amplificare

Generatorul formei de undă produce semnalul de sondaj la o frecvenţă joasă şi o putere redusă. Termenul de formă de undă este folosit mai nou pentru a caracteriza semnalele de sondaj complexe, cu modulaţie internă a impulsurilor. Ridicătorul de frecvenţă converteşte apoi semnalul din frecvenţă joasă în frecvenţă foarte înaltă.

Lanţul de amplicare este format dintr-o succesiune de etaje amplificatoare de putere, care amplifică semnalul de sondaj până la puterea necesară pentru a putea fi radiat în spaţiu. Amplificatoarele pot fi cu tuburi electronice de microunde sau cu semiconductoare (de obicei tranzistoare).

Ca tuburi electronice amplicatoare se folosesc tuburile cu undă progresivă, amplitroanele şi clistroanele cu două sau mai multe cavităţi. Un exemplu practic îl reprezintă folosirea mai multor amplificatoare cu tranzistoare, urmate de un amplificator cu TUP, ca etaj final. Un alt exemplu constă în utilizarea a două etaje amplificatoare cu TUP, urmate de două amplitroane. Avantajele şi dezavantajele amplificatoarelor cu tuburi sau cu semiconductoare vor fi discutate mai târziu în acest capitol.

Ansamblul format din generatorul formei de undă şi ridicătorul de frecvenţă este cunoscut sub denumirea de *excitator*.

5.3.1 Excitatorul

Excitatorul (în engleză: exciter) este acea componentă din compunerea radarului care generează forma de undă pentru emisie. După cum am văzut mai sus, principalele elemente ale excitatorului sunt *generatorul formei de undă* şi *ridicătorul de frecvenţă*. Excitatorul poate fi localizat atât în emiţător cât şi în receptor. Deoarece el generează semnalul de sondaj, este considerat ca aparţinând traseului de emisie.

În cazul radarelor analogice, generatorul formei de undă constă dintr-un modulator de impulsuri şi un oscilator de joasă frecvenţă. La radarele mai vechi semnalul este generat direct în frecvenţă foarte înaltă, cu ajutorul unui oscilator de microunde de mică putere (cu clistron sau cu diodă Gunn); în acest caz ridicătorul de frecvenţă lipseşte.

Radarele digitale moderne folosesc un generator digital al formei de undă, urmat de un convertor numeric / analogic. Utilizarea unui generator numeric permite generarea unor forme de undă foarte complexe şi programabile. Cele mai utilizate forme de undă complexe sunt cele cu modulaţie internă a impulsului: cu modulaţie liniară de frecvenţă (MLF) sau cu modulaţie de fază (coduri Barker).

Ridicătorul de frecvenţă (în engleză: upconverter) este format în principal din unul sau mai multe mixere ridicătoare şi oscilatoarele locale asociate. Mixerele sunt etaje amestecătoare de semnal, realizate de obicei cu diode Schottky. Ca oscilatoare locale sunt folosite oscilatoare de mică putere, cu clistron reflex sau cu diode (Gunn, IMPATT etc.). Aceste oscilatoare locale au dezavantajul că modificarea frecvenţei de oscilaţie nu este foarte rapidă, iar gama de variaţie a frecvenţei este relativ redusă.

Una din caracteristicile principale ale radarelor moderne o reprezintă agilitatea de frecvenţă. Aceasta reprezintă posibilitatea radarului de a-şi modifica frecvenţa de emisie foarte rapid, de la salvă la salvă de impulsuri, sau chiar de la impuls la impuls. Pentru aceasta, unul din oscilatoarele locale din excitator este un sintetizor de frecvenţă.

Sintetizorul de frecvenţă este un generator de semnal de frecvenţă înaltă care permite modificarea rapidă a frecvenţei semnalului generat, în funcţie de comanda primită. Altfel spus, sintetizorul este un oscilator comandat, care generează un anumit număr de frecvenţe discrete, într-o bandă relativ largă, pornind de la o anumită frecvenţă de referinţă; schimbarea frecvenţei semnalului generat fiind realizată la schimbarea semnalului de comandă. Comanda poate fi analogică sau numerică. Sintetizoarele actuale folosesc drept comandă un cuvânt numeric.

La momentul actual există trei tehnici de realizare a sintetizoarelor de frecvenţă: indirectă (PLL), analogică directă şi digitală directă, fiecare cu propriile avantaje şi dezavantaje. *Sinteza analogică directă,* numită şi mixare/filtrare/divizare, foloseşte o serie de divizoare şi multiplicatoare de frecvenţă, amestecătoare şi comutatoare comandate pentru a produce frecvenţa dorită. Metoda se numeşte directă deoarece calitatea semnalului de ieşire este corelată de cea a semnalului de referinţă de la intrare. *Sinteza indirectă* foloseşte ca elemente principale un oscilator PLL şi un divizor de frecvenţă comandat. *Sinteza digitală directă* (DDS – Direct Digital Synthesis) este cea mai recent dezvoltată tehnică de sinteză de frecvenţă. Semnalul de ieşire este sintetizat dintr-o definiţie digitală a rezultatului dorit. DDS foloseşte logică numerică şi o memorie pentru a construi digital semnalul de ieşire, şi un convertor pentru a-l converti din digital în analog. Astfel, metoda DDS este aproape în întregime digitală, iar amplitudinea, frecvenţa şi faza semnalului sunt cunoscute cu exactitate şi controlate la orice moment.

Sintetizorul de frecvenţă permite emiţătorului să genereze un număr mare de frecvenţe discrete, într-o bandă relativ mare. Schimbarea frecvenţei de emisie se face prin modificarea frecvenţei sintetizorului.

Oscilatoarelor locale din emiţător, inclusiv sintetizorul de frecvenţă, sunt utilizate şi la recepţie, pentru conversia semnalului ecou din frecvenţă foarte înaltă în frecvenţă joasă. Având

în vedere că schimbarea frecvenţei de emisie se face prin modificarea frecvenţei sintetizorului, receptorul se acordează automat pe noua frecvenţă de lucru a radarului.

5.3.2 Emiţătoare pe corp solid

Emiţătoarele pe corp solid („solid-state”) au devenit în prezent soluţia cea mai utilizată datorită avantajelor prezentate de dispozitivele semiconductoare faţă de tuburile electronice. Printre aceste avantaje, cele mai importante sunt: fiabilitatea ridicată, stabilitatea în funcţionare, funcţionarea într-o bandă mai largă de frecvenţe, mentenanţa mai simplă, gabaritul redus. În plus, dispozitivele semiconductoare folosesc tensiuni de alimentare mici (volţi, zeci de volţi), faţă de tuburile electronice ce folosesc tensiuni de ordinul kilovolţilor şi chiar zecilor de kilovolţi şi nu necesită timp de încălzire, putând fi cuplate instantaneu. Tensiunile mici de alimentare conduc şi la lipsa radiaţiilor specifice tensiunilor înalte.

Cu toate aceste avantaje, există totuşi câteva dezavantaje care limitează folosirea dispozitivelor semiconductoare în circuitele emiţătoarelor. În primul rând, puterea maximă la care pot lucra tranzistoarele este mică în comparaţie cu cea a tuburilor electronice. În general, un singur tranzistor poate lucra la puteri de până la câteva zeci de waţi. O soluţie pentru folosirea etajelor cu tranzistoare la puteri mai mari o reprezintă montarea acestora în paralel. Un alt dezavantaj este că puterea maximă la care pot fi folosite tranzistoarele scade mult în cazul funcţionării lor în impulsuri. Din această cauză, emiţătoarele cu semiconductoare folosesc impulsuri de durată mare şi coeficienţi de umplere ridicaţi. Un ultim dezavantaj constă în faptul că puterea maximă de utilizare a tranzistoarelor scade invers proporţional cu frecvenţa. Astfel, utilizarea tranzistoarelor este în general limitată până în banda S.

Din cele de mai sus rezultă că folosirea semiconductoarelor în emiţătoare este o soluţie foarte eficientă în cazul etajelor de putere mică şi medie. Astfel, în etajele excitatorului şi cele de amplificare de putere mică, este foarte avantajoasă utilizarea dispozitivelor semiconductoare. Ca exemplu, în cazul oscilatoarelor de mică putere se obţin rezultate foarte bune prin folosirea diodelor Gunn şi IMPATT. Problemele apar însă în etajele amplificatoare de mare putere. Una din soluţii o constituie utilizarea ca ultim etaj a unui tub electronic. În cazul emiţătoarelor pe corp solid se impune soluţia dispunerii în paralel a mai multor amplificatoare cu tranzistoare. Datorită dezvoltărilor tehnologice, această soluţie este din ce în ce mai utilizată, existând la ora actuală o serie de sisteme radar în întregime „solid-state”.

Dispunerea în paralel a amplificatoarelor conduce la un alt avantaj al emiţătoarelor pe corp solid, şi anume acela al redundanţei. Defectarea unor module amplificatoare nu are un efect semnificativ asupra funcţionării emiţătorului în ansamblu, conducând doar la degradarea performanţelor acestuia, în principal la scăderea distanţei de descoperire.

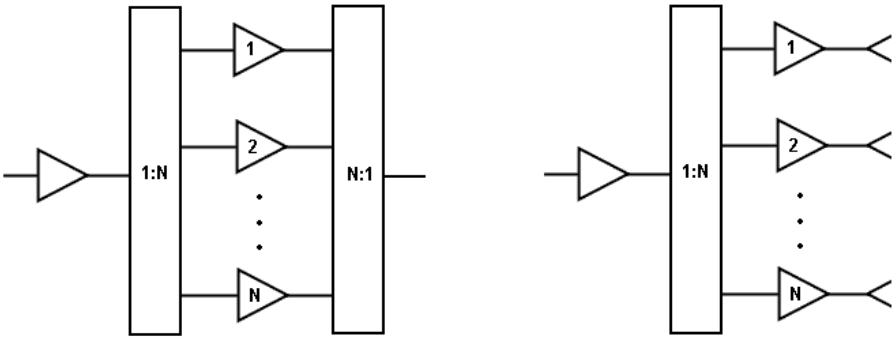


Fig. 5.5 – Scheme de dispunere în paralel a amplificatoarelor cu tranzistoare

În figura 5.5 sunt prezentate câteva variante de dispunere în paralel a amplificatoarelor cu tranzistoare. Primul caz este specific radarelor ce folosesc o antenă cu reflector. Semnalul de sondaj de la excitator, amplificat de etajele de preamplificare, este divizat în putere, amplificat în paralel de cele N amplificatoare şi apoi semnalele de la ieşirea fiecărui amplificator sunt însumate în putere şi trimise la radiatorul antenei, prin intermediul traseelor de frecvenţă foarte înaltă (ghid de undă). În cel de-al doilea caz, specific radarelor cu reţele fazate de antene, semnalele de ieşire ale fiecărui amplificator sunt trimise la elementele reţelei, iar însumarea energiei are loc în spaţiu.

O altă soluţie care se impune din ce în ce mai mult este cea folosită la radarele cu reţele active de antene. În acest caz fiecare element al antenei (dipol) are asociat un modul de emisie-recepţie, numit şi transceiver. Un exemplu de astfel de modul este prezentat în figura 5.6. După cum spune şi numele, modulul este folosit atât la emisie cât şi la recepţie. Un modul emisie-recepţie include următoarele elemente ale unui radar „clasic”, distribuite pentru fiecare element al reţelei de antene: amplificatorul final al emiţătorului, comutatorul de antenă, circuitul de protecţie al receptorului, amplificatorul de frecvenţă foarte înaltă din receptor. În plus, conţine şi defazorul pentru deplasarea caracteristicii de directivitate, comun pentru emisie şi pentru recepţie.

La emisie circuitul realizează amplificarea finală a impulsurilor de sondaj, cu ajutorul unui amplificator de putere şi al unui preamplificator (driver). Modulul funcţionează la puteri relativ mici. Puterea totală se obţine prin însumarea în spaţiu a energiei de la ieşirea fiecărui modul. Având în vedere că numărul modulelor este foarte mare, chiar de ordinul miilor, puterea obţinută are valori destul de mari. La recepţie circuitul realizează amplificarea cu zgomot redus a semnalelor ecou; pentru protejarea amplificatorului cu zgomot redus (LNA), înaintea acestuia este dispus un limitator cu diode PIN. Circulatorul şi comutatoarele emisie-recepţie realizează separarea celor două trase, de emisie şi de recepţie, adică funcţia de comutator de antenă. Defazorul comandat asigură defazarea semnalelor atât la emisie cât şi la recepţie, în scopul deplasării electronice a caracteristicii de directivitate a reţelei de antene.

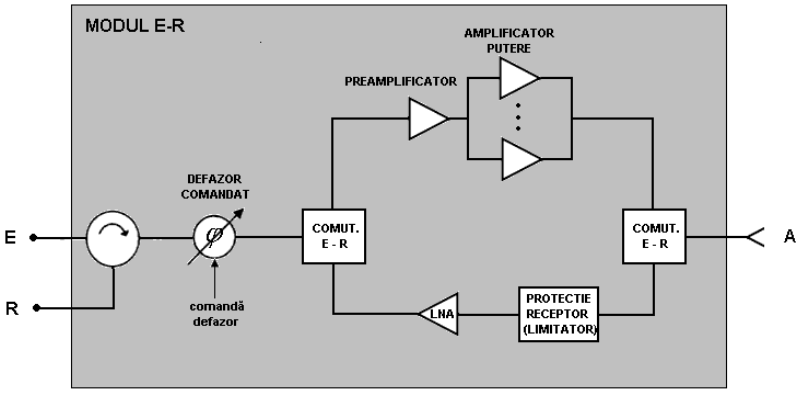


Fig. 5.6 – Modul emisie-recepţie

5.3.3 Emiţător cu lanţ de amplificare pe corp solid

Figura 5.7 prezintă schema simplificată a unui emiţător pe corp solid din compunerea unui radar digital. Pe schemă se pot identifica cu uşurinţă cele trei elemente principale ale unui emiţător cu lanţ de amplificare, prezentate în figura 5.4, şi anumeŞ generatorul formei de undă, ridicătorul de frecvenţă şi lanţul de amplificare.

Generatorul formei de undă este unul digital, ceea ce permite producerea unor forme de undă complexe. Forma de undă numerică este apoi transformată în semnal analogic prin

intermediul convertorului numeric-analogic. Ridicătorul de frecvenţă este format de obicei din mai multe etaje de conversie, de obicei două sau trei. Ultimul mixer foloseşte ca oscilator local un sintetizor de frecvenţă, ceea ce permite modificarea rapidă a frecvenţei semnalului la ieşirea emiţătorului, în funcţie de comanda primită. Numărul treptelor de schimbare de frecvenţă este acelaşi şi în receptor, iar semnalele de oscilator local produse de excitator sunt folosite şi de amestecătoarele din receptor. La ieşirea ridicătorului de frecvenţă semnalul ajunge la frecvenţa foarte înaltă necesară la ieşire, dar are o putere redusă.

Lanţul de amplificare este format dintr-un etaj de preamplificare şi amplificatoarele de putere dispuse în paralel. Preamplificatorul amplifică semnalul de la ieşirea excitatorului la un nivel optim pentru intrările amplificatoarelor de putere, astfel încât să se obţină o amplificare maximă de la acestea. În preamplificator se întâlnesc mai multe etaje amplificatoare cu tranzistoare, dispuse în serie. Defectarea preamplificatorului este critică, ducând la nefuncţionarea întregului emiţător. O soluţie întâlnită în practică este aceea ca preamplificatorul să fie identic constructiv cu amplificatoarele de putere, iar în caz de defectare să fie înlocuit cu unul din amplificatoarele de putere. O altă soluţie este dublarea preamplificatorului cu un etaj identic, cu rol de rezervă caldă.

Etajul final de amplificare este format dintr-un număr mare de amplificatoare de putere dispuse în paralel. Numărul de amplificatoare depinde de puterea necesară la ieşire, dar şi de pierderile divizorului de putere. Fiecare amplificator de putere este format dintr-o succesiune de amplificatoare individuale cu tranzistoare, montate în serie şi paralel. Ca tranzistoare se pot folosi cele bipolare, dar cele mai utilizate sunt cele cu efect de câmp, în special MOSFET.

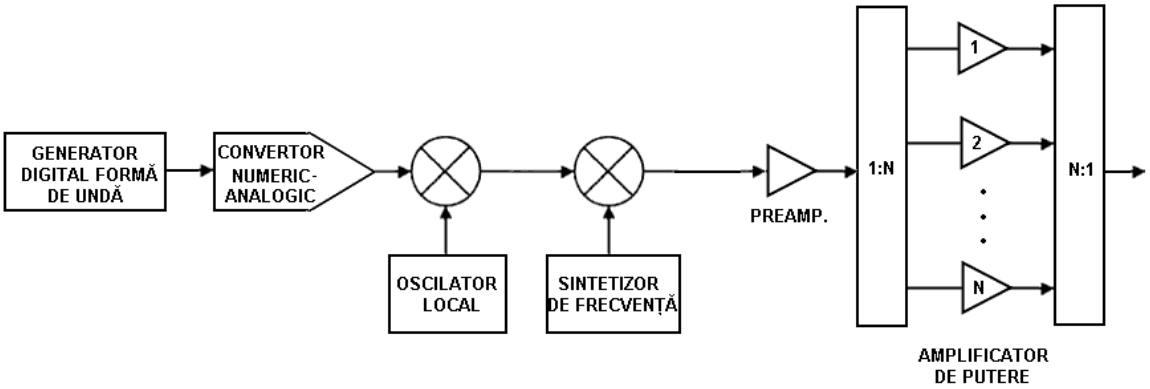


Fig. 5.7 – Emiţător „solid-state”

În concluzie, putem spune că funcţionarea unui emiţător „solid-state” modern cuprinde trei etape principale. Semnalul de sondaj este mai întâi generat la o putere mică şi joasă frecvenţă. În continuare el este convertit în frecvenţă foarte înaltă, iar apoi este amplificat până la puterea dorită.

Deoarece excitatorul este folosit atât la emisie cât şi la recepţie, există o tendinţă actuală de a-l considera ca subsistem separat al radarului. În această situaţie, termenul de emiţător se referă doar la întreg etajul amplificator de putere. Considerăm această denumire improprie, având în vedere că sursa semnalului de sondaj o reprezintă excitatorul, acesta fiind parte integrantă a emiţătorului.

Capitolul 6

RECEPTOARE

6.1 Noţiuni generale despre receptoarele de radiolocaţie

Instalaţia de recepţie a unui radar este destinată pentru recepţionarea, amplificarea, detectarea şi prelucrarea semnalelor ecou (reflectate de la ţinte) şi aducerea lor la o formă pentru a putea fi vizualizate pe aparatura de indicare (sau pentru a fi prelucrate de procesor).

La antenă, în afară de semnalele ecou utile, mai sosesc şi alte semnale nedorite, acestea constituind perturbaţii pentru instalaţia de recepţie. Rezultă, aşadar, că pentru a fi posibilă recepţia semnalului util din mulţimea de perturbaţii, receptorul trebuie să fie în primul rând *selectiv*.

Receptorul trebuie să extragă informaţia de pe semnalul purtător de radiofrecvenţă pentru a o aplica următorului etaj al sistemului radar, în vederea prelucrării şi afişării sale. Această operaţiune se numeşte *detecţie* şi constituie una din funcţiile principale ale receptorului. Pentru realizarea ei receptorul este prevăzut cu un etaj neliniar, specific tipului de modulaţie a semnalului recepţionat, denumit detector.

Puterea la intrarea receptorului corespunzătoare semnalului util este în general foarte mică (depinzând de puterea de emisie, distanţa până la ţintă, orientarea antenei, etc.) în comparaţie cu cea necesară funcţionării normale a dispozitivului final (procesor sau indicator). De aici rezultă că o altă funcţie principală a unui receptor este *amplificarea.*

Amplificarea poate fi făcută până la detector, deci în radiofrecvenţă, sau după detector, adică pe frecvenţa de modulaţie. Din cele prezentate până acum rezultă că cea mai generală schemă bloc a unui receptor are aspectul din figura 6.1. Un astfel de radioreceptor se numeşte cu amplificare directă.

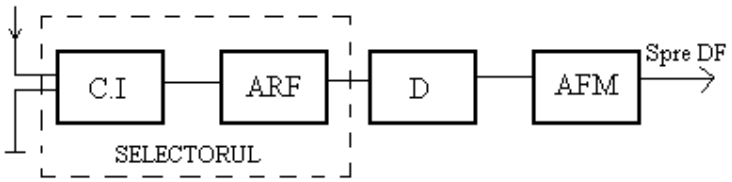


Fig. 6.1 – Receptor cu amplificare directă

Funcţia receptorului unui radar analogic de generaţie mai veche era de a detecta şi amplifica semnalele ecou de putere mică până la un nivel suficient pentru a fi afişate pe indicator. La radarele mai recente, în afară de această funcţie, receptorul realizează şi o selecţie a semnalelor utile (selecţia ţintelor mobile, filtru adaptat). În plus, receptoarele conţin circuite speciale care au rolul de a elimina interferenţele şi bruiajele recepţionate de sistemul de antenă odată cu semnalele utile.

O parte din prelucrarea semnalelor ecou este realizată de către receptor. Uneori este dificil a trage o linie de separare între receptor şi procesor. În cazul radarelor digitale moderne, această linie este considerată aceea de trecere de la analogic la digital.

Receptoarele pot fi clasificate după mai multe criterii. În funcţie de frecvenţa de lucru întâlnim receptoare de unde lungi, de unde medii, de unde scurte sau de unde ultrascurte; respectiv de gamă metrică, decimetrică, centimetrică, milimetrică sau submilimetrică. După domeniul de aplicaţie există receptoare de telecomunicaţii, receptoare radio şi TV, receptoare astronomice, receptoare de radiolocaţie etc. Din punct de vedere al configuraţiei schemei

funcţionale există două tipuri principale de receptoare: receptoare cu amplificare directă (figura 6.1) şi receptoare superheterodină (figura 6.2).

În radiolocaţie s-a impus schema *receptorului superheterodină*.

6.2 Parametrii receptoarelor

Compararea performanţelor receptoarelor se face pe baza parametrilor principali ai acestora, numiţi şi indici de calitate ai receptoarelor.

Selectivitatea reprezintă capacitatea receptorului de a extrage semnalul util, purtător al informaţiei, din mulţimea semnalelor parazite de diferite puteri şi frecvenţe de la intrarea receptorului. După cum am menţionat, în afara semnalului util, la intrarea receptorului vom avea o serie de semnale perturbatoare. Aceste perturbaţii provin de la alte staţii radar, sisteme de comunicaţii, bruiaje, sau zgomote provenite fie din mediul exterior, fie generate de sistemul radar. Alte interferenţe pot apărea datorită „clutter-ului", adică prin reflexii de la obiecte din mediu, altele decât ţintele dorite. În general, mai toate tipurile de perturbaţii au un nivel mai mare decât cel al semnalului util.

Selectivitatea receptorului are la bază, în general, diferenţa ce există între spectrul semnalului util şi cel al perturbaţiilor. De aceea la intrarea receptorului se dispune un circuit de filtrare, acordat pe frecvenţa purtătoare a semnalului util, formând circuitul de intrare al receptorului. În felul acesta, circuitul de intrare nu permite pătrunderea în receptor decât a semnalului util pe care este acordat şi, eventual, a perturbaţiilor al căror spectru se suprapune total sau parţial cu cel al semnalului util.

Caracterizarea selectivităţii unui receptor se face prin intermediul benzii de trecere. *Banda de trecere* reprezintă lăţimea curbei de rezonanţă la nivelul de – 3dB. Altfel spus, ea este definită ca diferenţa între frecvenţele la care amplificarea în putere a receptorului scade cu 3 dB faţă de valoarea maximă, sau amplificarea în tensiune scade cu 0,707 faţă de maxim. Banda de trecere este determinată de spectrul semnalului util. Astfel, în cazul radarelor în impulsuri, ea este aproximativ egală cu inversul duratei impulsurilor de sondaj (aproximativ $0{,}8/t_i$ pentru impulsuri gaussiene şi $1{,}4/t_i$ pentru impulsuri dreptunghiulare).

Pentru asigurarea unei bune selectivităţi, banda de trecere trebuie să fie cât mai îngustă. În acelaşi timp, banda de trecere să fie suficient de largă pentru asigurarea fidelităţii redării informaţiei recepţionate.

Sensibilitatea reprezintă capacitatea receptorului de a asigura o putere normală la intrarea dispozitivului final (indicator sau procesor) când la intrarea receptorului puterea semnalului are valoarea minimă. Altfel spus, sensibilitatea reprezintă tensiunea minimă la intrarea receptorului sau puterea corespunzătoare acestei tensiuni pentru care se asigură funcţionarea normală a dispozitivului final. Sensibilitatea este reprezentată de obicei prin semnalul minim detectabil, care reprezintă acel semnal de la intrare pentru care la ieşirea receptorului raportul semnal / zgomot este egal cu 2 (semnalul util depăşeşte nivelul zgomotelor cu 3dB). Un alt mod de a exprima sensibilitatea este prin intermediul semnalului minim de interes, care este acel semnal de intrare pentru care la ieşirea receptorului se obţine un raport semnal / zgomot unitar.

Sensibilitatea este principalul indice de calitate, deoarece de el depinde distanţa maximă de descoperire a radarului, conform ecuaţiei radiolocaţiei:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_E \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_T}{(4\pi)^3 \cdot P_{R\min}}} = const. \cdot \sqrt[4]{\frac{P_E}{P_{R\min}}} \qquad (6.1)$$

unde: D_{max} – distanţa maximă de descoperire; P_E – puterea semnalului emis; G – câştigul antenei; λ - lungimea de undă a semnalului emis; σ_T – suprafaţa efectivă de reflexie a ţintei; P_{Rmin} – sensibilitatea receptorului.

Un receptor bine proiectat poate oferi performanţele cerute ale radarului cu costuri mai mici şi la un gabarit mai redus decât prin mărirea puterii emiţătorului. Mărirea sensibilităţii radioreceptoarelor se realizează prin reducerea zgomotelor interne din primele etaje. Cea mai bună sensibilitate s-a obţinut în gama undelor centimetrice, în jur de 10^{-22}W (-180dBm).

În acelaşi timp creşterea sensibilităţii poate conduce la apariţia unor interferenţe suplimentare sau la arderea primului etaj al receptorului la apariţia unor perturbaţii nu foarte puternice, în lipsa unor circuite de protecţie suplimentare.

Zgomotul (perturbaţiile) afectează foarte mult funcţionarea unui receptor. Zgomotele pot fi externe (bruiaje de orice tip, radiaţii cosmice, zgomotul termic al antenei), sau interne (generate de circuitele receptorului). Puterea zgomotului termic generat de circuitele electronice poate fi exprimată cu ajutorul expresiei:

$$P_{zg} = k \cdot T \cdot B \tag{6.2}$$

unde: k - constanta lui Boltzmann, T - temperatura circuitului (în grade Kelvin), B - banda de frecvenţe a zgomotului.

Din punct de vedere fizic, zgomotul propriu generat de un circuit se măsoară prin factorul de zgomot. *Factorul de zgomot* se defineşte ca raportul puterilor semnal/zgomot de la intrarea şi, respectiv, ieşirea receptorului:

$$F_{zg} = \frac{\left(\dfrac{P_S}{P_{zg}}\right)_{\text{intr.}}}{\left(\dfrac{P_S}{P_{zg}}\right)_{ies.}} \tag{6.3}$$

El arată de câte ori un receptor diminuează raportul dintre puterea semnalului şi puterea zgomotelor. Dacă receptorul nu introduce nici un zgomot, el are coeficientul de zgomot egal cu unitatea. Odată cu creşterea factorului de zgomot va scădea sensibilitatea receptorului. Rezultă că este necesar ca receptorul să aibă un factor de zgomot cât mai redus. Pentru un receptor format din N etaje, expresia factorului de zgomot total în funcţie de factorii de zgomot ai fiecărui etaj este:

$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \ldots + \frac{F_N - 1}{G_1 G_2 \cdots G_N} \tag{6.4}$$

în care: F_i – factorul de zgomot al etajului i; G_i – amplificarea în putere a etajului i; i=1÷N. Rezultă că factorul de zgomot total depinde cel mai mult de factorul de zgomot şi amplificarea primului etaj. Deci, pentru un factor de zgomot al receptorului cât mai mic este necesar ca primul etaj (AFFI) să aibă un câştig mare şi un zgomot intern mic.

O valoare ridicată a factorului de zgomot va determina un raport semnal / zgomot la ieşirea receptorului redus, fapt care afectează puternic selecţia semnalului util din zgomote. În general, pentru o detecţie cât mai bună, se impune un coeficient de distingere (raportul semnal / zgomot la ieşire) între 10 şi 20dB.

Gama dinamică a receptorului reprezintă raportul (exprimat de obicei în dB) dintre amplitudinea maximă şi cea minimă a semnalului de intrare. Nivelul maxim este limitat de distorsiunile de neliniaritate admise ale ultimului etaj de radiofrecvenţă, iar cel minim este determinat de sensibilitate. Creşterea gamei dinamice se poate realiza prin creşterea sensibilităţii şi prin utilizarea sistemelor de reglare automată a amplificării.

La intrarea receptorului pot exista semnale de putere relativ mare, care provin de la obiecte mari din teren, ţinte aflate la distanţă mică sau ţinte cu suprafaţa efectivă de reflexie foarte mare, şi în acelaşi timp semnale foarte slabe, de putere apropiată de nivelul sensibilităţii. Din aceast motiv gama dinamică a receptorului trebuie să fie foarte mare, astfel încât receptorul să poată prelucra simultan atât semnale foarte slabe cât şi semnale puternice.

Gama dinamică a semnalului la ieşire trebuie să fie relativ redusă, deoarece dispozitivul final (indicatorul sau procesorul) nu poate lucra normal cu semnale de puteri foarte diferite. Astfel, receptorul trebuie să transforme gama dinamică mare a semnalului de la intrare într-o gamă dinamică foarte mică a semnalului la ieşire. Rezultă că pentru a asigura o gamă dinamică mare a receptorului, amplificarea acestuia trebuie să fie neliniară, depinzând de nivelul semnalului la intrare. Altfel spus, semnalele slabe vor fi amplificate puternic, în timp ce semnalele de putere mare vor fi amplificate mai puţin sau chiar atenuate. În acest scop în receptor se folosesc scheme de reglare automată a amplificării sau amplificatoare logaritmice.

În afara parametrilor prezentaţi mai sus, mai întâlnim o serie de alţi parametrii, din care amintim:

- *puterea de ieşire,* sau nivelul semnalului la ieşirea receptorului, reprezintă puterea semnalului aplicat mai departe dispozitivului final;
- *amplificarea* sau câştigul receptorului reprezintă raportul dintre nivelul semnalului la ieşire şi nivelul semnalului la intrarea în receptor;
- *frecvenţa de lucru* reprezintă domeniul frecvenţelor de acord în limitele căruia se asigură recepţia normală a semnalelor;
- *stabilitatea* în funcţionare reprezintă capacitatea receptorului de a lucra stabil când parametrii săi se modifică între limite admise la variaţiile de temperatură ale mediului, tensiunii de alimentare, acţiunea şocurilor mecanice, electrice etc.;
- *fidelitatea* sau calitatea reproducerii informaţiei este capacitatea receptorului de a reda la ieşire o formă cât mai apropiată de forma semnalului de sondaj; ea este influenţată de distorsiunile introduse de etajele componente;
- *Siguranţa în funcţionare* (fiabilitatea) este apreciată prin timpul mediu de funcţionare fără defecţiuni (MTBF). Ridicarea fiabilităţii se face prin metoda dublării elementelor sau blocurilor cele mai vulnerabile la defectări (redundanţă). În prezent, construcţia receptorului în tehnologie „solid-state” asigură o fiabilitate foarte bună, pe lângă gabarit, greutate şi preţ de cost reduse.
- *Stabilitatea la perturbaţii* este capacitatea receptorului de a asigura recepţia sigură a informaţiei în condiţiile existenţei perturbaţiilor.

Mai pot fi definiţi şi alţi indici de calitate, cum ar fi: consumul, preţul de cost, uşurinţa în exploatare etc., dar a căror importanţă depinde mult de destinaţia receptorului.

6.3 Receptorul superheterodină

Schema bloc prezentată în figura 6.1 este cea mai simplă schemă după care poate fi realizat un receptor. Receptorul construit după o astfel de schemă se numeşte *cu amplificare directă*. Sensibilitatea sa este redusă deoarece numărul de etaje amplificatoare este relativ scăzut. În blocul de radiofrecvenţă nu se pot folosi mai mult de două etaje, pentru a nu complica acordul şi a asigura o funcţionare stabilă. Redus este şi numărul etajelor din blocul AFM, pentru evitarea apariţiei distorsiunilor de neliniaritate. Acest receptor are fidelitatea redusă datorită faptului că semnalul aplicat detectorului nu poate atinge valori pentru care dioda să se comporte ca un element liniar. Detecţia fiind parabolică, la ieşirea detectorului apar şi alte componente în afara celor conţinute de informaţia transmisă. Datorită acestor dezavantaje, majoritatea receptoarelor actuale se construiesc după schema superheterodină (figura 6.2).

Receptorul superheterodină este acel receptor la care are loc schimbarea de frecvenţă a semnalului ecou, din frecvenţă foarte înaltă într-o frecvenţă joasă, numită *frecvenţă intermediară*. El este folosit practic la toate radarele şi poate fi cu una sau mai multe schimbări de frecvenţă. Schimbarea de frecvenţă este folosită deoarece amplificarea, filtrarea şi prelucrarea

semnalelor sunt mult mai simplu de realizat la frecvenţe joase, acesta fiind principalul avantaj al acestui tip de receptor. Numărul etajelor de frecvenţă foarte înaltă este redus la minimum.

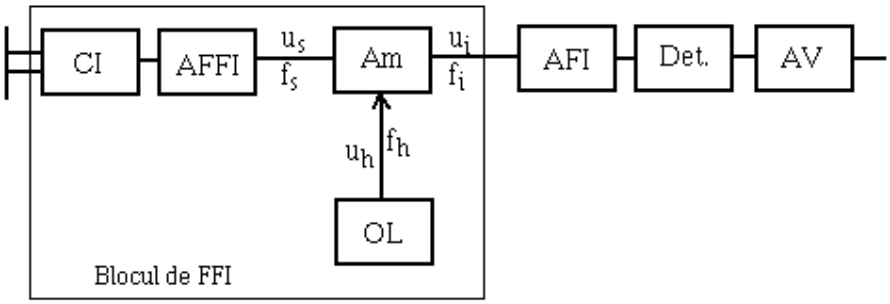


Fig. 6.2 - Schema bloc a receptorului superheterodină

Semnalul ecou se aplică de la antenă prin comutatorul de antenă la intrarea receptorului. Circuitul de intrare (CI) are rol de preselecţie a semnalului de intrare şi de protecţie a receptorului. Amplificatorul de frecvenţă foarte înaltă (AFFI) este un amplificator cu zgomot redus şi amplificare mare. Semnalul ecou amplificat se aplică apoi la amestecător (Am). Tot la amestecător se aplică oscilaţii întreţinute de FFI de la heterodina locală (oscilatorul local - OL).

Amestecătorul este un etaj neliniar care amestecă cele două semnale de FFI rezultând la ieşire un semnal cu frecvenţa egală cu diferenţa frecvenţelor celor două semnale. Această frecvenţă poartă denumirea de frecvenţă intermediară. Amplitudinea semnalului în frecvenţă intermediară este proporţională cu cea a semnalului de FFI de la intrare; astfel, amestecătorul nu afectează informaţia conţinută de semnal, ci îi modifică doar frecvenţa purtătoare.

Semnalul în frecvenţă intermediară se aplică la amplificatorul de frecvenţă intermediară (AFI), care este acordat pe frecvenţa intermediară f_i. După amplificarea în AFI semnalul intră în detector (Det). Detectorul poate fi de amplitudine, impulsuri, frecvenţă sau fază, funcţie de tipul de modulaţie a semnalului recepţionat şi de necesităţile prelucrării ulterioare.

În cazul radarelor în impulsuri, cele mai simple receptoare folosesc un detector de amplitudine, care extrage anvelopa semnalului în frecvenţă intermediară (FI) rezultând la ieşire impulsuri video. Semnalul în videofrecvenţă este apoi amplificat până la valoarea dorită la ieşire.

Pentru o prelucrare coerentă a semnalelor, radarele moderne folosesc alte tipuri de detectoare, cum ar fi detectorul de fază.

Un alt mare avantaj al receptorului superheterodină este că acordul acestuia în frecvenţă se poate realiza simplu prin modificarea frecvenţei oscilatorului local, fără a afecta astfel selectivitatea etajelor de frecvenţă intermediară.

6.3.1 Circuite de intrare în receptoare

Circuitele de intrare în receptoare îndeplinesc două funcţii principale: *preselecţia de frecvenţă* a semnalelor aplicate la intrarea receptorului, respectiv *protecţia* receptorului la semnale foarte puternice.

Preselecţia de frecvenţă asigură eliminarea semnalelor parazite, lăsând să treacă doar semnalele în banda de frecvenţe a radarului, printre care şi semnalele ecou. Ca circuite preselectoare se folosesc filtre trece bandă, de obicei cu constante distribuite (ghiduri de undă, linii microstrip).

Circuitele de protecţie a receptorului realizează protecţia acestuia în cazul apariţiei unor semnale foarte puternice la intrare, semnale ce pot distruge circuitele sensibile ale receptorului. Astfel de semnale pot fi scurgeri ale semnalului de sondaj pe timpul emisiei sau semnale de la alte surse exterioare. Comutatoarele de antenă îndeplinesc şi rolul de protecţie a receptorului, după cum ne amintim din capitolul 3.

Cele mai utilizate elemente în ciruitele de protecţie sunt descărcătoarele şi circuitele cu diode PIN. Circuitele de protecţie cu diode PIN pot fi comutatoare comandate sau limitatoare. Descărcătoarele şi limitatoarele cu diode PIN blochează intrarea în receptor la apariţia unor semnale puternice, care depăşesc un anumit nivel. Comutatoarele comandate cu diode PIN blochează intrarea în receptor în diferite situaţii, cum ar fi pe timpul emisiei sau când radarul este oprit.

În circuitele de intrare pot fi incluse şi circuitele RATA, realizate de obicei cu atenuatoare comandate cu diode PIN. Acestea au rolul de a proteja receptorul de reflexiile foarte puternice de la obiectele apropiate din teren.

Un alt rol al circuitelor de intrare este acela de a asigura adaptarea de impedanţă între antenă şi receptor.

6.3.2 Amplificatoare în frecvenţă foarte înaltă

Amplificatoarele de frecvenţă foarte înaltă au rolul de a amplifica semnalul captat de antenă până la un nivel necesar funcţionării amestecătorului. După cum am văzut anterior, factorul de zgomot total al receptorului depinde foarte mult de factorul de zgomot al primului circuit, în cazul nostru AFFI. Din acest motiv AFFI sunt *amplificatoare cu zgomot redus* (LNA – low noise amplifier). În plus, pentru a obţine un coeficient de zgomot redus este necesar ca amplificarea AFFI să fie suficient de mare (10 – 30dB). Banda de trecere a AFFI este largă, de obicei egală cu banda de lucru a radarului, iar gama dinamică este mare.

Ca amplificatoare de frecvenţă foarte înaltă se folosesc *amplificatoarele cu tranzistoare*. La frecvenţe mai mici se folosesc tranzistoare bipolare, în timp ce la frecvenţe mai mari se folosesc tranzistoare cu efect de câmp. Schemele de amplificatoare cu tranzistoare sunt realizate pe circuite microstrip.

Amplificatoarele de frecvenţă foarte înaltă se pot realiza şi prin folosirea *amplificatoarelor parametrice*. Avantajul acestora este costul mic, dar au dezavantajul că au o gamă dinamică mică. Amplificatoarele parametrice conţin o diodă varactor (condensator variabil) care îşi măreşte capacitatea odată cu creşterea curentului care trece prin ea.

Ca amplificatoare de frecvenţă foarte înaltă sunt folosite şi tuburile electronice speciale pentru microunde, în special *tuburile cu undă progresivă*. Acestea lucrează la frecvenţe foarte înalte şi au avantajul că au un coeficient de zgomot redus şi un factor de amplificare mare. Un alt avantaj al tubului cu undă progresivă este că lucrează într-o bandă largă de frecvenţe, nefiind necesar acordul suplimentar al acestuia. În plus, TUP asigură şi o anumită preselecţie în frecvenţă; de asemenea, suportă şi niveluri mai mari ale semnalelor la intrare. Dezavantajele amplificatorului cu tub cu undă progresivă sunt gabaritul mare şi tensiunile mari de alimentare.

Amplificatorul în frecvenţă foarte înaltă poate lipsi din schema receptorului. Receptoarele ce utilizează amestecătorul ca prim etaj au avantajul unei game dinamice mai mari, dar au un factor de zgomot ridicat, fiind mai rar întâlnite.

6.3.3 Schimbătoare de frecvenţă

Schimbarea de frecvenţă realizează transformarea semnalului de frecvenţă foarte înaltă, purtător al informaţiei, într-un semnal cu o purtătoare de frecvenţă mai mică, fixă, fără a influenţa informaţia conţinută de semnal. Pentru aceasta schimbătorul de frecvenţă este compus, în principiu, din trei etaje componente: amestecătorul (elementul neliniar care realizează înmulţirea semnalelor aplicate la intrările sale), oscilatorul local (generează o oscilaţie întreţinută de radiofrecvenţă) şi un filtru acordat pe frecvenţa intermediară (figura 6.3).

Transformarea purtătoarei semnalului de intrare se datorează faptului că amestecătorul realizează înmulţirea celor două tensiuni aplicate la intrare. La ieşirea amestecătorului vom avea

diverse componente de diferite frecvenţe, egale cu diferenţa şi suma frecvenţelor semnalelor aplicate, f_h+f_s şi $|f_s - f_h|$. În practică însă, se obţin şi o serie de combinaţii ale armonicilor acestora, de forma $|mf_s \pm nf_h|$, unde m şi n sunt numere întregi. Pentru extragerea componentei ce ne interesează este prevăzut filtrul acordat pe frecvenţa $f_i = |f_s - f_h|$.

Amplitudinea acestei componente depinde de parametrii amestecătorului (coeficientul de transfer) şi amplitudinile tensiunilor aplicate. Aşadar, dacă tensiunea de semnal este modulată în amplitudine, frecvenţă sau fază, componenta de frecvenţă intermediară va avea amplitudinea, frecvenţa sau faza variabile după aceeaşi lege.

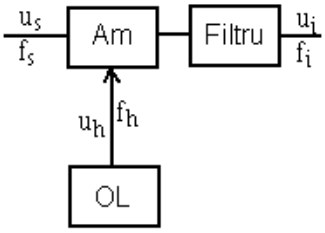
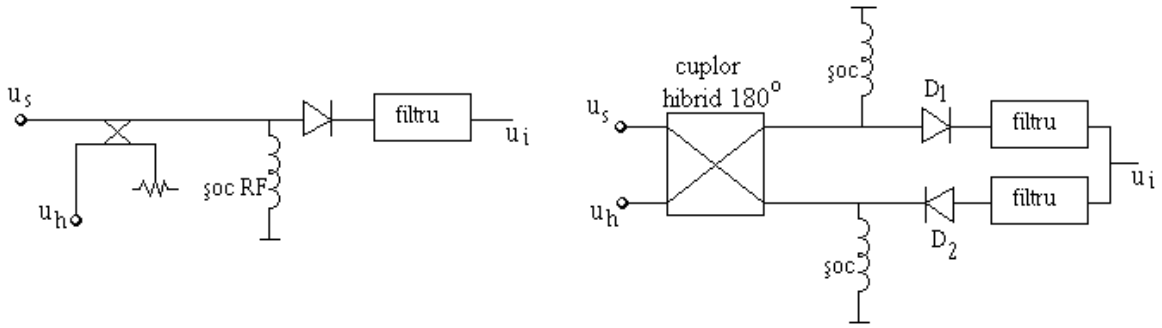


Fig. 6.3 – Schema bloc a schimbătorului de frecvenţă

Înmulţirea celor două tensiuni, u_s şi u_h, se realizează în general prin utilizarea elementelor neliniare. La frecvenţe de peste 1GHz, ca elemente neliniare de amestec în schimbătoarele de frecvenţă se folosesc diodele semiconductoare, în special diodele Schottky şi cele cu contact punctiform (diode cristal), dar şi tranzistoarele cu efect de câmp. Avantajele acestora sunt: nivel redus al zgomotelor interne, dimensiuni mici, absenţa surselor de alimentare, neliniaritatea pronunţată etc.

Cel mai simplu circuit amestecător este *mixerul cu o singură poartă*. Acesta utilizează o singură diodă ca element neliniar, după cum se observă în figura 6.4-a. Din această cauză mixerul funcţionează cu un nivel de putere de la heterodină mic, rezultând dezavantajul unui domeniu dinamic redus. Pentru un domeniu dinamic mai mare se pot cupla 2 sau 3 diode în serie, necesitând niveluri de putere de la heterodină mai mari. Alte dezavantaje ale acestui tip de mixer sunt: puterea de heterodină este reflectată în poarta semnalului; utilizarea unui cuplor la intrare creşte pierderile de conversie şi factorul de zgomot.

Problemele mixerului cu o singură poartă au fost rezolvate prin folosirea *mixerului echilibrat* (figura 6.4-b). În acest caz puterea de heterodină reflectată către portul de intrare al semnalului ecou se anulează, iar semnalele de frecvenţă intermediară se adună dacă diodele sunt cuplate invers. Pierderile de conversie sunt aceleaşi ca şi la mixerul cu o singură poartă. Principalul avantaj al mixerului echilibrat este că zgomotul provenit de la heterodină se anulează la ieşirea FI.

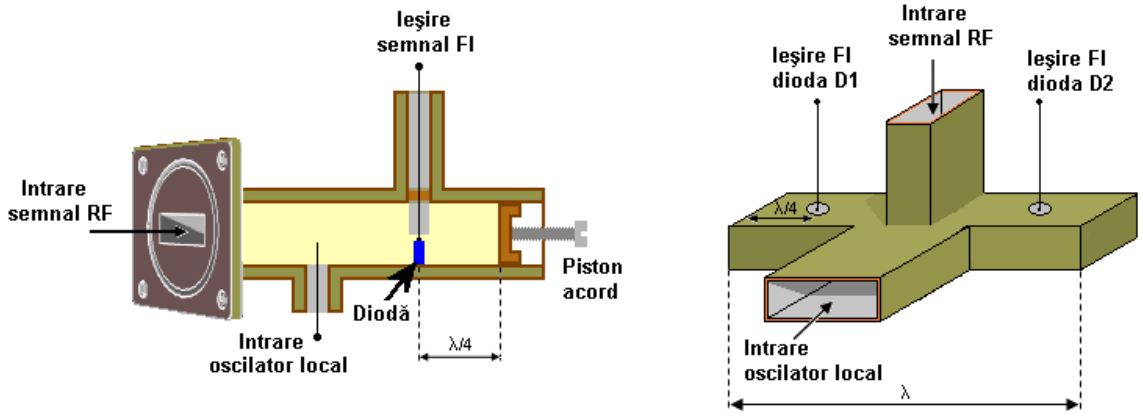


a) b)

Fig. 6.4 – Circuite amestecătoare:
a) Mixer cu o singură poartă; b) Mixer echilibrat

De asemenea, mixerul echilibrat posedă o izolare mai bună între porţile de semnal şi de heterodină, respectiv între cele de heterodină şi de ieşire. În plus, el asigură şi o suprimare mai puternică a produselor de intermodulaţie, eliminând o mare parte din componentele spectrale nedorite apărute în urma amestecului.

Pentru frecvenţe de până la 40 GHz, mixerul echilibrat este cel mai folosit în sistemele radar. În funcţie de tipul liniei de transmisie întâlnim diferite tipuri de cuploare hibride, cele mai folosite fiind ramificaţia în T (T-ul magic) pentru ghidurile de undă, respectiv inelul hibrid („rat race”) pentru liniile stripline şi microstrip. În figura 6.5 sunt prezentate exemple de mixere realizate pe ghid de undă, iar în figura 6.6 modul de conectare al unui inel hibrid într-un mixer echilibrat.



a) b)

Fig. 6.5 – Exemple de mixere pe ghid de undă:
a) Mixer cu o singură poartă; b) Mixer echilibrat cu T magic

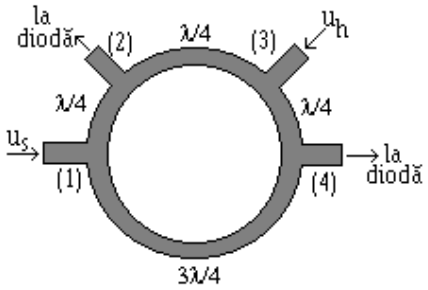


Fig. 6.6 – Inel hibrid utilizat într-un mixer

Un alt tip de mixer întâlnit în receptoarele radar este cel cu *rejecţie a frecvenţei imagine*. Semnalul ecou de FFI este divizat şi aplicat la două mixere. Semnalul de oscilator local este trecut printr-un cuplor hibrid de 90° şi apoi aplicat la cele două mixere. Ieşirile de frecvenţă intermediară ale celor două mixere sunt trimise la un alt cuplor de 90°. În acest fel semnalul util este separat la ieşire de cel pe frecvenţa imagine. Portul de ieşire corespunzător frecvenţei imagine este terminat cu o sarcină echivalentă.

6.3.4 Oscilatoare locale

Oscilatoarele locale, numite şi heterodine locale, au rolul de a genera oscilaţii întreţinute necesare conversiei de frecvenţă a semnalelor ecou. Ele trebuie să îndeplinească o serie de condiţii, şi anume:

- să aibă o bună stabilitate a frecvenţei oscilaţiilor generate;
- semnalul generat să aibă suficientă putere pentru a face legătura cu etajul amestecătorului;
- să aibă posibilitatea reglării electronice fine a frecvenţei oscilaţiilor generate.

Prima condiţie este foarte importantă în cazul radarelor coerente, ce realizează prelucrarea Doppler a semnalelor ecou pentru separarea ţintelor mobile de bruiajul pasiv. Frecvenţa oscilaţiilor generate de OL trebuie să fie foarte stabilă pentru a determina cu precizie deviaţiile de frecvenţă Doppler introduse de mişcarea ţintelor. În literatura occidentală oscilatoarele locale din acest tip de radare poartă denumirea de STALO (stable local oscillator). Într-un sistem radar, stabilitatea oscilatoarelor locale este afectată de vibraţiile produse de motoare şi ventilatoare, de riplul tensiunilor de alimentare şi de o serie de alţi factori, mai mult sau mai puţin importanţi.

Posibilitatea reglării frecvenţei este la rândul ei importantă din diverse motive. La radarele cu emiţătoare cu generare directă reglarea frecvenţei OL este necesară pentru a compensa variaţiile de frecvenţă ale tubului generator (magnetronul). În funcţie de modificările frecvenţei de emisie, un circuit special (RAF) comandă modificarea frecvenţei OL pentru a menţine constantă valoarea frecvenţei intermediare.

În cazul radarelor cu emiţătoare cu lanţ de amplificare, oscilatoarele locale sunt folosite atât la emisie cât şi la recepţie. Schimbarea frecvenţei de lucru a radarului se realizează prin modificarea frecvenţei oscilatorului local. În acest fel, simultan cu schimbarea frecvenţei de emisie se acordează şi receptorul pe noua frecvenţă. La radarele moderne, partea de oscilator local este inclusă în excitator, fiind comună atât emiţătorului cât şi receptorului. În afara semnalelor de oscilator local, necesare conversiilor de frecvenţă, excitatorul mai generează şi alte frecvenţe necesare funcţionării altor componente ale radarului (alte semnale OL, semnal de heterodină coerentă, semnale de sincronizare etc.).

Cele mai folosite tipuri de oscilatoare locale au fost, până nu demult, oscilatoarele cu *clistron reflex* sau cele cu *triode far* sau *ghindă*. Ele au fost înlocuite de oscilatoare realizate cu dispozitive semiconductoare, cum ar fi cele cu *diode Gunn* sau *tunel*. Aceste oscilatoare au o bună stabilitate a oscilaţiilor generate, dar prezintă un nivel ridicat al zgomotelor de fază.

O foarte bună stabilitate o oferă *oscilatoarele cu cuarţ*. Acestea folosesc un material piezoelectric (cristal de cuarţ) cu rol de rezonator într-un oscilator cu tranzistor. Oscilatoarele cu cuarţ sunte surse foarte stabile de oscilaţii de joasă frecvenţă (până la 180 MHz). Pentru a obţine oscilaţii de frecvenţă foarte înaltă, este folosit un *multiplicator de frecvenţă*. Acesta produce o serie de armonici ale frecvenţei de la oscilatorul pilot cu cuarţ, iar frecvenţa dorită este selectată la ieşire cu ajutorul unui filtru. Utilizarea multiplicatoarelor de frecvenţă are dezavantajul că odată cu creşterea frecvenţei, creşte foarte mult şi zgomotul de fază. Cu toate acestea, stabilitatea foarte bună a acestui tip de oscilatoare locale l-a făcut des utilizat în receptoarele radar.

În prezent, la radarele digitale, ca oscilator local se foloseşte *sintetizorul de frecvenţă* din excitator. Aceasta produce o serie de frecvenţe discrete într-o anumită bandă, selectabile prin intermediul unor comenzi. Cele mai utilizate sunt cele cu *sinteză directă*. Acestea pornesc de la un oscilator pilot foarte stabil, de obicei cu cuarţ, a cărui frecvenţă de ieşire este trecută printr-o serie de multiplicatoare / divizoare de frecvenţă, mixere şi comutatoare, pentru a obţine toate valorile de frecvenţe dorite. Dacă întreg procesul este comandat digital, el se numeşte *sinteză digitală directă (DDS)*. Principalele avantajele ale sintetizoarelor de frecvenţă sunt: comutarea rapidă a frecvenţei de ieşire, stabilitate foarte bună, zgomot de fază redus, trepte mici de modificare a frecvenţei, gabarit redus. Schimbarea rapidă a frecvenţei le fac indispensabile în

cazul radarelor cu agilitate de frecvenţă; fiind comune traseelor de emisie şi recepţie, permit modificarea rapidă a frecvenţei de recepţie în acelaşi timp cu frecvenţa de emisie.

6.3.5 Amplificatoare în frecvenţă intermediară

Amplificatorul de frecvenţă intermediară realizează amplificarea semnalelor ecou de frecvenţă intermediară de la ieşirea amestecătorului. El este format din mai multe etaje de amplificare, realizând majoritatea amplificării receptorului. Etajele de amplificare în frecvenţă intermediară determină doi parametri principali ai receptorului: amplificarea şi selectivitatea.

Amplificatorul de frecvenţă intermediară din compunerea radarelor trebuie să îndeplinească următoarele cerinţe:

- să aibă un coeficient de amplificare mare (80 ÷ 120 dB);
- banda de trecere trebuie să fie cât mai îngustă şi apropiată de forma dreptunghiulară;
- să aibă un coeficient de zgomot redus, în special primele etaje de amplificare;
- unele etaje de amplificare să permită reglarea coeficientului lor de amplificare.

Amplificatoarele de frecvenţă intermediară foloseau ca dispozitive amplificatoare tuburile electronice, în special pentodele. În prezent, ele sunt realizate cu tranzistoare bipolare sau cu circuite integrate (amplificatoare operaţionale).

Principalii parametrii ai AFI sunt valoarea frecvenţei intermediare, amplificarea şi lăţimea benzii de trecere. Banda de trecere trebuie să fie foarte îngustă, pentru a asigura selectivitatea receptorului. Creşterea selectivităţii se realizează prin dispunerea unor filtre foarte selective în etajele de frecvenţă intermediară.

Anumite semnale de putere mare pot provoca saturarea unor amplificatoare din receptor, rezultând distorsiuni ale semnalului ce afectează performanţele radarului. Amplificatoarele video sunt mult mai afectate decât cele în frecvenţă intermediară; în plus, acestea îşi revin mai lent din starea de saturaţie. Din acest motiv, în ultimele etaje de frecvenţă intermediară sunt des folosite circuite *limitatoare*. Acestea au rolul de a menţine constant nivelul semnalului la ieşire, în cazul variaţiilor puternice ale amplitudinii semnalului de intrare. De asemenea, limitatoarele previn saturarea convertoarelor analog – numerice de către semnale cu amplitudinea în afara gamei de lucru a acestora. Detectoarele de fază au nevoie de o limitare a semnalelor de intrare, pentru ca ieşirea să fie dependentă doar de faza semnalelor, nu şi de amplitudine.

6.3.6 Detectorul

Detectorul are rolul de a extrage informaţia din semnalul de frecvenţă intermediară (rol de demodulator). Detectorul de amplitudine extrage anvelopa impulsurilor de frecvenţă intermediară, rezultând la ieşire impulsuri video.

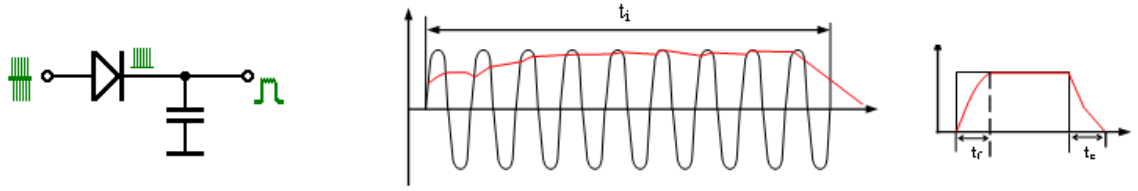


Fig. 6.7 – Detectorul

Cel mai simplu tip de detector este cel cu diodă semiconductoare, prezentat în figura 6.7. Semnalul în frecvenţă intermediară va trece prin dioda detectoare, iar la ieşirea acesteia vom avea doar alternanţele pozitive ale oscilaţiilor. Pe durata acestor alternanţe condensatorul se încarcă, iar pe timpul alternanţelor negative se descarcă pe sarcină. În acelaşi timp,

condensatorul are rol de filtru trece jos care blochează trecerea semnalelor de frecvenţă intermediară.

Detectoarele de amplitudine au marele dezavantaj că în urma detecţiei se pierd orice informaţii privind faza semnalului. Aceste informaţii sunt necesare în prelucrarea Doppler, de aceea radarele moderne folosesc alte tipuri de detectoare, cum ar fi cele de fază.

6.3.7 Amplificatoare de videofrecvenţă

Amplificatoarele de videofrecvenţă amplifică semnalul de la ieşirea detectorului până la valorea necesară dispozitivului final. Ele sunt realizate de obicei cu tranzistoare sau circuite integrate. Ultimul etaj este de obicei realizat în configuraţie repetor pe emitor.

Dacă dispozitivul final este un indicator analogic, această valoare ajunge la câteva zeci de volţi. În această situaţie etajele de amplificare video pot fi întâlnite atât în receptor cât şi în indicator. În cazul în care semnalul se aplică la un procesor numeric, valoarea tensiunii este de ordinul volţilor.

Amplificatoarele video trebuie să poată lucra într-o bandă mare de frecvenţă, de la zeci de Hz până la sute de kHz şi chiar MHz. Din acest motiv, schemele acestor amplificatoare conţin circuite de compensare la frecvenţe joase, respectiv înalte.

6.4 Circuite speciale în receptoare

După cum am menţionat anterior, receptoarele trebuie să aibă o gamă dinamică mare. Rezultă că amplificarea lor trebuie să fie neliniară, în funcţie de amplitudinea semnalelor la intrare. Aceasta se poate realiza prin utilizarea schemelor de *reglare automată a amplificării* sau a *amplificatoarelor logaritmice*.

6.4.1 Scheme de reglare automată a amplificării

Schemele de reglare a amplificării realizează reducerea gamei dinamice a semnalului prin modificarea amplificării unor etaje amplificatoare de frecvenţă intermediară în funcţie de amplitudinea semnalului de intrare.

Reglarea amplificării poate fi manuală (RMA - reglarea manuală a amplificării) sau automată (RAA - reglarea automată a amplificării). *Reglarea manuală a amplificării* permite operatorului modificarea amplificării receptorului în funcţie de afişarea ţintelor pe indicator. Se foloseşte în general la radarele analogice. De obicei reglarea manuală a amplificării se aplică pe unul până la trei etaje de amplificare în FI. *Reglarea automată a amplificării* se face automat în funcţie de mărimea semnalului de la intrarea receptorului.

Principalele scheme de reglare automată a amplificării întâlnite în receptoare sunt:

- RATA (reglarea automată în timp a amplificării);
- RAIA (reglarea automată instantanee a amplificării);
- RAZA (reglarea automată după zgomot a amplificării).

a. Reglarea automată în timp a amplificării

Această schemă realizează modificarea amplificării etajelor amplificatoare de frecvenţă intermediară în funcţie de timpul de întârziere a semnalului recepţionat (adică în funcţie de distanţa până la ţinte).

Rolul principal al RATA este de a reduce reflexiile puternice de la ţintele apropiate (în principal ţinte fixe din teren). Amplitudinea semnalelor ecou provenite de la ţinte variază puternic în funcţie de distanţa ţintei faţă de radar (invers proporţional cu distanţa la puterea a

patra). Cu ajutorul RATA semnalele puternice reflectate de la ţinte apropiate de radar sunt amplificate mai puţin, în timp ce cele slabe provenite de la ţinte aflate la distanţe mari de radar sunt amplificate mai puternic, astfel încât puterea semnalului la ieşirea receptorului să fie relativ independentă de distanţă.

RATA acţionează de obicei asupra amplificării primelor etaje de amplificatoare de frecvenţă intermediară din receptor. Circuitul RATA comandă tensiunea de alimentare a AFI, modificând amplificarea acestora în funcţie de timpul scurs de la emisia impulsului de sondaj, adică în funcţie de distanţa dintre radar şi ţinte. În figura 6.8 este reprezentată o funcţie RATA uzuală (cu roşu caracteristica RATA, iar cu verde semnalul ecou). Pe timpul emisiei, circuitul RATA reduce amplificarea receptorului la zero pentru a împiedica amplificarea oricărei scurgeri a impulsului de sondaj în traseul de recepţie. După sfârşitul impulsului de sondaj, tensiunea RATA începe să crească, mărind amplificarea receptorului odată cu creşterea distanţei. De la o anumită distanţă amplificarea devine maximă şi se păstrează la această valoare până la următorul impuls de sondaj.

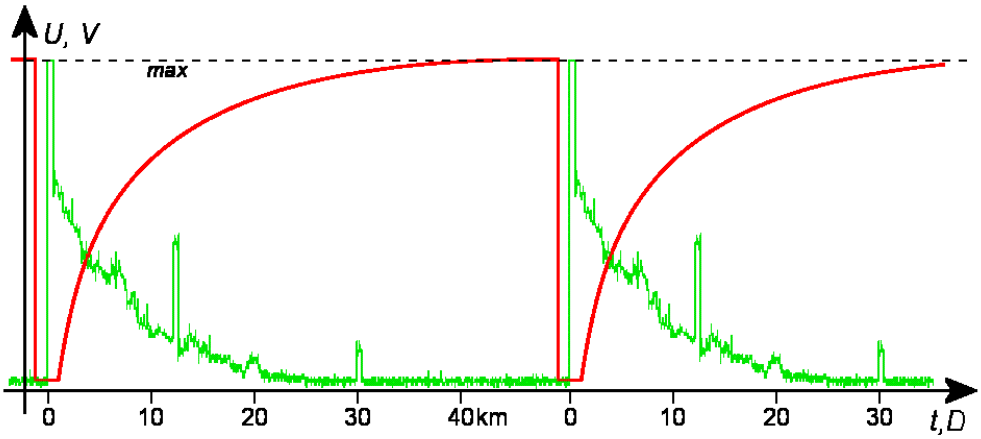


Fig. 6.8 – Caracteristica RATA (sursa: www.radartutorial.eu)

Modificarea amplificării prin metoda RATA este limitată de obicei până la o anumită distanţă (50 – 70 km). În acest fel se evită suprasaturarea receptorului datorită semnalelor foarte puternice provenite de la ţintele din apropiere, în special a celor de la ţintele fixe.

O altă modalitate de implementare a circuitelor RATA, folosită din ce în ce mai des în prezent, este de realizare a acestora cu atenuatoare comandate. La distanţe mai mici atenuarea este mai mare, ea scade în trepte odată cu creşterea distanţei, iar de la o anumită distanţă atenuarea devine nulă. Atenuatoarele sunt comandate de obicei numeric. În acest caz circuitele RATA pot fi dispuse şi în etajele de frecvenţă foarte înaltă, incluse în circuitele de protecţie ale receptorului (STC – Sensitivity Time Control).

Radarele moderne utilizează de asemenea o *reglare dinamică a amplificării*, adaptabilă în funcţie de nivelul clutter-ului. Caracteristica RATA se modifică pentru fiecare azimut, în funcţie de intensitatea clutter-ului (reflexiilor de la obiecte fixe) de pe acel azimut. În zonele de clutter puternic se utilizează şabloane RATA cu atenuare puternică, în timp ce în cele cu clutter slab se folosesc atenuări mai mici.

Un factor foarte important care influenţează caracteristica funcţiei RATA îl constituie forma diagramei de directivitate utilizată de radar. Principala problemă apare în cazul radarelor cu diagrama de tip cosecant pătrat. În acest caz, o caracteristică RATA optimă pentru unghiuri de înălţare joase afectează posibilităţile de descoperire la unghiuri mari de înălţare. Această problemă este rezolvată în cazul diagramelor multifascicul. Dacă fiecare fascicul corespunde unui canal separat de recepţie, se poate implementa câte o caracteristică RATA optimă pentru fiecare canal în parte, în funcţie de unghiul de înălţare al fasciculului. Similar, la radarele cu

diagramă tip „creion”, baleiată electronic în plan vertical, se folosesc mai multe tipuri de şabloane RATA, în funcţie de poziţia fasciculului în plan vertical.

b. Reglarea automată instantanee a amplificării

Schemele RAIA reglează instantaneu amplificarea AFI (prin modificarea tensiunii de alimentare) în funcţie de amplitudinea semnalelor ecou. Efectul RAIA constă în amplificarea puternică a semnalelor slabe, respectiv amplificarea slabă a celor puternice. La recepţia semnalele ecou de putere mică, amplificarea etajului AFI este maximă. La apariţia unor semnale puternice la intrarea receptorului, amplificarea scade brusc, evitându-se intrarea în suprasaturaţie a etajelor următoare.

Gama de reglare a RAIA este limitată de numărul de etaje AFI asupra cărora acţionează. În cazul unui singur etaj AFI, gama RAIA este limitată la aproximativ 20 dB. În cazul mai multor etaje AFI, gama de reglare poate creşte până la 40 dB.

c. Alte scheme de reglare automată a amplificării

Un alt tip de schemă de reglare automată îl reprezintă RAZA. Aceasta modifică amplificarea receptorului în funcţie de nivelul zgomotelor la intrarea receptorului.

O altă metodă de reglare a amplificării, utilizată la unele radare moderne, este cea în funcţie de harta clutter-ului (harta ţintelor fixe). Această metodă este folosită ca alternativă la creşterea atenuării RATA în zone cu clutter terestru puternic. Amplificarea este comandată prin intermediul unei hărţi digitale a clutter-ului, care determină şi memorează nivelul clutter-ului pentru fiecare celulă de distanţă. Metoda are totuşi unele limitări, putând afecta destul de puternic performanţele de prelucrare ale radarului.

6.4.2 Amplificatoare logaritmice

Amplificatorul logaritmic este un dispozitiv a cărui tensiune de ieşire (în videofrecvenţă) este proporţională cu logaritmul tensiunii de intrare (în frecvenţă intermediară).

Rolul de bază al amplificatorului logaritmic este acela de reducere a gamei dinamice a semnalului amplificat. Avantajul amplificatoarelor logaritmice este că au o gamă dinamică mare a semnalului, de 80÷100 dB, disponibilă fără limitare sau saturare. Deoarece nu au nevoie de control automat al amplificării, amplificatoarele logaritmice pot răspunde la schimbări rapide ale nivelului semnalului recepţionat fără pierderea informaţiei.

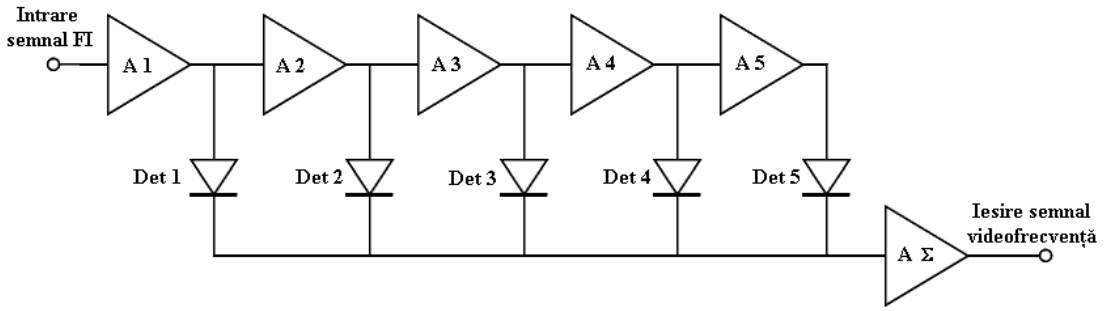


Fig. 6.9 - Schema bloc a unui amplificator - detector logaritmic

Amplificatorul logaritmic se realizează de obicei prin însumarea succesivă a tensiunilor de ieşire ale câtorva etaje de amplificare. În figura 6.9 este prezentată o schemă de amplificator - detector logaritmic. Aceasta constă dintr-un anumit număr de amplificatoare înseriate, la ieşirea

fiecărui amplificator fiind dispus câte un detector. Gama dinamică a amplificatorului logaritmic este determinată de numărul de etaje amplificatoare. Amplificarea generală a acestuia are o caracteristică logaritmică. Astfel, amplificarea depinde de amplitudinea semnalului de intrare.

Datorită dependenţei logaritmice a ieşirii funcţie de intrare, semnalele de nivel mic sunt amplificate puternic, iar cele de nivel mare sunt amplificate foarte puţin. Semnalele slabe vor fi amplificate de toate amplificatoarele din circuit. Cele puternice vor fi amplificate doar de primele etaje, până la etajul care intră în saturaţie. Semnalul de la ieşirea fiecărui amplificator este detectat; semnalele detectate se însumează în amplificatorul de ieşire. La atingerea unui anumit nivel al semnalului sumă, acesta este aplicat la ieşire; ieşirile următoarelor etaje nu mai sunt luate în considerare.

6.5 Reglarea automată a frecvenţei

În timpul funcţionării normale a unui radar, frecvenţa emiţătorului sau cea a oscilatorului local pot varia din diverse cauze, cum ar fi: fluctuaţiile tensiunii de alimentare, modificarea impedanţei antenei, variaţiile de temperatură ale anumitor componente etc.

Pentru recepţia în bune condiţii a semnalelor ecou este necesară modificarea automată a frecvenţei heterodinei în funcţie de frecvenţa emiţătorului. Banda de trecere a AFI fiind foarte îngustă, este necesar ca valoarea frecvenţei intermediare să fie menţinută la o valoare cât mai constantă. În acest scop sunt folosite schemele de *reglare automată a frecvenţei* (RAF).

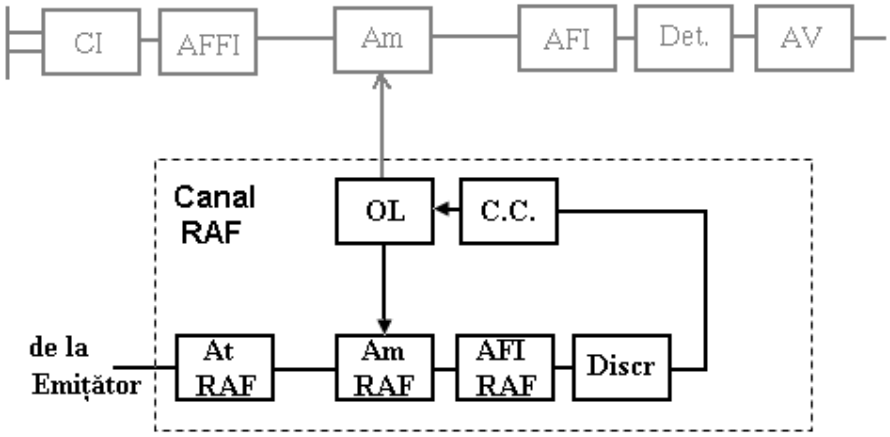


Fig. 6.10 – Schema circuitului RAF

În figura 6.10 este prezentată schema unui canal RAF dintr-un receptor superheterodină. Pentru a detecta modificarea frecvenţei emiţătorului, un eşantion din semnalul de sondaj este extras prin intermediul unui cuplor directiv, din traseul dintre emiţător şi comutatorul de antenă. La amestecătorul RAF se aplică oscilaţiile de la heterodina locală şi impulsul de sondaj atenuat de la emiţător. La ieşirea amestecătorului RAF rezultă un semnal în frecvenţă intermediară RAF, care este amplificat şi aplicat la un discriminator de frecvenţă.

Discriminatorul de frecvenţă va forma o tensiune de ieşire proporţională ca amplitudine şi polaritate cu diferenţa între frecvenţa intermediară RAF şi frecvenţa intermediară nominală a receptorului. Dacă frecvenţa intermediară RAF este egală cu frecvenţa centrală a discriminatorului, tensiunea de ieşire are valoare nulă. Frecvenţa centrală a discriminatorului este de fapt frecvenţa intermediară de referinţă a receptorului (pe care este acordat receptorul). Tensiunea de ieşire a discriminatorului este o tensiune de comandă a oscilatorului local. Circuitul de comandă determină oscilatorul să îşi modifice frecvenţa de oscilaţie până la anularea dezacordului de frecvenţă intermediară.

Comanda oscilatorului local poate fi mecanică sau electronică, în funcţie de tipul constructiv al oscilatorului local. Comanda mecanică presupune existenţa unui mecanism care modifică parametrii geometrici ai circuitului oscilant din compunerea oscilatorului, ca de exemplu o cavitate rezonantă; în acest caz circuitul de comandă este un electromotor, de obicei un motor pas cu pas. În cazul comenzii electronice, se utilizează o diodă varicap. Lăţimea benzii de acord a frecvenţei cu ajutorul circuitelor RAF este de aproximativ 5% din frecvenţa de lucru; dacă variaţia frecvenţei emiţătorului este mai mare, trebuie realizată o reacordare manuală a frecvenţei OL.

Un alt tip de circuit RAF este acela care modifică frecvenţa emiţătorului în loc de frecvenţa oscilatorului local, ca în cazul prezentat. În acest caz frecvenţa emiţătorului este reglată în funcţie de frecvenţa mult mai stabilă a oscilatorului local.

Circuitele RAF sunt caracteristice radarelor necoerente sau pseudocoerente, ce utilizează emiţătoare cu generare directă. Sistemele radar coerente nu utilizează scheme de reglare a frecvenţei, deoarece frecvenţele tuturor semnalelor din emiţător şi receptor sunt generate pornind de la o oscilaţie de referinţă, generată de un oscilator principal.

6.6 Frecvenţa imagine. Receptoare cu mai multe schimbări de frecvenţă

Dezavantajul esenţial al receptoarelor superheterodină constă în existenţa canalelor suplimentare de recepţie, adică în posibilitatea acestora de a recepţiona simultan toate semnalele care împreună cu semnalul de heterodină şi armonicile acestuia produc prin amestec semnale de frecvenţă egală cu cea intermediară.

Cel mai periculos canal suplimentar este canalul imagine. *Frecvenţa imagine* este acea frecvenţă a unui semnal parazit (interferenţă) care intră în receptor şi care la ieşirea amestecătorului va genera un semnal cu frecvenţa egală cu cea intermediară. Denumirea vine de la faptul că frecvenţa imagine este o „imagine în oglindă” a frecvenţei de recepţie faţă de frecvenţa de oscilator local. De exemplu, dacă frecvenţa semnalului ecou este $f_0=1400$ *MHz,* iar frecvenţa oscilatorului local $f_h=1325$ *MHz,* rezultă că frecvenţa intermediară este $f_i=75$ *MHz;* valoarea frecvenţei imagine va fi: $f_{imag}=1475$ *MHz.*

Există mai multe metode de eliminare a recepţiei pe frecvenţa imagine. Una din ele ar fi *micşorarea benzii de trecere* a etajelor de frecvenţă foarte înaltă (preselector şi AFFI), astfel încât frecvenţa imagine să se afle în afara acestei benzi. Utilizarea acestei metode este limitată de faptul că banda de frecvenţă a etajelor FFI trebuie să fie largă, cel puţin egală cu gama de frecvenţe de lucru a radarului (care ia valori de ordinul sutelor de MHz).

O altă modalitate de atenuare a canalului imagine este creşterea frecvenţei intermediare, astfel încât frecvenţa imagine să cadă în afara benzii de lucru a radarului. Această metodă presupune folosirea *mai multor trepte de schimbare a frecvenţei* (două sau trei). În acest caz se utilizează mai multe etaje schimbătoare de frecevnţă, deci vom avea mai multe frecvenţe de oscilator local şi mai multe frecvenţe intermediare. Prima frecvenţă intermediară este aleasă la o valoare suficient de mare încât să se elimine recepţia pe frecvenţa imagine. Următoarele valori ale frecvenţei intermediare trebuie să fie suficient de mici pentru a permite prelucrarea cu uşurinţă a semnalelor (acesta fiind chiar scopul receptorului superheterodină).

6.7 Recepţia coerentă

După cum am menţionat anterior, detectoarele de amplitudine au dezavantajul că în urma detecţiei se pierd orice informaţii privind faza semnalului, informaţii necesare în prelucrarea Doppler. Din acest motiv radarele analogice pseudo-coerente folosesc două canale de recepţie: *canalul de amplitudine* şi *canalul coerent*.

Canalul de amplitudine este cel ce foloseşte ca detector unul de amplitudine. Avantajul acestui canal este că atenuările semnalelor ecou în urma prelucrării sunt minime, fiind foarte util în descoperirea ţintelor mici sau aflate la distanţe mari de radar.

Canalul coerent se foloseşte pentru eliminarea (atenuarea) semnalelor de la ţinte fixe şi amplificarea celor de la ţintele mobile, procedeu numit *selecţia ţintelor mobile* (SŢM). Acest canal utilizează un detector de fază, semnalele de la ieşirea lui fiind prelucrate în circuitele SŢM din instalaţia de prelucrare. Amândouă tipurile de receptoare folosesc în comun traseul AFFI, amestecător, AFI.

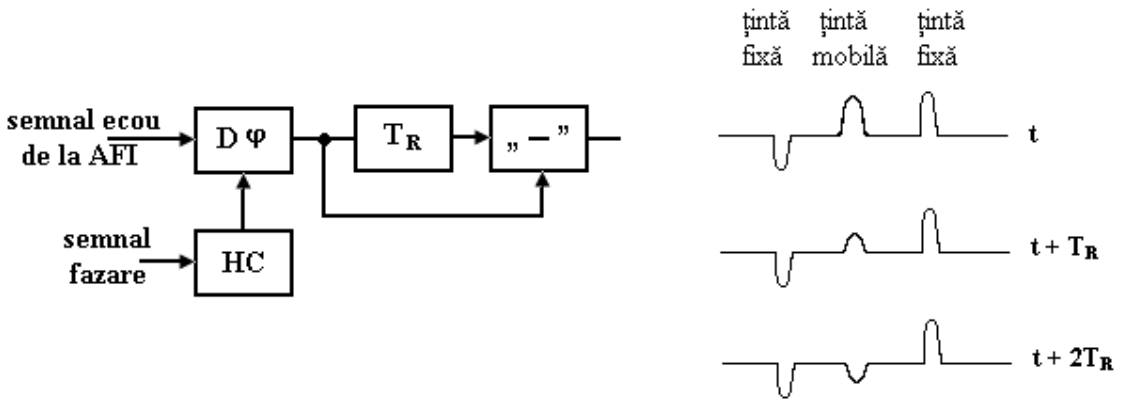


Fig. 6.11 – Canalul coerent

În figura 6.11 este prezentată schema simplificată a canalului coerent, precum şi diagramele de semnal la ieşirea detectorului de fază. Nu au fost incluse în schemă elementele comune cu canalul de amplitudine. De la ieşirea unuia din etajele de amplificare în frecvenţă intermediară (AFI), semnalul se aplică la intrarea detectorului de fază pentru prelucrarea coerentă a semnalelor ecou. Tot la detector se aplică şi un semnal de referinţă, de la o heterodină coerentă (în engleză COHO – coherent oscillator). Frecvenţa acestui semnal este egală cu frecvenţa intermediară.

Diferenţierea între ţintele fixe şi cele mobile se face cu ajutorul efectului Doppler. Semnalele reflectate de la ţinte care se mişcă în raport cu radarul prezintă o modificare a frecvenţei proporţională cu viteza ţintei; această diferenţă poartă numele de *frecvenţă Doppler*. Ţintele fixe nu modifică frecvenţa semnalului reflectat, frecvenţa lor Doppler fiind nulă.

Deoarece frecvenţa Doppler (de ordinul herţilor şi kiloherţilor) este mică în comparaţie cu frecvenţa impulsurilor de sondaj (de ordinul sutelor de megaherţi şi gigaherţilor), este mult mai simplu din punct de vedere tehnic să se realizeze o comparaţie a fazelor impulsurilor ecou. Eliminarea semnalelor provenite de la ţintele fixe se realizează prin compararea impulsurilor ecou provenite de la aceeaşi ţintă în două sau mai multe perioade de repetiţie succesive. Procedeul poartă numele de compensare după una sau mai multe perioade de repetiţie şi este principala metodă utilizată pentru selecţia ţintelor mobile. Dacă diferenţa de fază este zero, înseamnă că impulsurile provin de la o ţintă fixă şi vor fi eliminate. Dacă ţinta este mobilă, diferenţa de fază va fi diferită de zero, iar ţinta va fi afişată pe indicator.

Pentru obţinerea semnalului de referinţă necesar comparaţiei de faze în detectorul de fază, heterodina coerentă este sincronizată cu faza semnalului de sondaj. Această sincronizare se numeşte *fazare* a heterodinei coerente. Fazarea HC este necesară deoarece în cazul emiţătoarelor cu generare directă impulsurile de sondaj nu sunt coerente (au faza diferită de la impuls la impuls).

Detectorul de fază realizează o transformare a diferenţei de fază a semnalelor în diferenţă de amplitudine. La ieşirea detectorului de fază, semnalul ecou provenit de la o ţintă mobilă îşi va

modifica amplitudinea şi polaritatea la fiecare perioadă de repetiţie. Semnalul de la ţinta fixă (clutter) va avea aceeaşi amplitudine şi polaritate în fiecare perioadă de repetiţie.

Semnalul ecou este memorat (întârziat) pentru o perioadă de repetiţie şi apoi comparat în etajul de scădere cu semnalul actual (neîntârziat). Semnalul la ieşirea etajului de scădere reprezintă diferenţa dintre semnalul întârziat şi cel actual. Impulsurile provenite de la o ţintă fixă vor avea aceeaşi amplitudine şi polaritate şi se vor anula reciproc. Impulsurile de la ţintele mobile vor fi diferite şi în urma scăderii va rezulta un anumit impuls, diferit de zero. Rezultă că la ieşire vom avea doar impulsuri provenite de la ţintele mobile. Schema de compensare după o perioadă, compusă din etajul de întârziere şi cel de scădere, nu este considerată ca făcând parte din receptor, ci din sistemul de prelucrare. Am inclus-o totuşi în schemă pentru a facilita înţelegerea în ansamblu a funcţionării.

Radarele mai moderne folosesc drept detector de fază un *detector în cuadratură*, numit şi detector sincron sau demodulator I/Q. Anumite etape de prelucrare, cum ar fi compresia impulsurilor sau prelucrarea monoimpuls, necesită informaţii atât despre amplitudinea cât şi despre faza impulsurilor ecou. Detectorul în cuadratură păstrează în urma detecţiei ambele informaţii. În acest caz detecţia se realizează în paralel pe cele două componente ale semnalului, cea reală, numită componenta *în fază* (I), respectiv cea imaginară, sau componenta *în cuadratură* (Q).

În figura 6.12 este reprezentată schema bloc a unui detector în cuadratură. Semnalul ecou în frecvenţă intermediară este aplicat la două mixere, împreună cu semnalul de referinţă de la heterodina locală. Pentru a realiza detecţia separată pe cele două componente, semnalul de referinţă este trecut printr-un divizor hibrid de 90°. După filtrare, semnalele pe cele două componente sunt convertite în formă numerică şi aplicate la procesorul digital, unde suportă o serie de prelucrări, inclusiv SŢM.

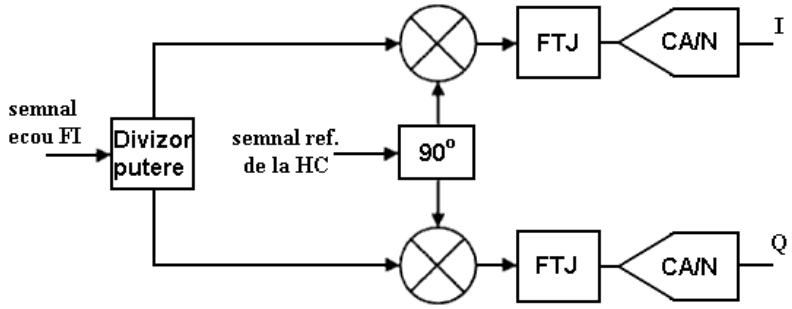


Fig. 6.12 – Detector în cuadratură

6.8 Receptoare digitale

Teoretic, un receptor digital ar fi format dintr-un convertor analog – numeric conectat direct la antenă, urmat de un procesor digital de semnal. Realizarea unui convertor analog – numeric care să aibă o gamă dinamică foarte mare şi care să lucreze cu semnale de frecvenţă foarte înaltă este departe de a putea fi obţinută la momentul actual.

Practic, un receptor digital este acel receptor care după etajele de amplificare în frecvenţă intermediară conţine un convertor analog – numeric (CA/N), prelucrarea ulterioară a semnalelor fiind făcută numeric, de un procesor digital de semnal (DSP). În plus, ca oscilator local se utilizează un sintetizor de frecvenţă comandat numeric (de obicei unul cu sinteză digitală directă). Toate comenzile necesare funcţionării receptorului, ca de exemplu comenzile pentru schema RATA, sunt la rândul lor comenzi numerice.

Observăm că receptoarele digitale păstrează o serie de elemente analogice, în special cele de frecvenţă ridicată: AFFI, amestecător, AFI.

Un exemplu de schemă simplificată a unui receptor din compunerea unui radar digital este prezentată în figura 6.13. Receptorul este cu dublă schimbare de frecvenţă, dar în practică întâlnim adesea configuraţii cu triplă schimbare de frecvenţă. La primul amestecător, semnalul de oscilator local este aplicat de la sintetizorul de frecvenţă. Frecvenţa de la ieşirea sintetizorului este variabilă, în funcţie de comanda aplicată acestuia. Prin modificarea frecvenţei sintetizorului se asigură acordul receptorului pe frecvenţa dorită. Frecvenţa celui de-al doilea oscilator local este fixă.

Prima frecvenţă intermediară are o valoare mare, de câteva sute de MHz, în scopul eliminării interferenţelor pe frecvenţa imagine. Ultima frecvenţă intermediară (în cazul nostru a doua) este aleasă la o valoare mică, de câţiva megaherţi, pentru a permite funcţionarea convertorului analog / numeric. Filtrele trece bandă sunt centrate pe frecvenţa intermediară corespunzătoare, asigurând selectivitatea receptorului.

Convertorul transformă semnalul din analogic în digital. În acest scop foloseşte un semnal de tact. În urma conversiei se păstrează toate informaţiile conţinute de semnal, inclusiv cele referitoare la faza acestuia.

De la ieşirea convertorului analog / numeric, datele digitale sunt trimise la procesorul digital de semnal. Acesta realizează întreaga prelucrare a semnalelor; prelucrarea se execută în timp real.

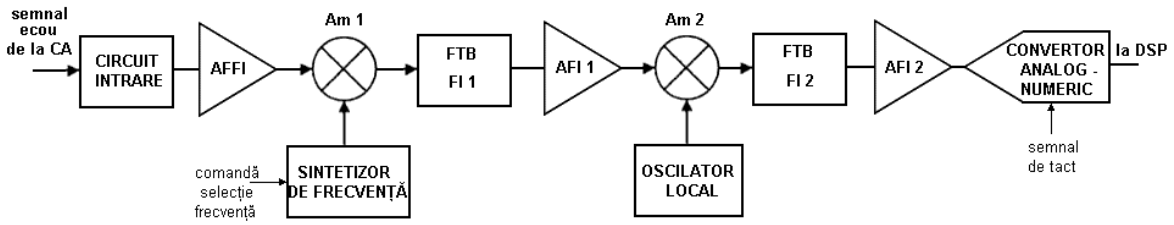


Fig. 6.13 – Schema bloc simplificată a unui receptor digital

6.8.1 Convertoare analog - numerice

Convertoarele analog / numerice realizează conversia semnalelor analogice în date numerice, rezultând la ieşire o reprezentare binară a semnalului de la intrare. Principalii parametri ai acestora sunt gama dinamică a semnalului la intrare, numărul de biţi pe care este reprezentat semnalul la ieşire şi rata de eşantionare. Numărul de biţi caracterizează rezoluţia convertorului. La alegerea convertorului trebuie realizat un compromis între rezoluţie şi rata de eşantionare, cele două fiind invers dependente.

Conversia se realizează în trei etape: eşantionarea, cuantizarea şi codificarea. Doarece semnalul analogic este o mărime continuă în timp, este necesară împărţirea timpului în intervale foarte scurte, proces numit *eşantionare*. Inversul duratei unui interval reprezintă rata sau frecvenţa de eşantionare. Pentru realizarea eşantionării, convertorul are nevoie de un semnal de tact extern. Cu cât rata de eşantionare este mai mare, cu atât este reprodus mai fidel semnalul la ieşire. Alegerea ratei de eşantionare se face pe baza condiţiei Shannon-Nyquist; conform acesteia valoarea ratei de eşantionare trebuie să fie de două ori mai mare decât cea mai mare frecvenţă a semnalului.

Următoarea etapă este *cuantizarea*. Aceasta constă în divizarea intervalului de variaţie a amplitudinii semnalului (tensiune, curent) într-un număr determinat de trepte de amplitudine egală, numite cuante, pentru a exprima valoarea analogică sub formă numerică. Ultima etapă este *codificarea*, care presupune transformarea valorii amplitudinii semnalului pe fiecare interval de eşantionare într-un cuvânt numeric. Convertorul compară amplitudinea fiecărui eşantion al

semnalului cu o succesiune crescătoare de praguri de valoare cunoscută. La ieşire convertorul va trimite un cuvânt binar corespunzător pragului cel mai apropiat de amplitudinea semnalului.

În practică sunt utilizate mai multe forme de reprezentare a semnalului. Unul dintre acestea este cel ce foloseşte *bitul de semn*. Astfel, primul bit (MSB – most significant bit) reprezintă codificarea polarităţii semnalului; dacă amplitudinea e pozitivă bitul ia valoarea 0, iar dacă e negativă bitul este 1. O altă metodă constă în reprezentarea semnalului cu amplitudinea maxim negativă printr-un cuvânt format din zerouri, respectiv a amplitudinii maxim pozitive cu unul format doar din 1.

6.8.2 Introducere în prelucrarea semnalelor de radiolocaţie

După cum am văzut în primul capitol, înainte de a fi afişate pe indicator semnalele ecou trebuiesc prelucrate de către instalaţia de prelucrare sau procesorul radarului. În acest subcapitol vom face o scurtă introducere în prelucrarea semnalelor, tratarea detaliată urmând a fi făcută într-o nouă ediţie sau într-un alt volum al acestei lucrări.

Prelucrarea semanalelor radar reprezintă operaţia prin care informaţiile dorite despre ţinte sunt extrase din semnalul recepţionat. Funcţiile principale ale oricărui sistem de prelucrare sunt *detecţia* semnalului de la ţintă în mediul contaminat cu perturbaţii şi *extragerea informaţiilor* despre ţinte conţinute în semnalul recepţionat.

Prelucrarea poate fi *analogică* sau *digitală*. La radarele digitale moderne, prelucrarea este în totalitate numerică, realizată de o instalaţie dedicată, numită *procesor de semnale şi date*. Receptoarele actuale conţin doar etajele de frecvenţă foarte înaltă urmate de câteva etaje coborâtoare de frecvenţă (figura 6.13). La ieşirea receptorului, semnalul de frecvenţă intermediară este convertit din analogic în digital şi aplicat la procesorul digital de semnal (DSP) pentru prelucrarea numerică.

Principalele procese de prelucrare realizate de procesor sunt:

- eliminarea perturbaţiilor / bruiajului (inclusiv prelucrarea coerentă);
- detecţia automată a ţintelor;
- determinarea coordonatelor ţintelor;
- realizarea traiectelor şi urmărirea ţintelor.

Prelucrarea semnalelor se realizează în două mari etape: prelucrarea *primară*, respectiv *secundară* a informaţiilor. Prima etapă presupune prelucrarea informaţiilor de radiolocaţie în decursul unei singure perioade de explorare a spaţiului aerian. În această etapă se realizează: separarea semnalului util pe fondul perturbaţiilor, detecţia automată a ţintelor (stabilirea existenţei sau lipsei ţintei în zona de observare), măsurarea coordonatelor ţintei (distanţă, azimut şi eventual înălţime). A doua etapă se realizează prin analiza informaţiilor obţinute în mai multe perioade de observare. Principalele funcţii care se realizează în etapa de prelucrare secundară sunt: înlăturarea semnalelor false, micşorarea erorilor de determinare a coordonatelor, obţinerea unor informaţii suplimentare despre ţinte (viteza, direcţia de zbor), generarea traiectelor.

În cazul radarelor mai vechi, o parte din prelucrare se realiza analogic, în receptor. Acesta includea o serie de circuite cu rol dedicat de prelucrare a semnalelor, ca de exemplu filtrul adaptat, compresia impulsurilor sau detecţia coerentă.

Radarele analogice nu conţin o instalaţie de prelucrare propriuzisă. Receptorul execută o prelucrare analogică a semnalelor, iar acestea sunt aplicate direct la indicatoarele analogice pentru afişare. Detecţia ţintelor şi determinarea coordonatelor se realizează manual de către operator. Totuşi, radarele analogice conţin diferite instalaţii de protecţie împotriva bruiajului, care au rolul de a elimina diferitele tipuri de perturbaţii prezente în semnalul recepţionat.

O soluţie folosită foarte des a fost introducerea la radarele analogice a extractoarelor de date radar. Principalele funcţii ale extractoarelor sunt: detecţia ţintei, determinarea coordonatelor şi formarea traiectelor şi urmărirea ţintei (tracking). Semnalul analogic de videofrecvenţă de la

ieşirea receptorului este convertit în digital şi aplicat unui procesor digital de semnal care realizează diferitele funcţii de prelucrare. Afişarea informaţiilor se realizează prin intermediul unui calculator personal.

BIBLIOGRAFIE

[1] *** , *Bazele radiotehnicii şi radiolocaţiei, instalaţii de radioemisie şi radiorecepţie*, Ed. Militară, Bucureşti, 1971;

[2] *** , *Manualul specialistului de radiolocaţie*, Ed. Militară, Bucureşti, 1971;

[3] Ardelean, G., *Principii şi sisteme de radiolocaţie, partea I, Principiile radiolocaţiei*, Academia Militară, Bucureşti, 1983;

[4] Barton, D. K., Leonov, S. A., *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House, Boston, London, 1998;

[5] Cojoc, D., *Receptoare de frecvenţă foarte înaltă*, Ed. Militară, Bucureşti, 1987;

[6] Cojoc, D., *Instalaţii de recepţie (proiectare)*, Ed. Academiei Militare, Bucureşti, 1970;

[7] Gracev, V. A., Zavealov, V. A., *Bazele tehnicii de radiolocaţie*, Ed. Militară, Bucureşti, 1961;

[8] Lojewski, G., *Dispozitive şi circuite de microunde*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 2005;

[9] Marinescu, B., *Dispozitive şi circuite de microunde*, 2008;

[10] Mamut, P., *Radiotehnica generală*, Academia Militară, Bucureşti, 1971;

[11] Muraru, A., *Detecţia radar automată*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 2001;

[12] Nicolau, E., *Antene şi propagare*, Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1982;

[13] Rulea, G., *Radiolocaţie*, Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1980;

[14] Rulea, G., *Tehnica frecvenţelor foarte înalte*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1966;

[15] Skolnik, M. I., *Introduction to radar systems, third edition*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2001.

[16] Skolnik, M. I., *Radar Handbook, Third Edition,* McGraw-Hill, 2008;

[17] www.radartutorial.eu