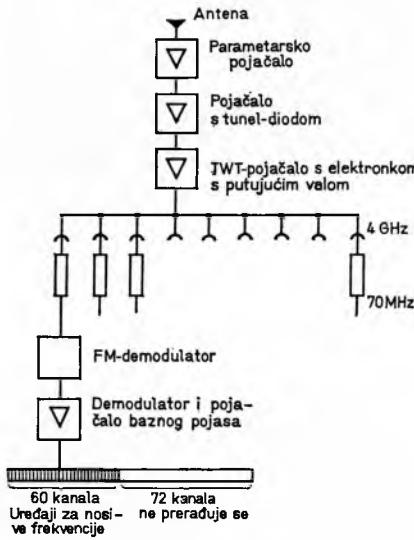


Isto izraženo decibelima u odnosu prema referentnoj snazi 1 W, slično kao pri izrazima (9) i (11), glasi:

$$P_C = (P_T + G_T + G_R - L) \text{ dB.} \quad (12)$$

Kvalitet prijema i veze bit će funkcija odnosa signal/šum. U taj odnos moraju biti uključeni svi izvori šuma (kozmički šum, šum antene i valovoda i šum prijemnika) reducirani na ulazu u prijemnik. Snaga šuma P_n dana izrazom (11) može se, kako je to ranije izloženo, karakterizirati i temperaturom šuma T_s . Odnos između temperature i faktora šuma dan je jednadžbom (10).



Sl. 10. Blok-sHEMA uređaja u zemaljskoj prijemnoj stanicI

Koliko treba da iznosi stvarni odnos signal/šum, koji je jedna od osnovnih karakteristika veze, ovisit će o signalu koji se prenosi i o načinu na koji se signal privodi nosiocu, no u svakom slučaju odnos signal/šum, u visokofrekvenčnom pojasu, bit će ishodišna točka razmatranja. Ovaj se odnos, ako je dan logaritamski (decibelima), označava sa $(P_c - P_n)$. U upotrebi je i odnos $(P_c - T)$, dakle logaritamski izražen odnos primljene snage i temperaturu šuma sistema ($T = 10 \log T_s$) na razini za koju se taj odnos daje.

Sposobnost zemaljske stanice u smislu ispunjenja nekih minimalnih zahtjeva uobičajeno je davati logaritamskim odnosom ($G - T$). ICSC (prema engl. Interim Communications Satellite Committee) traži, npr., za zemaljske stanice koje rade u sistemu INTELSAT

$$(G - T) \geq \left(40,7 + 20 \log \frac{f}{4} \right) \text{ dB,}$$

$$G \geq \left(57 + 20 \log \frac{f}{4} \right) \text{ dB,}$$

gdje je f frekvencija nosioca u gigahercima (3,7...4,2 GHz). Vrijednosti se daju za kut elevacije od 5° , vedro vrijeme i lagan vjetar. Odnos $(G - T)$ ima važnu ulogu, a može se u traženom iznosu postići velikim pojačanjem G ili malom temperaturom šuma T_s . Vrijednosti koje traži INTELSAT odgovaraju, uz $f = 4 \text{ GHz}$, temperaturi sistema od $42,7 \text{ K}$, odnosno dobitku antena $G = 57 \text{ dB}$.

Iz izraza (9), (11) i (12) može se lako naći odnos

$$(P_c - P_n) = [(P_c - T) - 10 \log B + 168,6] \text{ dB,} \quad (13)$$

a iz izraza (12) odnos

$$(P_c - T) = [(P_T + G_T) + (G_R - T) - L] \text{ dB} \quad (14)$$

kao osnovu za traženje glavnih veličina koje ulaze u bilansu veza.

Primjena ovih zahtjeva može se učiti na jednom od mogućih primjera. Syncrom 3 bio je komunikacijski satelit koji je 1964 posredovan u TV-prijenosu Olimpijskih igara iz Tokija. Za relaciju Zemlja-satelit osnovni parametri uređaja bili su: frekvencija $7,359 \text{ GHz}$, snaga odašiljača umanjena za gubitke u valovodu (P_T) 8 kW , tj. $P_T = 39 \text{ dB}$ u odnosu prema referentnoj snazi 1 W, dobitak odašiljačke antene (G_T) $54,3 \text{ dB}$, dobitak prijemne antene (G_R) $0,0 \text{ dB}$, gubici

propagacije (L) i dodatna atmosferska apsorpcija $202,6 \text{ dB}$, temperatura šuma sistema na satelitu 2900 K , tj. $T = 34,6 \text{ dB}$, širina frekvenčnog pojasa (B) 10 MHz , tj. $10,0 \text{ dB}$ prema referentnoj frekvenčnosti 1 Hz .

Prema jedn. (14) je odnos $(P_c - T)$, u odnosu prema osnovnoj snazi 1 W i osnovnoj temperaturi 1 K, $(P_c - T) = [(39 + 54,3) + (0 - 34,6) - 202,6] = = -143,9 \text{ dB}$. Iz toga i (13) slijedi: $(P_c - P_n) = -143,9 - 10 + 168 = 14,7 \text{ dB}$.

Ovaj odnos signal/šum dan je kao odnos u radiofrekvenčnom području. Demodulirani signal, dokle signal koji dolazi do korisnika, može biti znatno bolji. Ponderacija i primjena frekvenčne modulacije mogu znatno poboljšati odnos signal/šum ako odnos izračunat kako je gore prikazano prelazi vrijednost koja se naziva pragom, a nešto je iznad 10 dB . U prikazanom primjeru, uz prijenos televizijskog signala u sistemu 525 linija, stvarni odnos signal/šum primljenog signala bio je $45,7 \text{ dB}$. ($20,8 \text{ dB}$ pridonjela je primjena frekvenčne modulacije, a $10,2 \text{ dB}$ ponderacija.)

Komunikacijski sateliti iz serije INTELSAT III imaju snagu odašiljača $10,7 \text{ dB}$ u odnosu prema referentnoj snazi 1 W i dobitak antene $13,0 \text{ dB}$. Uz te uvjete i gubitke u valovodu $1,2 \text{ dB}$, gustoća toka snage je na površini Zemlje $0,112 \cdot 10^{-13} \text{ W/m}^2$ ili $-139,5 \text{ dB}$ u odnosu prema referentnoj gustoći 1 W/m^2 , odn. jakost polja $2,06 \mu\text{V/m}$ ili $6,26 \text{ dB}$ u odnosu prema $1 \mu\text{V/m}$.

Radiodifuzijski sateliti u frekvenčnim područjima $2,5 \text{ GHz}$ i 12 GHz imali bi, uz primjenu frekvenčne modulacije i otvor snopa $1,4^\circ$, snage odašiljača 40 W ili 16 dB , odn. 500 W ili 27 dB u odnosu prema referentnoj snazi 1 W. Pripadne gustoće toka snage bile bi, uz dobitak odašiljačke antene od 37 dB , $0,126 \cdot 10^{-10} \text{ W/m}^2$ ili -109 dB , odn. $0,159 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$ ili -98 dB u odnosu prema referentnoj gustoći 1 W/m^2 . Tome odgovaraju jakosti polja $36,76 \text{ dB}$, odn. $47,76 \text{ dB}$, u odnosu prema $1 \mu\text{V/m}$.

Prognoze o daljem razvoju satelitskih komunikacija treba praviti odvojeno za daleke satelitske veze, za bliske (regionalne i nacionalne) satelitske veze i za satelite veće zračene snage koji služe prijenosu televizijskog i radio-programa.

Satelitski komunikacijski sistemi za daleke veze, preko kojih se već danas odvijaju dvije trećine svih dalekih veza, imaju najviše izgleda na daljinu razvoja, jer su rentabilni i jer još uvijek postoji tendencija povećanja tog prijenosa, prvenstveno u pogledu telefonskih veza, izmijene televizijskih programa i prijenosa podataka. Stoga se već i sada radi na proširivanju tog sistema. Međutim, budući da zemaljske stанице i sateliti predstavljaju velike investicije, za sada se ne pomišlja na znatnije povećanje pristupa, tj. na znatnije povećanje njihova broja, niti, s druge strane, na prijelaz sa sadašnjeg frekvenčnog područja ($6/4 \text{ GHz}$), za koji su svi uređaji izrađeni, na višu frekvenciju ($14/11 \text{ GHz}$). Postoji tendencija da se do kraja iskoriste postojeće instalacije i mogućnosti. Stoga će se vjerojatno preći na višestruko iskoristavanje istih frekvencija (engl. frequency re-use) na taj način što bi se emisije na istim frekvenčnjama jedne od drugih odvajale užim snopovima i različitim polarizacijom. U pogledu samih satelita, ne predviđa se u daljoj budućnosti prelazak na još veći broj malenih satelita, već primjena manjeg broja golemih satelita.

Regionalni i nacionalni satelitski sistemi koji bi imali isti zadatci, kao i sistemi za daleke veze, samo unutar granica pojedinih zemalja ili regija, imaju lošiju perspektivu. Troškovi za uspostavu takvih sistema isti su kao za daleke veze. Budući da u većini zemalja već postoje razgranate telekomunikacijske mreže preko kojih se prijenos informacija može obaviti jeftinije, primjena takvih satelitskih veza nije još rentabilna. Međutim, u više se država ipak već danas razmišlja o uvođenju takvih satelitskih veza koje bi služile za prijenos telefonskih razgovora, prijenos podataka i prijenos modulacijskog signala za radio- i televizijske programe, i to na udaljenosti veće od 800 km .

Sateliti s odašiljačima veće snage trebalo bi da omoguće prijem njihova prijenosa i s najmanjim antenama. Međutim, njihova realizacija ovisi o rješenju više problema, prvenstveno problema napajanja, koji do sada još nije na zadovoljavajući način riješen. Za tu vrstu satelitskih veza također postoji još interes. One bi služile za prijenos televizijskih programa, za prijenos telefonije uz prijenos slike govornika, za prijenos podataka i slično. Ti bi sateliti radili s mnogostrukim pristupom.

Prava era satelitskih komunikacija nastupit će, međutim, tek onda kad bude moguće uz male troškove vršiti njihovo opsluživanje, servisiranje i održavanje izravno u njihovoj orbiti, tj. u prostoru.

LIT.: G. E. Mueller, E. R. Spangler, Communication satellites, New York 1964. — K. W. Gatland, Telecommunication satellites, London 1964. — F. Vilbig, Kommerzielle Satelliten, München 1969. — R. Galic, Komunikacija satelitima, Zagreb 1971.

R. Galic

RADARSKI SUSTAVI

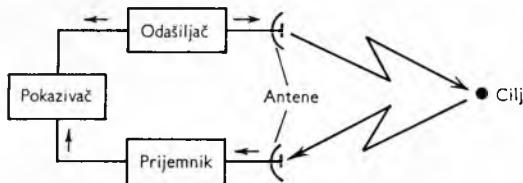
Riječ Radar je kratica engleskog naziva Radio Detection And Ranging, otkrivanje (objekta) i mjerjenje udaljenosti radio-valovima. Tim je nazivom već definirana osnovna namjena radarskih sustava.

Razvoj radara, koji radi na principu refleksije radio-valova, počeo je u USA 1934, u Velikoj Britaniji 1935, a u Njemačkoj 1936. Prvim radarem opremljen je 1938 francuski transatlantik „Normandie“, a 1939 britanski krstić „Rodney“ i krstarica „Sheffield“. Uoči drugog svjetskog rata sve su strane intenzivno radile na razvoju radara za osmatranje i ništanjanje. Prvi su radari radili na vrlo niskim frekvenčnjama ($\sim 25 \text{ MHz}$) i imali stoga goleme antenske sisteme. Postepeno se prelazilo na višu frekvenčnost. Međutim, tek izum magnetrona s rezonatorima (Randall i Boot 1940) unio je pravni prevrat u radarsku tehniku i omogućio primjenu radara u valnom području S i X (decimetarskom i centimetarskom). Na svršetak drugog svjetskog rata postojao je niz dobro upotrebivih radara različite namjene. U razdoblju od drugog svjetskog rata naovamo svi su tipovi radara znatno usavršeni, a izvršena je i zamjena elektroničkih tranzistorima i drugim poluvodičkim elementima. Danas se primjenjuje niz različitih vrsta radara koji služe za civilne i vojne potrebe. Najznačajniji tipovi među njima opisani su u ovoj glavi članku o električnim uređajima i sistemima.

Princip rada radarskih sustava

Osnovni je zadatak radarskog sustava pretraživanje određenog prostora i utvrđivanje da li u tom prostoru postoji neki cilj, i, ako postoji, koje su mu karakteristike.

Radar s pasivnim odjekom. Da bi se dobili podaci o cilju, odašilje se obično vrlo uski snop elektromagnetske energije u prostor. Kad taj snop nađe na bilo kakvu prepreku, dio se energije reflektira i враћa u prijemnik radara, gdje se detektira i dalje obrađuje. Snop se po unaprijed utvrđenom zakonu zakreće i na taj način osmatra željeni prostor. Cijeli postupak se u većini slučajeva ciklički ponavlja, što povećava vjerojatnost donošenja ispravnog zaključka o postojanju cilja. Takav je sustav shematski prikazan na sl. 1.



Sl. 1. Shematski prikaz radara s pasivnim odjekom

Klasična radarska jednadžba za idealni sustav s pasivnim odjekom daje snagu P_p na ulazu prijemnika i glasi:

$$P_p = \frac{P_0 g_0 g_p \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

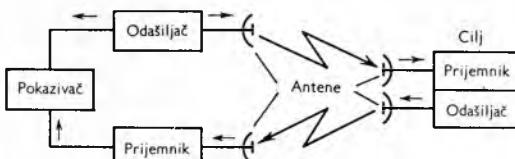
gdje je P_0 snaga odašiljača radara, g_0 dobitak odašiljačke antene radara, g_p dobitak prijemne antene radara, λ valna duljina elektromagnetskog zračenja, σ efektivna refleksiona površina cilja i R udaljenost cilja od antene radara.

Radar s aktivnim odjekom (sl. 2) ima na cilju prijemnik koji registriše odaslanu signal. Ovaj signal aktivira odašiljač cilja, te taj emitira elektromagnetski val natrag u smjeru radara. Uredaj na cilju kod ovakvog sustava naziva se *odgovarač*. Refleksiona svojstva cilja sada nemaju utjecaja na veličinu povratnog signala, jer je on određen snagom odašiljača odgovarača. Prema tome, sustav s aktivnim odjekom omogućava sigurnije određivanje cilja na velikim udaljenostima. Osim toga, povratnom signalu sa cilja može se dodati posebna šifra za raspoznavanje, što olakšava npr. praćenje i vodenje većeg broja aviona u civilnom zrakoplovstvu, a u armiji služi za razlikovanje vlastitog od neprijateljskog aviona, rakete, broda i sl.

Radarska jednadžba ima za sustav s aktivnim odjekom nešto drugačiji oblik nego za sustav s pasivnim odjekom; ona glasi:

$$P_p = \frac{P_0 g_0 g_p \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

gdje je P_0 snaga odašiljača odgovarača, g_0 dobitak odašiljačke antene odgovarača, g_p dobitak prijemne antene radara, λ valna duljina i R udaljenost antene odgovarača od antene radara.



Sl. 2. Shematski prikaz radara s aktivnim odjekom

Signal odjeka. Većina radarskih sustava odašilje slijed snažnih kratkotrajnih visokofrekventnih impulsa (sl. 3 a). Signali odjeka reprodukcija su odaslanih impulsa, s time da su vremenski pomaknuti za interval t_k , koji odgovara preväljenom putu od antene do cilja i natrag (sl. 3 b, c), a iznosi $t_k = 2R/c$, gdje je R udaljenost od radarske antene do cilja, a c brzina širenja elektromagnetskog vala.

Ako se cilj giba, frekvencija odaslanog i primljenog signala razlikuje se za tzv. *Dopplerov pomak* koji ovisi o radikalnoj brzini

cilja u odnosu prema anteni radara. On iznosi

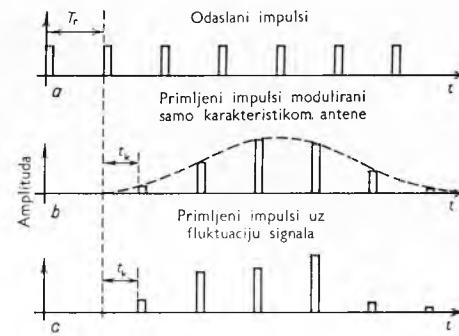
$$f_d = \frac{2v_R}{c} \cdot f_0,$$

gdje je f_0 frekvencija odašiljača radara, a v_R radikalna brzina cilja.

Promjena frekvencije primljenog signala služi za razdvajanje pokretnih od nepokretnih ciljeva, što se naročito iskorištava kod radara za praćenje aviona.

Amplituda signala odjeka ovisi o dimenzijama i obliku cilja, tj. o tzv. refleksionej površini. Kako ciljevi redovito nisu statički, a postoje i nepravilnosti u širenju elektromagnetskog vala u atmosferi, amplitude su odjeka podložne fluktacijama (sl. 3 c). Osim toga, glavna latica radarske antene, koja se zakreće u prostoru, zbog svog oblika modulira i slijed odašiljačkih impulsa i slijed impulsu odjeka, pa je primljeni signal amplitudno moduliran karakteristikom zračenja antene (sl. 3 b).

Frekvencija radarskih odašiljača ovisi o željenim karakteristikama radara i o trenutnom stanju tehnologije. U početku su konstruktori radara bili prisiljeni raditi na nižim frekvencijama jer nisu postojale komponente i sklopovi za više frekvencije (v. Elektronika, mikrovalna tehnika, str. 575). Tako se tokom drugog svjetskog rata upotrebljavala frekvencija od samo 25 MHz za niz radara duž obale Engleske koji su služili za pravovremeno upozorenje na opasnost od napada iz zraka. To je preniska frekvencija za moderne radare, jer je uz razumne dimenzije antene i tako nisku frekvenciju kutna pogreška suviše velika, a razabirljivost sitnih detalja suviše slaba. Stoga je donja granica frekvencije danas u području od nekoliko stotina megaherca, a gornja granica seže do nekoliko desetaka gigaherca, s time da se s napretkom tehnologije stalno povisuje.



Sl. 3. Shematski prikaz radarskih impulsa: a odaslatih, b primljenih, c primljenih uz fluktuirajući signal

Odašiljačke frekvencije koje se primjenjuju u radarima grupirane su u opsegove i označavaju se često posebnim slovčanim simbolima prema tabl. 1. Te se oznake danas susreću u većini zemalja, a potječe još iz drugog svjetskog rata, kad su se upotrebljavale u američkoj armiji.

Radarski pokazivači

Najčešći i najjednostavniji način otkrivanja ciljeva zasniva se na promatranju signala odjeka na katodnoj cijevi pokazivača. Kako je položaj cilja u prostoru određen trima koordinatama, a zaslon katodne cijevi je dvodimenzionalan, za ciljeve u zraku

Tabelica 1
SLOVČANI SIMBOLI ZA OZNAČAVANJE ODAŠILJAČKIH RADARSKIH FREKVENCIJSKIH OPSEGVA

Simbol	Opseg frekvencija	Dodatačni nazivi
UHF	od 300 do 1000 MHz	
L	od 1000 do 2000 MHz	
S	od 2000 do 4000 MHz	10-centimetarski opseg
C	od 4000 do 8000 MHz	
X	od 8000 do 12500 MHz	3-centimetarski opseg
K _u	od 12,5 do 18 GHz	
K	od 18 do 26,5 GHz	
K _a	iznad 26,5 GHz	milimetarski opseg

potrebne su ili dvije katodne cijevi ili jedna podijeljena na dva polja, kako bi se prikazale sve tri koordinate. Radarom je moguće odrediti polarne koordinate cilja, dakle: udaljenost, azimut i elevaciju, ali na pokazivaču se može prikazati po potrebi i visina, koja se dobije preračunavanjem iz polarnih koordinata.



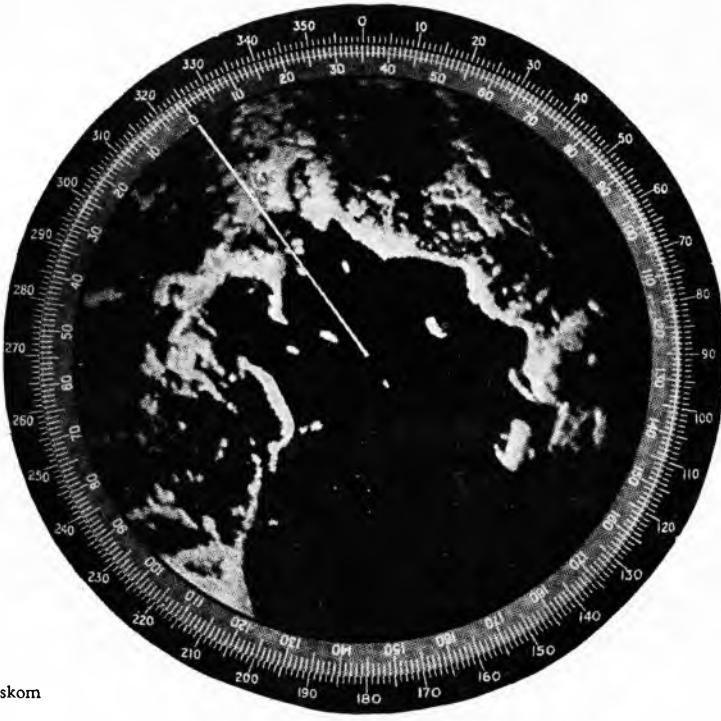
Sl. 4. Slika istog morskog predjela na geografskoj karti (lijevo) i na panoramskom pokazivaču radara (desno)

Panoramski pokazivač (PPI, kratica engl. naziva *Plan Position Indicator*, pokazivač koji pokazuje poziciju kao na karti) ima najširu primjenu. Na njemu se očitava azimut (ili pramčani kut) i udaljenost cilja u polarnim koordinatama. Elektronska zraka na katodnoj cijevi tog pokazivača krne od središta u radijalnom smjeru u trenutku kad antena emitira visokofrekventni impuls. Udaljenost zrake od središta u svakom je trenutku proporcionalna putu što ga je prevadio visokofrekventni impuls u prostoru. Smjer odgovara azimutu ako je pokazivač orijentiran prema pravom sjeveru, a njegova zraka rotira sinhrono i u fazi s radarskom rotirajućom antenom. Cilj se na panoramskom pokazivaču pojavljuje kao svjetla mrlja, jer je intenzitet elektronskog mlaza u katodnoj cijevi upravljan impulsom jeke.



Sl. 5. Radarski panoramski pokazivači u jednoj područnoj kontroli letenja (Marconi Co., Chelmsford, Engleska)

Sl. 4 pokazuje (desno) kako izgleda na ekranu radarskog pokazivača slika morskog predjela prikazanog na geografskoj karti lijevo. Pokazivač ima nepomične kalibracione prstenove (svjetle krugove na katodnoj cijevi), koji označavaju fiksne udaljenosti, npr. 5, 10, 15 milja, tako da se može približno odrediti udaljenost cilja.

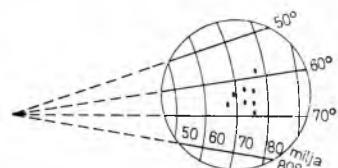


U sredini ekran je središte radarskog polja, a u okolini su prikazani različiti morski objekti i lokacije. Mrlje su koncentrične krugove u kojima se mijenja intenzitet svjetlosti, ovisno o udaljenosti cilja. Osim mrlja, na ekranu su i različiti simboli i linije za navigaciju i kontrolu.

Da bi se rastegnula pojedina područja na pokazivaču, primjenjuje se ekscentrično prikazivanje (sl. 6) pri kojem položaj radara nije više u centru katodne cijevi, nego izvan nje. Kad se želi dobiti precizna očitanja bliskih ciljeva, otklanjanje se elektronske zrake u radijalnom smjeru vrši nelinearno, s time da se, npr., područje do 5 milja razvuče, a ostali dio područja sabije. Tako se mogu opaziti i daleki ciljevi, no određivanje njihovog položaja nije precizno. Postoji i obratna mogućnost: da se sabije bliže područje a razvuče daleko.

Kad se radar nalazi na objektu koji se giba, npr. brodu, na panoramskom se pokazivaču svi ciljevi pomiču u odnosu prema brodu. Ciljevi koji miruju, npr. obala, u tom će se slučaju takoder gibati na ekranu katodne cijevi. Da bi se dobilo stvarno gibanje pojedinih ciljeva, dodana su nekim radarama računala koja uzimaju u obzir brzinu i smjer gibanja broda. U tom slučaju kontura obale miruje a ishodište elektronske zrake, koja zapravo predstavlja antenu radara, više ne miruje u središtu katodne cijevi, nego se pomiče kako se brod giba.

Pokazivač daljine i visine (RHI, kratica od engl. *Range and Height Indicator*) upotrebljava se pored panoramskog pokazivača pri praćenju i vođenju zrakoplova. S obzirom na to da je visina mnogo manja od horizontalne daljine, osim u neposrednoj blizini radara, uzimaju se različita mjerila za daljinu i visinu. Budući da se radarom primarno određuje radijalna udaljenost r i elevacija α , na katodnoj je cijevi apscisa proporcionalna ve-



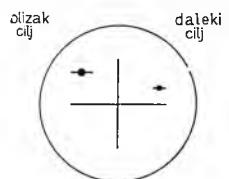
Sl. 6. Ekscentrično prikazivanje na panoramskom pokazivaču

ličini $x = r \cdot \cos \alpha$, a ordinata veličini $y = r \cdot \sin \alpha$, s time da je mjerilo u vertikalnom smjeru razvučeno. Kako se za manje elevacione kutove može upotrijebiti aproksimacija $\cos \alpha \approx 1$ i $\sin \alpha \approx \alpha$, često se primjenjuju koordinate $x = r$ i $y = r \alpha$. Veličina cilja na katodnoj cijevi ovisna je o kutu usmjerenosti antene, dakle o konstantnom kutu. Dimenzija svjetle mrlje prema tome je proporcionalna udaljenosti, tako da se na malim udaljenostima cilj pojavljuje kao sitna točka, što smanjuje razabiljivost (sl. 7).

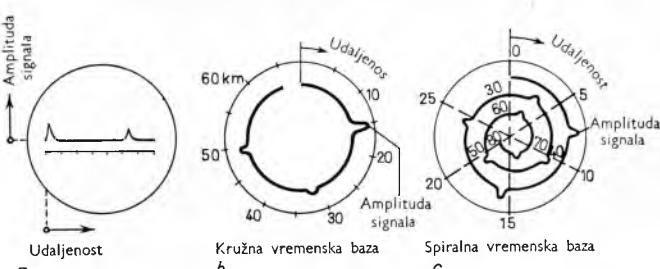
Ostali tipovi pokazivača. Upotrebljavaju se također pokazivači s pravokutnim koordinatnim sustavom azimut-daljina (B-pokazivač), elevacija-daljina (E-pokazivač) i elevacija-azimut (C-pokazivač). Za trodimenzionalno prikazivanje može se upotrijebiti, kad se u vidnom polju nalazi relativno mali broj ciljeva, i modificirani pokazivač azimut-udaljenost (H-pokazivač). Kod njega se ishodište izmjenično postavlja u dvije točke na konstantnom horizontalnom razmaku i vertikalnom razmaku proporcionalnom sinusu kuta elevacije. Svaki cilj u tom slučaju daje na zaslonu dvije mrlje. Nagib dužine koja spaja obje mrlje daje kut elevacije sa greškom od dva do tri stupnja. Takav se tip pokazivača primjenjuje na avionima za otkrivanje drugih aviona.

Na zaslonu radara koji prate cilj po kutovima pomak mrlje u horizontalnom i u vertikalnom smjeru od centra proporcionalan je grešci u azimutu, odnosno elevaciji. Kod avionskih radara za ništanje dodaje se horizontalnom otklonskom sustavu dopunski napon, uslijed čega se na zaslonu kroz svjetleću mrlju pojavi horizontalna crta, što stvara dojam siluete aviona. Duljina crte obrnuto je proporcionalna udaljenosti, pa tako postoji gruba procjena udaljenosti cilja. Naime, što se cilj više primiče to se horizontalna crta više povećava, te stvara utisak približavanja aviona (sl. 8).

Za praćenje samo po udaljenosti upotrebljava se pokazivač sličan osciloskopu, s time da je na apscisi udaljenost, a na ordinati amplituda primljenog signala (A-pokazivač). Da bi se uz iste dimenzije katodne cijevi postigla veća točnost, upotrebljavaju



Sl. 8. Pokazivač avionskog nišanskog radara



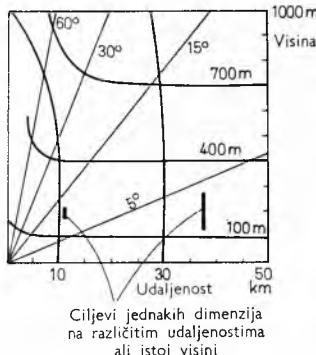
Sl. 9. Pokazivači predviđeni samo za mjerjenje udaljenosti: a - A-pokazivač, b - J-pokazivač s kružnom vremenskom bazom, c - pokazivač sa spiralnom vremenskom bazom

se pokazivači kod kojih je luk kružnice (J-pokazivač) ili spiralne proporcionalan udaljenosti, a radialni otklon ovisi o veličini signala (sl. 9 a, b, c).

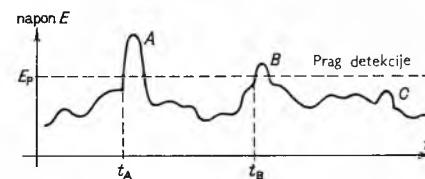
Detekcija signala odjeka

Detekcija pojedinog impulsa u šumu. Detekcija slabog signala odjeka u radarskom prijemniku ograničena je šumom koji se pojavljuje u istom frekvencijskom opsegu kao i signal. Napon sume signala i šuma na izlazu prijemnika prikazan je na sl. 10. Da bi se donio zaključak o tome da li u nekom trenutku na izlazu postoji impuls odjeka, potrebno je definirati napon E_p ,

tzv. *prag detekcije*. U trenutku kad napon na izlazu prijemnika pređe vrijednost E_p , smatra se da postoji signal odjeka. Ako je impuls odjeka jak (sl. 10 A), njegova će amplituda biti mnogo veća od okolnih vrhova šuma i on se lako može detektirati. Manje amplitude signala mogu se superponirati jednom od vrhova šuma, pa u trenutku t_B mogu prelaziti prag detekcije (sl. 10 B), ali ne moraju (sl. 10 C), što dovodi do gubitka odjeka jednog cilja. Da bi se slabi signali mogli detektirati, potrebno je sniziti prag E_p , ali preniski prag može dovesti do toga da se pojedini vrhovi šuma interpretiraju kao signal. U tom slučaju govori se o *lažnoj uzbuni*.



Sl. 7. Pokazivač daljine i visine



Sl. 10. Napon sume signala i šuma na izlazu prijemnika

Efikasnost otkrivanja ciljeva u radarskom sustavu prema tome je određena *vjerojatnošću detekcije* signala uz određenu *vjerojatnost lažne uzbune*. Glavni parametri koji određuju te vjerojatnosti jesu odnos snage signala prema snazi šuma (S/\bar{S}) i namješteni prag detekcije.

Širina pojasa spektra šuma u međufrekvencijskom dijelu prijemnika mala je prema centralnoj frekvenciji propusnog opsega, pa gustoća vjerojatnosti momen-

tanih vrijednosti napona šuma ima Gaussov raspodjelu. Iza linearne amplitudne detekcije napon šuma ima Rayleighjevu raspodjelu. Vjerojatnost lažne uzbune p_L jednaka je vjerojatnosti p_S kojom će jedan uzorak šuma preći prag detekcije E_p . Prema sl. 11 vjerojatnost lažne uzbune dobiva se kao površina ispod krivulje raspodjele od vrijednosti E_p do beskonačnosti:

$$p_L = p_S = \int_{E_p}^{\infty} dp_S = \exp\left(-\frac{E_p^2}{2E_{\text{ef}}^2}\right),$$

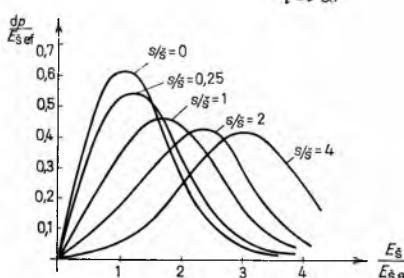
gdje E_{ef} predstavlja efektivnu vrijednost napona šuma.

S druge strane, gledano u vremenskom koordinatnom sustavu, prijemnik koji radi kontinuirano sa širinom pojasa B uspoređuje s pragom detekcije E_p u jedinici vremena B uzorka šuma (jer je trajanje jednog uzorka približno $1/B$), u intervalu vremena t , prema tome, $B t$ uzorka. Ako je u tom broju uzorka (dakle u intervalu vremena t) n_L lažnih uzbuna, vjerojatnost je lažne uzbune

$$p_L = \frac{n_L}{B t}.$$

Prosječno vrijeme između dvije lažne uzbune iznosi

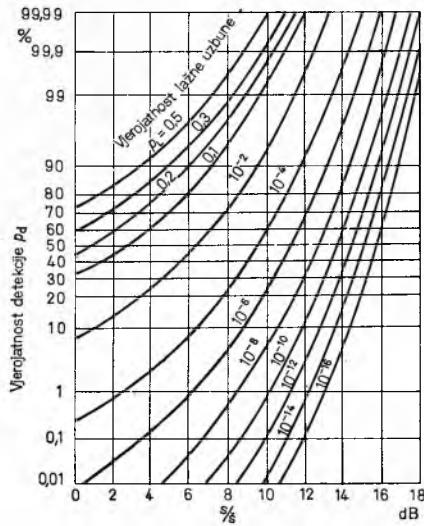
$$\bar{t}_L = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{n_L} = \frac{1}{p_L \cdot B}.$$



Sl. 12. Gustoća vjerojatnosti momentanih vrijednosti napona iza detektora ako su prisutni i signal i šum, a za različite odnose signala prema šumu. Vjerojatnost detekcije p_d je i ov-

Kada se na ulazu prijemnika pojavi smjesa signala i šuma, momentane vrijednosti napona iza detektora imaju gustoću raspodjele dP_d kao na sl. 12, gdje je kao parametar za pojedine krivulje uzet odnos signala prema šumu. Vjerojatnost detekcije p_d je i ov-

dje dana površinom ispod krivulje raspodjele. Pomoću sl. 12 moguće je za određeni prag E_p , i odnos signala prema šumu S/S odrediti vjerojatnost detekcije p_d i vjerojatnost lažne uzbune p_L . Ako se te vjerojatnosti nacrtaju kao funkcije S/S s time da se prag ne specificira, dobiju se krivulje na sl. 13, iz kojih se može odrediti efikasnost otkrivanja ciljeva radarskog sustava.



Sl. 13. Vjerojatnost detekcije kao funkcija odnosa signala i šuma pri različitim vjerojatnostima lažne uzbune p_L

Detekcija slijeda impulsa. Radarski sustavi samo u iznimnim slučajevima omogućuju zaključke o postojanju cilja na temelju samo jednog odjeka. Redovito se iskorištava nekolicina do nekoliko stotina impulsa odjeka, koji se na prikladan način obraduju u prijemniku. Na taj način postiže se velika efikasnost u otkrivanju ciljeva za odnose S/S blize jedinici ili čak ispod toga. Obrada signala u prijemniku svodi se na različite oblike sumacije impulsa odjeka i naziva se integracijom. *Koherentna integracija* vrši se u međufrekvenčijskom dijelu prijemnika prije detekcije i zahtijeva da faze svih signala odjeka budu jednake u odnosu prema jednom referentnom signalu. Ako imamo n impulsa s istim odnosom S/S, nakon integracije je $(S/S)_n = n \cdot (S/S)$, pa se iz krivulja na sl. 13 mogu pomoći novog odnosa $(S/S)_n$ dobiti p_d i p_L . Praktički svi radari iskorištavaju za integraciju signale iza detekcije (videofrekventne signale), gdje se informacija o fazi izgubila, dakle vrši se *nekoherentna integracija*. Faktor poboljšanja uslijed integracije je

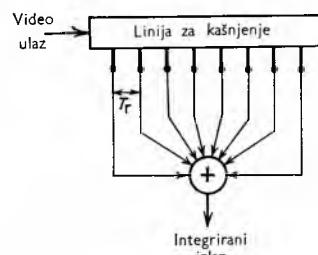
$$g_n = n^\gamma = \frac{(S/S)_n}{S/S},$$

gdje je $\gamma < 1$, redovito između 0,7 i 0,9. Smanjenje u odnosu prema koherentnoj detekciji tumači se nelinearnošću detektora, koji dio energije signala konvertira u šum.

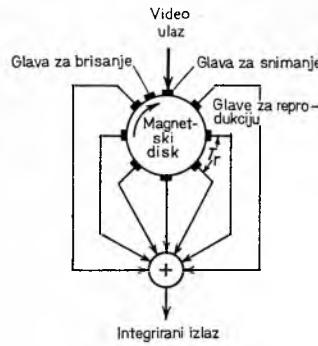
Poseban slučaj integracije posredstvom oka nastupa kad se promatra zaslon katodne cijevi pokazivača. Opsežni eksperimenti su pokazali da za PPI- i A-pokazivače vrijedi $\gamma \approx 0,5$. Kod vizuelne detekcije javlja se još i faktor efikasnosti promatrača, koji približno iznosi $g_p = 0,7 p_{d1}^2$, gdje je p_{d1} vjerojatnost detekcije jednog odjeka.

Integracija videofrekventnog signala posredstvom elektroničkih sklopova može se izvršiti na analognom ili na digitaliziranom signalu.

Pri *analognoj integraciji* primjenjuje se najčešće linija za kašnjenje ili rotirajući magnetski disk. Kod linije za kašnjenje s odvojcima prema sl. 14 ukupno vrijeme kašnjenja jednako je vremenu integracije, a odvojci odgovaraju raz-



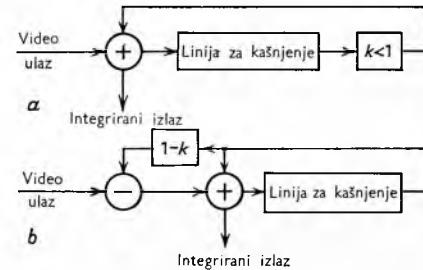
Sl. 14. Linija za kašnjenje s odvojcima za analognu integraciju video-frekventnog signala



Sl. 15. Shematski prikaz sklopa za analognu integraciju videofrekventnih signala sa rotirajućim magnetskim diskom

maku između dva odašiljačka impulsa. Broj odvojaka je u tom slučaju jednak broju impulsâ koji se sumiraju. Na sl. 15 prikazan je rotirajući magnetski disk, s kojim se mogu postići relativno velika vremena integracije.

Da bi se na liniji za kašnjenje izbjegao velik broj odvojaka, koji osim toga moraju biti vrlo precizno izvedeni, upotrebljavaju se linije za kašnjenje s jednostrukom ili dvostrukom povratnom petljom prema sl. 16. Na izlazu se ovdje svim prethodnim impulsima dodaje novi, s time da su, ovisno o pojačanju petlje, svi prethodni impulsi vrednovani, i to tako da su im amplitudne manje što su se ranije pojavili. Da bi se spriječile nepoželjne oscilacije zbog povratne petlje, signal se nakon svakog prolaza kroz petlju priguši tako da je faktor pojačanja $k < 1$. Optimalna vrijednost za k ovisi o broju integriranih impulsâ. Pri jednostrukoj petlji je $k_{max} = 0,9$; tom je vrijednošću broj impulsâ ograničen na $n_{max} = 10$. Pri dvostrukoj petlji stabilnost je garantirana još za $k_{max} = 0,98$, što dozvoljava integraciju približno 60 objekta. Za veći

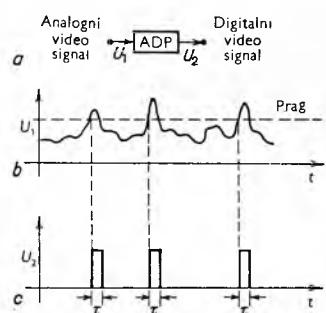


Sl. 16. Linija za kašnjenje s povratnom petljom za analognu integraciju videofrekventnog signala: a s jednostrukom petljom, b s dvostrukom petljom; k faktor pojačanja

broj impulsâ se u povratnoj petlji primjenjuje frekvencijska ili fazna modulacija.

Da bi se izvršila automatska detekcija cilja bez posredstva čovjeka, video-signal se digitalizira. Uređaji koji rade na tom principu rijetko su bolji od dobro izvršenog i sabranog promatrača, ali imaju prednost da rade jednako sigurno kroz dulji period vremena, jer nisu podložni umoru niti uzbudjenju ili panici, koja može nastati u ratnim uvjetima. Digitalizacija video-signala vrši se tako da se nakon svakog prijelaza analognog signala iznad praga detekcije iza analogno-digitalnog pretvarača ADP (sl. 17) pojavi impuls konstantne amplitude i trajanja. Duljina impulsa odgovara jednom elementu udaljenosti, koji se dobije dijeljenjem perioda između dva odašiljačka impulsa na jednake vremenske intervale, redovito jednaku trajanju odašiljačkog impulsa. Nakon pojave jednoga impulsa slijedeći element udaljenosti ostaje obično blokirani, kako se ne bi dva impulsa cilja stopila u jedan.

Pri *digitalnoj integraciji* promatra se isti element udaljenosti kroz period od n odašiljačkih impulsâ. Ako se od n mogućih impulsâ u tom periodu pojavi bar k (*digitalni prag*) pretpostavlja se da postoji cilj. Digitalni detektor u tom slučaju šalje jedan impuls ili na pokazivač ili u sklopove za dalju obradu. Optimalna vrijednost digitalnog praga je približno $k_0 \approx 1,5 \sqrt{n}$, što odgovara



Sl. 17. Digitalizacija video-signala. a Načela shema analogno-digitalnog pretvarača (ADP), b analogni signal, c primarni digitalni signal

analognom integratoru sa $\gamma \approx 0,7$. Budući da se kvantiziranjem video-signala gubi dio informacije, integracija je analognog signala povoljnija. Pri digitalnoj integraciji gubitak u odnosu S/Š iznosi $1\dots 2$ dB u usporedbi s optimalnom integracijom analognog signala.

Vjerojatnost detekcije i lažnog alarma iza digitalnog detektora mogu se odrediti na temelju poznatih vjerojatnosti za jedan impuls cilja. Ako je u svakom od n jednakih elemenata udaljenosti vjerojatnost detekcije cilja p_d , vjerojatnost da u m uzastopnih elemenata udaljenosti signal prelazi prag detekcije bit će dana binomnom razdiobom:

$$p(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p_d^m (1-p_d)^{n-m}.$$

Vjerojatnost da će u k ili više elemenata udaljenosti signal preći prag detekcije predstavlja vjerojatnost detekcije iza digitalnog detektora i iznosi

$$p_{dk} = \sum_{m=k}^n p(m) = \sum_{m=k}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p_d^m (1-p_d)^{n-m}.$$

Analogno je vjerojatnost lažne uzbune iza digitalnog detektora izražena pomoću vjerojatnosti lažne uzbune unutar jednog elementa udaljenosti

$$p_{lk} = \sum_{m=k}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} p_L^m (1-p_L)^{n-m}.$$

Refleksiona svojstva ciljeva

Najvažnija karakteristika svakog cilja je njegova sposobnost da reflektira elektromagnetsku energiju natrag u smjeru antene radarskog prijemnika. Reflektirani val ovisi o obliku cilja, o upadnom kutu pod kojim val pada na cilj i o električnim i magnetskim svojstvima cilja u odnosu prema okolnom prostoru. Radarska refleksiona površina cilja definira se kao ona površina fronte vala na mjestu cilja iz koje se apsorbira sva snaga i ponovo zrači u prostor u svim smjerovima jednakom, uz uvjet da je jakost polja na mjestu prijemne antene radara ista kao da se val reflektira od stvarnog cilja. Samo za najjednostavnije oblike može se ta površina relativno jednostavno izračunati; za realne ciljeve treba izvršiti opsežna mjerena.

Za idealno vodljivu kuglu polumjera r koji je mnogo veći od valne duljine elektromagnetskog vala, radarska refleksiona površina je $\sigma = r^2 \pi$. Vidi se da je ona točno četvrtina ukupne površine kugline plohe. Za velike ciljeve nepravilnog oblika bez oštirih rubova ili dijelova koji su rezonantni na valnoj duljini signala može se pretpostaviti da je srednja vrijednost refleksione površine takoder jednaka četvrtini površine cijelokupne plohe cilja.

Stvarna refleksiona površina cilja, koja je ovisna o kutu pod kojim se promatra cilj, može tako varirati. S obzirom na to da vjerojatnost detekcije direktno ovisi o refleksionoj površini, i ovu treba uzeti kao statističku veličinu. Da bi se točno odredila vjerojatnost detekcije nekog cilja, potrebno je naći vjerojatnost kojom se pojavljuje pojedina vrijednost refleksione površine i vjerojatnost detekcije signala reflektiranog od te površine. Producete tih dviju vjerojatnosti treba zatim sumirati za sve moguće vrijednosti od σ . Takav složeni proračun redovito se izbjegava time što se pri određivanju maksimalnog dometa radara zahtijeva vjerojatnost detekcije od 50%, a ona se postiže približno kod međijana refleksione površine σ_{50} . Za bojeve glave balističkih raketona iznosi do $0,5 \text{ m}^2$, za čovjeka $\sim 1 \text{ m}^2$, za avione nekoliko desetaka četvornih metara, do 100 m^2 za teške bombardere i nekoliko stotina četvornih metara za brodove. Ove vrijednosti su orientacione, s obzirom na to da radarska refleksiona površina ovisi mnogo i o frekvenciji upotrijebljenog signala.

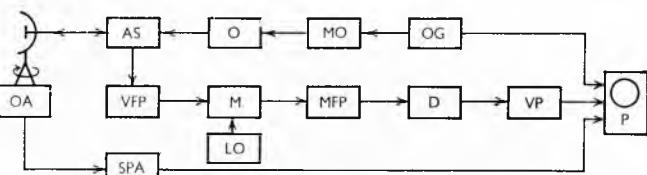
Refleksiona površina ciljeva koji se gibaju varira s vremenom, a to znači da će se tako mijenjati i signal odjeka. Mjereno pozicije ili brzine takvih ciljeva je otežano. U nekim slučajevima može centar refleksije za kratko vrijeme pasti čak i izvan volumena što ga obuhvaća cilj.

Osmatrački radar

Zadatak je osmatračkog radara da što je moguće prije registriši cilj pošto je ušao u zonu osmatranja. Radar može biti instaliran na zemlji, u avionu ili na brodu. Karakteristike zemaljskog

i brodskog radara su slične, osim što je brodskom radaru ograničena veličina i težina. Avionskom su radaru još više ograničene dimenzije, a i snaga zbog prirode izvora napajanja. Domet pri osmatranju ciljeva na moru je relativno mali, ~ 20 nautičkih milja, zbog zakrivljenosti Zemljine površine. Avionski radar, ako služi za promatranje zemlje, ima daleko veći domet, i do 200 milja. Dijagram zračenja antene je u horizontalnom smjeru uzak (kut usmjerenosti $\sim 1^\circ$), a u vertikalnom smjeru razlikuje se prema mjestu instaliranja i vrsti cilja (sl. 18). Osmatrački radar može služiti i za meteorološka ispitivanja, jer se od oborina i oblaka reflektira dio elektromagnetske energije.

Glavni sastavni dijelovi osmatračkog radara prikazani su blok-shemom na sl. 19. Generator okidnih impulsa OG daje slijed kratkih impulsa s jedne strane u modulator MO, a sa druge strane na pokazivač P, kako bi ovaj radio sinhrono s odašiljačem O.



Sl. 18. Oblici vertikalnog dijagrama zračenja različitih radara: a) za površinski brodski osmatrački radar, b) za zemaljski osmatrački radar, c) za avionski osmatrački radar

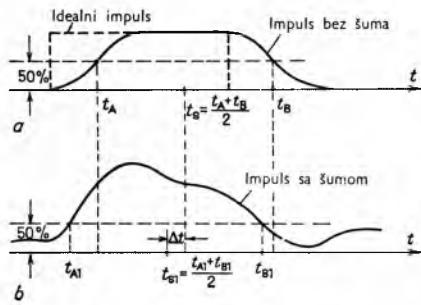
Repeticiona frekvencija tih impulsa iznosi od nekoliko stotina do nekoliko tisuća herca. Modulator daje impuse fiksнog trajanja (ovisno o tipu radara, između $0,1$ i $10 \mu\text{s}$). Ti impusi pobuduju oscilator O, koji odašilje slijed visokofrekventnih impulsa preko antenske skretnice AS i antene u prostor. Antenska skretница ima zadatak da zaštitи ulaz prijemnika u trenutku kad proradi odašiljač, jer vršna vrijednost snage dosije nekoliko stotina kilovata, što bi uništilo prijemnik. Pošto je odaslan impuls, antenska skretница otvori prolaz od antene do prijemnika i omogući prijem reflektiranog signala. Odjek se u visokofrekvenčnom pojačalu VFP mijesati u stupnju za miješanje M sa signalom lokalnog oscilatora LO, stvarajući signal međufrekvencije. Taj se signal dalje pojačava u međufrekvenčnom pojačalu MFP, detektira u detektoru D i preko video-pojačala VP privodi pokazivaču, na kojem se može indicirati udaljenost. Budući da azimut ovisi o smjeru osi antene, na sustav za okretanje antene OA mora biti mehanički ili električki vezan sustav za sinhroni prijenos azimuta SPA, koji daje pokazivaču informaciju o azimutu.

Mjerjenje daljine. Radi utvrđivanja daljine cilja potrebno je precizno odrediti vremenski razmak između sredine impulsa odjeka i odašiljačkog impulsa, jer je to direktno mjerilo udaljenosti. Budući da prijemnik ima određenu širinu propusnog polja B, videofrekventni impuls nije idealni pravokutnik, nego ima oblik prikazan na sl. 20. Kad je šum zanemarljiv u odnosu prema signalu, sredina impulsa t_s može se dobiti kao aritmetička sredina točaka na prednjem i stražnjem boku koje su na visini od 50% vršne vrijednosti impulsa. U prisustvu šuma te su točke pomaknute. Za širine impulsa veće od $1/B$ momentane vrijednosti šuma na prednjem i stražnjem boku neovisne su

jedna od druge, pa se srednje odstupanje od sredine impulsa može izraziti jednadžbom

$$\Delta t_s = \frac{1}{2B\sqrt{(S/\bar{S})}}.$$

Za fiksnu amplitudu signala preciznost se može povećati povećanjem širine pojasa B , ali kako šum raste proporcionalno širini pojasa B , odstupanje Δt_s ovisi o vrijednosti $1/\sqrt{B}$. Kad se mjerene daljine vrši pomoću slijeda od n odjeka, treba tako izračunato odstupanje pomnožiti sa $1/\sqrt{n}$.



Sl. 20. Oblik video-frekventnog impulsa: a bez šuma, b sa šumom

Sposobnost razdvajanja ciljeva po daljini ovisi o širini impulsa odjeka. Naime, tek kad završi impuls odjeka jednog cilja, može se detektirati sljedeći. Približno se prema tome može uzeti da rezolucija po udaljenosti iznosi:

$$\Delta R = \frac{\tau c}{2},$$

gdje je τ širina, tj. trajanje impulsa.

Domet radara. Pri radarima treba razmotriti maksimalni i minimalni domet.

Maksimalni domet radara za određenu vjerojatnost detekcije i lažne uzbune jednog impulsa ovisi o zahtijevanom minimalnom odnosu signala prema šumu:

$$\left(\frac{S}{\bar{S}}\right)_{\min} = \frac{P_0 g_0 g_p \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 (R_{\max})^2 F k T_0 B G},$$

gdje je F faktor šuma prijemnika, k Boltzmannova konstanta, $T_0 = 290$ K i G faktor gubitaka cijelog odašiljačkog i prijemnog lanca (>1).

Osim toga, da bi se sačuvala jednoznačnost u određivanju daljine, impuls odjeka mora se vratiti u prijemnik prije nego se odašilje novi impuls. To znači da je maksimalni domet vezan za repeticionu frekvenciju okidnih impulsa f_r relacijom:

$$R_{\max} \leq \frac{c}{2f_r}.$$

Broj impulsâ koji ozračuje cilj za vrijeme jednog okreta antene iznosi

$$n = \frac{\Theta_D f_r}{2\pi f_s},$$

gdje je Θ_D horizontalni kut usmjerenoosti, f_r repeticiona frekvencija i f_s frekvencija rotacije antene.

Pomoću broja n može se odrediti faktor poboljšanja uslijed integracije a time i novi odnos $(S/\bar{S})_{\min}$.

Povećanje maksimalnog dometa radara može se postići povećanjem broja impulsâ n koji ozračuje cilj za vrijeme jednog okreta antene. To znači da treba ili povećati kut usmjerenoosti, što smanjuje razdvajanje ciljeva po kutu, ili povećati repeticionu frekvenciju, što dovodi u pitanje jednoznačnost očitavanja daljine, ili smanjiti brzinu rotacije antene, što smanjuje brzinu otkrivanja cilja. Dalja mogućnost je povećanje amplitudne visokofrekventnog impulsa. Ali ako je srednja snaga visokofrekvenčnog oscilatora konstantna, povećanje se amplitude može izvesti samo na račun skraćenja impulsa. Uži impulsi zahtijevaju za vjerni prijenos veću širinu pojasa B , tako da odnos $(S/\bar{S})_{\min}$ ostaje isti, jer se povećanje amplitudne kompenzira povećanjem šumom. Da bi se smanjio šum u prijemniku, mogla bi se smanjiti širina pojasa, no to zahtijeva veću širinu impulsa i veću snagu oscilatora. Uz

istu srednju snagu oscilatora i povećanu širinu impulsa amplituda će pasti i ništa se ne dobiva na odnos $(S/\bar{S})_{\min}$, s time da je još i smanjena rezolucija po udaljenosti. Prema tome pri dimenzioniranju radara treba odabrati njegove parametre kompromisno.

Za povećanje odnosa signal-sum, a time i dometa, primjenjuje se ponekad metoda kompresije impulsa. Naime, kad postoje ograničenja u pogledu veličine vršne snage, recimo zbog probroja, povećanje se ukupne energije odašiljačkog impulsa može postići jedino proširenjem impulsa. Budući da široki impulsi u prijemniku daju malu rezoluciju po udaljenosti, potrebno ih je suziti, s time da im sadržaj energije ostaje nepromijenjen. To se postiže tako da se odašiljački impuls frekvencijski modulira. Na početku visokofrekventnog impulsa frekvencija je najviša i iznosi f_{\max} , a zatim postepeno opada do kraja impulsa na f_{\min} . U prijemniku se impuls propušta kroz filter za kompresiju, koji ima takvu karakteristiku da pri prolazu kroz njega signali kasne proporcionalno svojoj frekvenciji. To znači da će kašnjenje τ_{\max} prednjeg dijela impulsa biti veće od kašnjenja τ_{\min} stražnjeg; impuls se vremenski gledano sabio (sl. 21). Budući da je filter za kompresiju praktički bez gubitaka, amplituda impulsa je porasla i odnos S/\bar{S} je poboljšan, a da nije pala rezolucija po udaljenosti. Omjer viših vrijednosti snaga impulsa poslije i prije prolaza kroz filter zove se faktor kompresije, a iznosi:

$$k_c = \Delta f \cdot \tau, \text{ uz } \Delta f = f_{\max} - f_{\min} \gg \frac{1}{\tau}.$$

Minimalni domet radara ograničen je širim odašiljačkog impulsa (τ), vremenom deionizacije (τ_d) TR-ćelija (plinom punjenih cijevi) u antenskoj skretnici i stražnjim bokom (τ_l) odašiljačkog impulsa koji prodire u prijemnik. Minimalni je domet dakle

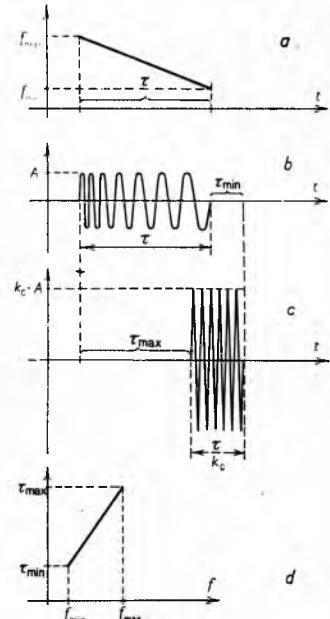
$$R_{\min} = \frac{c}{2} (\tau + \tau_d + \tau_l).$$

Za zemaljske radare, kojima antene zrače i pod malim elevacionim kutom, stvarni minimalni domet ovisi o odjecima bliskih objekata i može biti nekoliko puta veći od teoretskog, koji je ovisan samo o parametrima uređaja.

Mjerenje kuta. Radi određivanja azimuta treba utvrditi smjer iz kojeg je naišao val reflektiran od cilja. Budući da dijagram zračenja antene rotira, amplitudu impulsa odjeka ovise o momentanom položaju antene. Ako se promatra slijed impulsâ odjeka, vidi se da je moduliran dijagmom zračenja, pa za određivanje azimuta treba naći maksimalni impuls. Da bi se primijetila razlika u amplitudi impulsâ, potrebno je da se os dijagrama zračenja znatno pomakne od smjera cilja. Pri indikaciji amplitude na pokazivaču se mogu zamijetiti razlike u amplitudi od $\sim 10\%$, a to znači da maksimalna pogreška u očitanju azimuta iznosi približno četvrtinu horizontalnog kuta usmjerenoosti. Ako se promatranje vrši na panoramskom pokazivaču, greška dosije polovinu kuta usmjerenoosti.

Ako se određivanje kuta vrši elektroničkim sklopovima, a posebno na digitaliziranom video-signalu, kutna greška može biti znatno manja. Minimalna srednja pogreška $\Delta\phi$, koja se može postići je

$$\Delta\phi_s = \frac{0.5 \Phi_D}{\sqrt{n(S/\bar{S})}},$$



gdje je Φ_D horizontalni kut usmjerenosti, n broj impulsa unutar kuta usmjerenosti i $(S/\dot{S})_0$ odnos snage signala prema snazi šuma u času kad je primljen odjek iz smjera osi antene.

Za fluktuirajuće ciljeve (ako radarska refleksiona površina varira s vremenom) minimalna srednja pogreška opada s povećanjem odnosa $(S/\dot{S})_0$ samo do određene vrijednosti, iza koje ostaje praktički neovisna o odnosu $(S/\dot{S})_0$. Naime, kad greška uslijed šuma postane zanemarljiva, preostaje greška uslijed fluktuacije amplitude odjeka. Ako refleksiona površina ima Rayleighjevu raspodjelu, preostala srednja kutna pogreška iznosi:

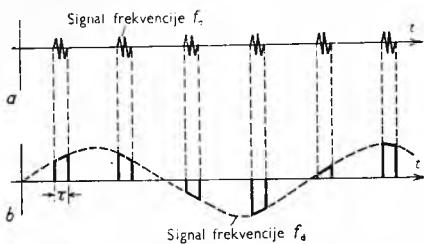
$$\Delta\varphi_s = \frac{0,152 \Phi_D}{n}.$$

Opisano mjerjenje kuta uslovljeno je ispravnom identifikacijom cilja, jer ako cilj nije ispravno identificiran, uslijed pojedinih impulsa šuma mogu nastupiti velike greške. Za dovoljnu vjerojatnost detekcije smatra se da veličina $n \cdot (S/\dot{S})_0$ mora biti veća od 25, pa je srednja pogreška uvijek ispod jedne desetine kuta usmjerenosti.

Radar s izdvajanjem pokretnih ciljeva

Za selekciju pokretnih ciljeva iskorištava se činjenica da se frekvencija signala odjeka pokretnog cilja razlikuje od frekvencije odaslanog impulsa za Dopplerov pomak. Za sustave s mogućnošću izdvajanja pokretnih ciljeva internacionalno je uveden naziv MTI-radar (od engl. Moving Target Indication Radar, radar za pokazivanje pokretnih ciljeva). Gruba blok-shema takvog radara prikazana je na sl. 22. Najvažniji je sklop u tom uređaju stabilan oscilator SO, koji radi kontinuirano i služi za uspoređivanje frekvencija u prijemniku. Impulsni rad se postiže otvaranjem i zatvaranjem pojačala snage PS pomoću modulatora MO, a frekvencija odjeka f_d usporeduje se u prijemniku P s odašiljačkom frekvencijom f_o , s time da se Dopplerov pomak f_d na prikladan način indi- cira na pokazivaču I.

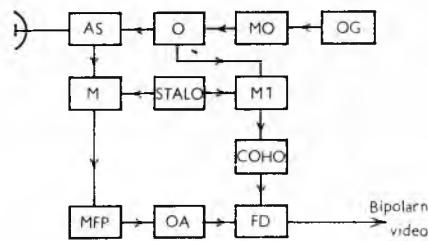
Sustavi za izdvajanje pokretnih ciljeva mogu se podijeliti u dvije grupe. Kod jednih je širina impulsa mnogo veća od periode Dopplerova pomaka, $f_d \gg 1/\tau$ (sl. 23 a), kod drugih je širina impulsa mnogo manja od periode Dopplerova pomaka, $f_d \ll 1/\tau$ (sl. 23 b). Prvi slučaj nastupa pri vrlo visokim radikalnim brzinama i primjenjuje se u svemiru, a drugi slučaj odgovara za ciljeve na Zemlji. Npr. za avion s radikalnom brzinom od 1000 km/h i odašiljačkom frekvencijom radara 9 GHz, Dopplerov pomak iznosi ~ 17 kHz. Perioda te frekvencije je približno 60 μ s, što je mnogo veće od uobičajene širine impulsa 2 μ s. Vidi se da se iz jednog impulsa ne može rekonstruirati Dopplerov pomak, što je pri velikim brzinama moguće.



Sl. 23. Odnos širine impulsa τ i perioda Dopplerovog pomaka za signale odjeka pokretnih ciljeva: a za svemirske letjelice, gdje je $f_d \gg 1/\tau$, b za avione gdje je $f_d \ll 1/\tau$

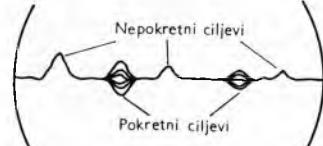
Iz sl. 23 b slijedi da se na izlazu prijemnika ne dobije kontinuirani signal s Dopplerovom frekvencijom, nego samo uzorci tog signala. Frekvencija uzimanja uzorka jednaka je repeticijom frekvenciji radara. Kako amplituda svakog uzorka ovisi o fazi Dopplerovog signala, za detekciju se primjenjuje fazni detektor.

MTI-radar s magnetronskim oscilatorom najčešće se primjenjuje. Magnetron prooscilira iza svakog okidnog impulsa, ali sa slučajnom fazom. Prema tome signal referentne faze u faznom detektoru mora biti čvrsto vezan na fazu magnetronskog oscilatora, što je prikazano blok-shemom na sl. 24. Referentna faza



Sl. 24. Blok-shema MTI radara s magnetronskim oscilatorom. AS antenska skretница, COHO oscilator referentne faze, FD fazni detektor, M i M₁ stupnji za miješanje, MFP međufrekvenčno pojačalo, MO modulator, OG magnetronski oscilator, OA ograničavač amplitude, OG generator okidnih impulsa, STALO visokofrekvenčni stabilni oscilator

medufrekventnog signala dobiva se u stupnju za miješanje M₁ iz visokofrekvenčnog stabilnog oscilatora STALO i oslabljenog izlaza magnetronskog oscilatora OG. Izlaz stupnja za miješanje M₁, koji radi samo za vrijeme odašiljačkog impulsa, služi za pobudjivanje oscilatora referentne faze COHO. Taj oscilator radi točno na frekvenciju medufrekvencije i drži stabilno svoju fazu sve do nailaska idućeg odašiljačkog impulsa. Za vrijeme trajanja idućeg odašiljačkog impulsa on se podesi na novu fazu magnetronskog oscilatora i drži tu fazu sve do slijedećeg impulsa, dajući time referentnu fazu faznom detektoru FD. Ispred tog detektora je ograničavač amplitude OA, kako bi se eliminirale sve promjene amplitude odjeka a detektirala samo fazu. Na izlazu iz faznog detektora pojavljuje se **bipolarni video-signal**. Kod pokretnih ciljeva impuls odjeka iz svakog odašiljačkog impulsa mogu se razlikovati i po amplitudi i po polaritetu ovisno o brzini, dok su kod nepokretnih ciljeva impulsi konstantni. Na A-pokazivaču (v. str. 699) vide se uz zanemarljiv šum signali kao na sl. 25 i moguće je razlučiti pokretnе od nepokretnih objekata.



Sl. 25. Prikaz pokretnih i nepokretnih ciljeva na A-pokazivaču

Elektroničko razlučivanje pokretnih od nepokretnih ciljeva vrši se sklopom za poništavanje odjeka nepokretnih ciljeva. Princip je rada takva sklopa da se od dva impulsa odjeka, koji vremenski slijede jedan iza drugog, obrazuje razlika. U idealnom slučaju, za nepokretni cilj razlika je nula, a za pokretni cilj ujek postoji neka razlika. Najgrublja blok-shema sklopa prikazana je na sl. 26. Bipolarni video-signal se vodi na sklop za oduzimanje ($-$) jednom direktno, a drugi put preko linije za kašnjenje LK. Da se na izlazu ne bi dobio ponovo bipolarni signal, uvršten je punovalni ispravljač PI, iza kojeg se dobije unipolarni video-signal prikladan i za indikaciju na PPI-pokazivaču.

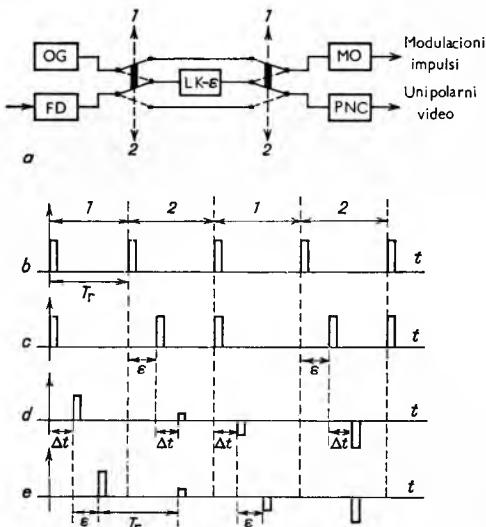
Video-signal se redovito ne propušta direktno kroz liniju za kašnjenje, nego se modulira na prijenosnu frekvenciju između 5 i 60 MHz, zbog izobličenja koja mogu nastati na liniji za kašnjenje pri pretvaranju električne u akustičku energiju i obratno. S obzirom na veliko gušenje ubacuje se iza linije za kašnjenje pojačalo. Isto takvo pojačalo uključuje se i u direktnu granu, da se postigne identična odzivna karakteristika obju grana, a time i dobro poništavanje signala nepokretnih ciljeva. Redovito se primjenjuju i sklopovi za automatsku regulaciju bilo vremena kašnjenja bilo repeticione frekvencije, jer kašnjenje mora biti strogo jednako

recipročnoj vrijednosti repeticione frekvencije okidnih impulsa. Za uspoređivanje sklopova koji obavljaju selekciju pokretnih ciljeva služi faktor brisanja (engl. cancellation ratio). On se definira kao omjer napona signala nepokretnog cilja nakon poništavanja prema naponu signala nepokretnog cilja bez poništavanja. Pri dobrom poništavanju faktor brisanja iznosi $\sim 1\%$.

Pojava slijepih brzina jedna je od velikih mana MTI-radara. Naime, za one radikalne brzine ciljeva pri kojima je Dopplerova frekvencija cjelobrojni višekratnik repeticione frekvencije, radar je "slijep", jer se impuls odjeka pojavljuje uvihek u istoj fazi, te ga prijemnik registrira kao nepokretni cilj. Slijede brzine dane su izrazom

$$v_{RS} = k \frac{f_r \lambda}{2}, \text{ uz } k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Slijede se brzine mogu izbjegći tako da se upotrijebi dva radara koji imaju različite slijede brzine, pa se pokretni objekt mora uvek zamjetiti bar na jednom od njih. Ekonomičniji je jedan radar s promjenljivom repeticijom frekvencijom okidnih impulsa. Frekvencija se može mijenjati u bilo kojem ritmu koji osigurava da se bar u dva uzastopna osmatranja istog dijela prostora pojavljuje druga repeticiona frekvencija.



Sl. 27. Prikaz rada MTI-radara sa dvije repeticione frekvencije. a) Blok-sHEMA, b) slijed okidnih impulsa s konstantnim razmakom T_r na izlazu OG-sklopa, c) slijed modulacionih impulsa s razmakom $T_r + \epsilon$ ili $T_r - \epsilon$, d) impulsi bipolarnog video-signala s razmakom $T_r + \epsilon$ ili $T_r - \epsilon$ na izlazu FD-sklopa kada postoji samo jedan cilj, e) impulsi bipolarnog video-signala s konstantnim razmakom na ulazu PNC-sklopa; FD fazni detektor, LK - linija s malim kašnjenjem ε, MO modulator, OG generator okidnih impulsa, PNC-sklop za poništenje nepokretnih ciljeva

Najčešće se primjenjuje *sustav sa dvije repeticione frekvencije* s time da se od impulsa do impulsa promijeni repeticiona frekvencija. To se može jednostavno ostvariti tako (sl. 27 a) da se izmjenično u granu generatora okidnih impulsa odašiljača OG-MO i u granu sklopa za poništavanje odjeka nepokretnih ciljeva FD-PNC uključi linija LK s malim kašnjenjem ε. Prvobitni razmak između dva okidna impulsa T_r mijenja se izmjenično u $T_r + \epsilon$ i $T_r - \epsilon$ (sl. 27 c). Odjek od cilja pojavljuje se uvihek nakon vremena Δt iza odašiljačkog impulsa, tako da bipolarni video-signal (samo za jedan cilj) izgleda kao na sl. 27 d. Za vrijeme dok je u odašiljačkom krugu uključeno kašnjenje, u prijemnom ga nema i obratno, što ima za posljedicu da je na ulazu u sklop PNC razmak između dva impulsa odjeka konstantan i jednak T_r (sl. 27 e).

MTI-radar instaliran na pokretnom objektu (npr. na brodu ili avionu) teško razdvaja pokretnе od nepokretnih ciljeva. Nepokretni se ciljevi kreću relativno u odnosu prema radaru, pa imaju svoju Dopplerovu frekvenciju. Da bi se ti ciljevi eliminirali, COHO-oscilatoru se pomakne frekvencija za fiksni iznos koji odgovara Dopplerovom pomaku nepokretnih ciljeva. Frekvencija tog pomaka ovisi o kutu pod kojim zrači antena u odnosu

prema smjeru gibanja radara, pa se mora za vrijeme osmatranja stalno mijenjati. Ako je razlika Dopplerovih pomaka između cilja i nepokretnih objekata mala, teško je ta dva signala razdvojiti. Pri osmatranju s broda lako se razdvoje smetnje zbog valova i odjek aviona (velika razlika u brzinama), dok se pri osmatranju iz aviona teško razluči smetnje od valova i odjek broda (mala razlika u brzinama u usporedbi s brzinom aviona).

Kao mjeru kvaliteta razdvajanja pokretnih od nepokretnih ciljeva često služi faktor potiskivanja nepokretnih ciljeva (engl. sub-clutter visibility). Taj je faktor definiran kao omjer između vršne vrijednosti signala pokretnog cilja i vršne vrijednosti signala nepokretnog cilja na ulazu, ako su oba jednaka na izlazu. Pri uspoređivanju dvaju različitih tipova MTI-radara treba biti oprezan, jer, usprkos tome što im je faktor potiskivanja isti, njihova sposobnost otkrivanja pokretnih ciljeva može biti različita. Naime, snaga smetnji nepokretnih ciljeva ovisi o produktu širine impulsa i kuta usmjerenosti; što je taj produkt manji to slabije odjeku radar može zamjetiti.

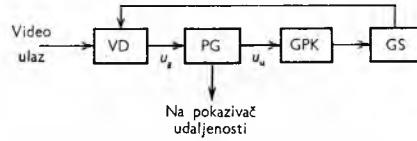
Radar za praćenje cilja

Kad se osmatračkim radarem cilj pronade i identificira, npr. kao neprijateljski, on se predaje radaru za praćenje cilja, koji precizne podatke o udaljenosti, elevaciji, visini i smjeru (azimutu) cilja bez prekida prenosi računalu uredaja ili oruđu kome služi. Danas takvi radari prate cilj potpuno automatski.

Automatsko praćenje po udaljenosti sastoji se u neprekidnom određivanju vremenskog pomaka signala odjeka u odnosu prema odaslanom impulsu. Prvobitno se to vršilo ručno, npr. na PPI-pokazivaču pomoću pomičnog kalibracionog prstena ili na A-pokazivaču pomoću vremenskog markera (vrlo kratkog impulsa), koji se dodaje signalu odjeka. Kasnije se prešlo na poluautomatsko praćenje, pri kome se vremensko pomicanje markera po zaslonu katodne cijevi upravlja motorom i sustavom zupčanika. Na početku praćenja treba podešiti položaj i brzinu cilja, a zatim se ručno vrši samo korekcija ubrzanja. Pri poluautomatskom praćenju moguće je premostiti periode i od nekoliko sekundi unutar kojih se signal odjeka ne može uočiti jer je ispod granice zamjetljivosti.

Moderni radari za praćenje rade potpuno automatski, što povećava točnost i brzinu određivanja udaljenosti. To je naročito važno zbog velikih brzina ciljeva koji se danas susreću. Osim toga isključuje se subjektivna greška čovjeka, a za niz slučajeva pokazivač s glomaznom katodnom cijevi nije potreban, jer se i bez njega može odrediti udaljenost i taj podatak uvesti u računalo.

Blok-sHEMA sustava za automatsko praćenje prikazana je na sl. 28. Na vremenskom diskriminatoru VD uspoređuje se sredina impulsa odjeka sa sredinom stroboimpulsa kojima se može mijenjati kašnjenje u odnosu prema odaslanom impulsu. Ako se njihove sredine vremenski ne poklapaju, na izlazu vremenskog diskriminatora pojavljuje se signal greške u_g . Taj se signal pojavljuje u pojačalu PG i privodi generatoru promjenljivog kašnjenja GPK, koji upravlja generatorom stroboimpulsa GS. Sredina

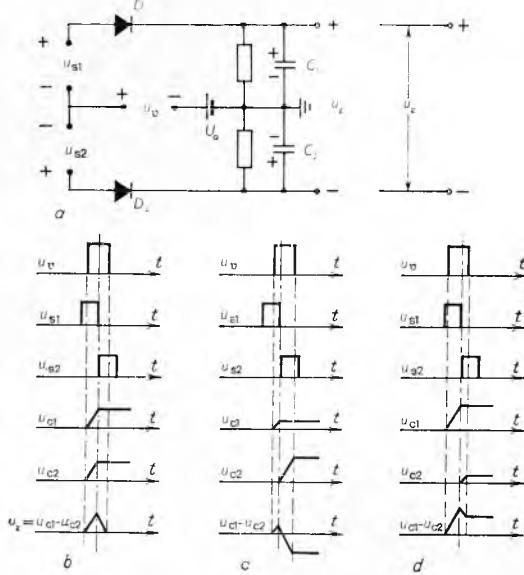


Sl. 28. Blok-sHEMA sustava za automatsko praćenje po udaljenosti. GS generator stroboimpulsa, GPK generator promjenljivog kašnjenja, PG pojačalo signala greške, VD vremenski diskriminator

stroboimpulsa pomici se dok se sve ne poklopi sa sredinom impulsa odjeka. Izlaz iz PG vodi se na pokazivač udaljenosti ili uvodi u računalo.

Rad vremenskog diskriminatora može se objasniti slikom 29. Na svaku od dviju dioda D_1 i D_2 djeluje istosmjerni prednapon U_0 , impuls video-signala u_v i jedan od stroboimpulsa u_{s1} i u_{s2} . Negativni prednapon je veći od maksimalne amplitudine video-signala i približno jednak amplitudama obaju stroboimpulsa. Time se postiže selekcija cilja po udaljenosti, jer diode pod utjecajem samo video-signala ne vode struju. U trenutku kad se pojave istovremeno impuls odjeka i stroboimpuls, diode provedu struju.

Za vrijeme trajanja prvog stroboimpulsa u_{s1} provede struju dioda D_1 , a za vrijeme drugog, u_{s2} , dioda D_2 . Diode D_1 i D_2 nabijaju kondenzatore C_1 i C_2 . Nabijanje traje samo dok na diode djeluju istovremeno video- i stroboimpuls. Razlika napona kondenzatora C_1 i C_2 čini signal greške u_g . Svaki stroboimpuls je nešto širi od polovine impulsu odjeka. Na slici prikazani su slučajevi kad se sredina stroboimpulsa poklapa sa sredinom odjeka (sl. 29 b), kad joj prethodi (sl. 29 c) i kad kasni (sl. 29 d). Vidi se da veličina i polaritet napona greške ovisi o vremenskom pomaku.



Sl. 29. Prikaz dobivanja signala greške u_g uz pomoć vremenskog diskriminatora. a) Shema, tumačenje rada: b) pri poklapanju, c) pri prethodenju, d) pri kašnjenju stroboimpulsa u_{s1} i u_{s2} u odnosu prema sredini impulsa odjeka u_u

Pojačalo signala greške PG pojačava i vrši jednostruku ili višestruku integraciju. Naime, od sustava za automatsko praćenje zahtjeva se da pri slučajnom prekidanju signala ne izgubi cilj. To znači da sustav mora imati određenu inerciju, što, s druge strane, povećava dinamičku grešku.

Sustav s jednostrukom integracijom. U tom je sustavu veza između napona greške u_g i upravljačkog napona u_u , koji djeluje na GPK, dana relacijom

$$u_u = A \int u_g dt, \text{ odnosno } \frac{du_u}{dt} = A u_g.$$

Vidi se da je brzina promjene upravljačkog napona proporcionalna signalu greške, a to znači da se u_u mijenja dok god je $u_g \neq 0$. U trenutku kad je $u_g = 0$, stvarna i izmjerena udaljenost se poklapaju, tj. statička greška svedena je u idealnom slučaju na nulu, odnosno u realnim slučajevima određena je ukupnom osjetljivošću sustava. Osim toga, ovakav sustav ima sposobnost »pamćenja« položaja cilja, jer kad nestane odjek, on uskladišti posljednju vrijednost izmjerene udaljenosti i pamti je dok se ponovo ne pojavi signal. Ako se cilj u međuvremenu toliko pomaknuo da novi signal odjeka padne izvan stroboimpulsa, napon greške je također jednak nuli. Radar, dakle, ne može razlikovati da li je $u_g = 0$ zbog toga što je greška praćenja jednaka nuli ili zato što nema odjeka.

Jednostruka integracija prema tome unosi poboljšanje u sustav za automatsko praćenje samo kad je prekid signala odjeka kratkotrajan.

Sustav sa dvostrukom integracijom. U tom je slučaju:

$$\begin{aligned} u_u &= A_1 \int u_g dt + A_2 \int \int u_g dt dt, \\ \frac{du_u}{dt} &= A_1 u_g + A_2 \int u_g dt, \\ \frac{d^2 u_u}{dt^2} &= A_2 u_g. \end{aligned}$$

Ako je $u_g = 0$, to znači da je akceleracija $\left(\frac{d^2 u_u}{dt^2}\right)$ jednaka nuli i

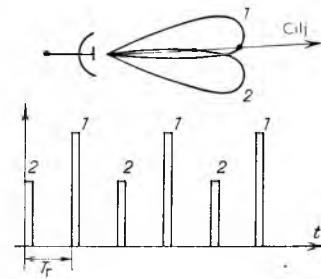
cilj se giba s konstantnom radikalnom brzinom. Uz stvarnu i izmjerenu udaljenost poklapaju se i stvarna i izmjerena brzina. Međutim, $u_g = 0$ može značiti i gubitak signala odjeka. U tom slučaju radar nastavlja praćenje po »zapamćenoj« brzini, tako da se i nakon prekida od jedne sekunde može nastaviti s praćenjem, ukoliko cilj ne izvodi prebreze manevre po udaljenosti.

Generator promjenljivog kašnjenja može biti čisto elektronički ili elektromehanički. Elektronički je jednostavniji, lakši i manji po dimenzijama, ima malu inerciju, pa može pratiti ciljeve većih brzina i ubrzanja. Apsolutna greška u praćenju ne prelazi 10–15 m. Elektromehanički se odlikuje jednostavnosću izrade višekanalnih sustava velike točnosti i time što daje udaljenosti neposredno u obliku mehaničkog signala. Greška praćenja ne prelazi nekoliko metara, ali je zbog inercije elektromehaničkih dijelova brzina praćenja ograničena.

Automatsko praćenje po kutu. Svi sustavi za praćenje po kutu primjenjuju antene s bar dvije glavne latice razmaknute približno za kut usmjerenosti.

Prvi radari za praćenje na anteni su izmjenično preklapali prijemnik sad na jednu sad na drugu glavnu laticu (sl. 30).

Ovisno o smjeru prijema signala, impuls odjeka je mijenjao amplitudu pri svakom preklapanju, osim ako nije došao iz pravca koji predstavlja simetralu kuta određenog smjerovima maksimalnih zračenja glavnih latica. Razlika u amplitudama direktno je bila mjeru za odstupanje cilja od osi antene, koja se onda manuelno, a kasnije automatski pomicala dok se ta razlika u amplitudama nije izgubila.



Sl. 30. Automatsko praćenje po kutu s preklapanjem prijemnika od impulsa do impulsa na jednu i drugu glavnu laticu antene. Ako cilj nije u simetrali latica, impuls dobiven uz pomoć jedne (1) i druge (2) latice razlikuju se po amplitudi

Kasnije se pojavio radar s *koničnim pomicanjem smjera glavne latice*. Ti se tipovi radara i danas upotrebljavaju na avionima za ništanje pri gađanju jer su jednostavniji, a točnost im je dovoljna za zračne borbe. Konično pomicanje glavne latici postiže se rotacijom primarnog radijatora antene oko osi paraboličnog reflektora, s time da je primarni radijator izvan fokusa. Slijed impulsâ odjeka u tom je slučaju moduliran frekvencijom ovisnom o brzini rotacije, a dubinom modulacije ovisnom o odstupanju smjera cilja od osi reflektora. Da bi se moglo izvršiti upravljanje antenom, potrebno je iz moduliranog slijeda impulsâ izdvajati posebno grešku azimuta i grešku elevacije. Anvelopa slijeda impulsâ detektira se i privodi faznim detektorima za grešku u azimutu, odnosno u elevaciju. Referentni naponi za fazne detektore dobivaju se iz generatora mehanički vezanog na osovinu koja pokreće primarni radijator antene. Taj referentni generator daje dva sinusna signala pomaknuta jedan prema drugome za 90°, kojima je frekvencija jednaka frekvenciji koničnog osmatranja.

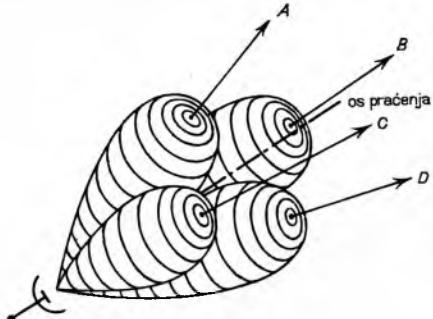
Ako se unutar glavne latici pojavi više ciljeva, treba izvršiti njihovu selekciju, jer je oblik anvelope video-signala izobličen i dobiva se lažni signal greške. Automatsko praćenje cilja postaje nemoguće. Za normalan rad sustava za automatsko praćenje po kutu na njegov ulaz smije doći signal odjeka samo jednog cilja. Iz slijeda impulsâ koji stiže u različito vrijeme odabiru se samo oni kojima vrijeme kašnjenja odgovara udaljenosti promatranog cilja. S obzirom na to da je cilj općenito u pokretu, radar mora imati i sustav za automatsko praćenje po udaljenosti, iz kojega se onda dobivaju impulsi za otvaranje i zatvaranje kanala za praćenje po kutu.

Da bi se kod sustava s izmjeničnim preklapanjem antenâ i sustava s koničnim osmatranjem dobila kutna pogreška za azimut i elevaciju, treba, teoretski, u prijemniku obraditi najmanje tri impulsâ. Praktički je potrebno daleko veći broj impulsâ. Naime, ako se za vrijeme mjeranja kuta mijenja amplituda odjeka ne samo zbog moduliranja kutnom pogreškom nego i zbog fluktuacije radarske površine cilja, točnost praćenja po kutu opada. Posebno jak utjecaj imaju fluktuacije koje imaju u svom spektru komponente u blizini frekvencije preklapanja ili koničnog osmatranja. U takvom

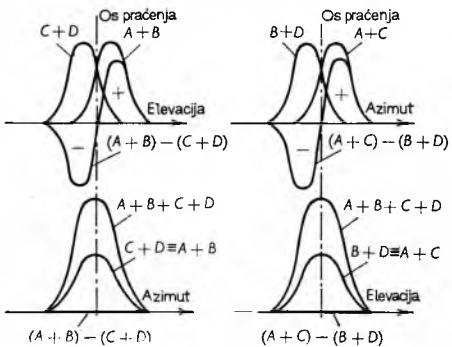
slučaju potrebno je obraditi vrlo velik broj impulsa da bi se iz njih mogao izdvojiti signal greške.

Monopulsni sustavi. Da bi se izbjegao utjecaj fluktuacija amplitud odjeka na točnost praćenja, razvijeni su monopulsni sustavi, koji na temelju jednog odjeka mijere kut i stvaraju signal greške. U tim se sustavima simultano iskorištavaju signali iz više glavnih latica antene, s time da se pri svakom odjeku uspoređuju njihove amplitude i/ili faze.

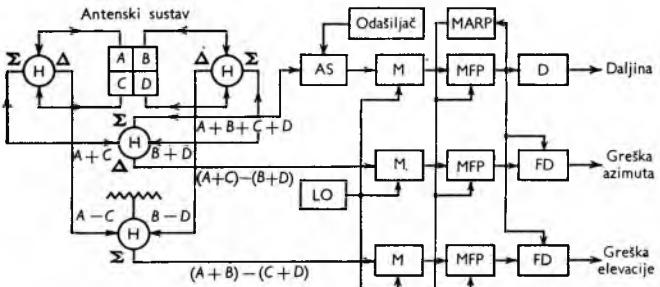
Kad se uspoređuju amplitude, radi se dvjema glavnim laticama, kojima su smjerovi maksimalnog zračenja simetrični u odnosu prema osi praćenja. U sustavima osjetljivim prema fazi smjer se maksimalnog zračenja obiju latica podudara s osi praćenja, stoga se primjenjuju dvije odvojene antene na razmaku mnogo većem od valne duljine (princip interferometra). Ako se kut upada ne poklapa s osi praćenja, postoji kašnjenje, odnosno fazni pomak, između signala obiju antena, što služi kao signal greške.



Sl. 31. Četiri neovisne glavne laticе antene monopulsnog sustava koji radi na bazi uspoređivanja amplituda



Sl. 32. Kombinacije signala iz četiri primarna radijatora monopulsne antene monopulsnog radara kao funkcije odstupanja od osi praćenja



Sl. 33. Blok-sHEMA monopulsnog sustava za automatsko praćenje po kutu. A, B, C, D primarni radijatori antenskog sustava glavnih latica, AS antenska skretница, D amplitudni detektor, FD fazni diskriminator, H hibridni sklop uz pomoć kojeg se vrši operacije zbrajanja i oduzimanja visokofrekventnog signala, LO lokalni oscilator, M stupanj za mijicanje, MARP sklop za momentanu automatsku regulaciju pojačanja, MFP međufrekvenčijsko pojačalo

Monopulsni sustav na bazi uspoređivanja amplituda radi kako je opisano u nastavku. Antenski sustav ima četiri neovisne glavne laticе (A, B, C i D na sl. 31), koje se dobivaju pomoću jednog reflektora iz četiri zasebna primarna radijatora postavljena malo izvan žarišta. Signali iz ta četiri radijatora kombiniraju se operacijama zbrajanja i oduzimanja u tri kanala (sl. 32), od kojih jedan

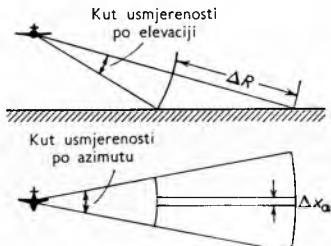
služi za indikaciju udaljenosti ($A + B + C + D$), drugi daje grešku azimuta [$(A + C) - (B + D)$], a treći grešku elevacije [$(A + B) - (C + D)$]. Svaki od ta tri kanala ima svoj zasebni prijemni lanac (sl. 33). Za signal zbroja primjenjuje se amplitudna detekcija, a signali se razlikuju privode faznim detektorima. Njima se referentni signal dovodi iz kanala zbroja. Budući da izlaz faznog detektora ovisi i o amplitudama i o predznacima međufrekventnih signala (minus znači fazni skok od 180°), za dobivanje ispravnog signala greške mora se amplituda referentnog signala držati konstantnom. Kako se mjerjenje i stvaranje signala greške kompletno završi za vrijeme trajanja jednog impulsa odjeka, koji je podložan fluktuacijama amplitude, to u svim kanalima mora postojati momentana automatska regulacija pojačanja MARP. Pojačanjem se upravlja iz kanala zbroja, jer amplitude kanala razlike ne ovise samo o amplitudi odjeka nego i o odstupanju od osi praćenja. Odašiljački impulsi se preko antenske skretnice AS privode kanalu zbroja, a to znači da se odašiljanje vrši u smjeru osi praćenja.

Radar sa sintetskom antenom

Za precizna snimanja terena iz zraka služi radar sa sintetskom antenom (sl. 34), smješten na nekoj letjelici (avionu, satelitu). Takav radar redovito služi za bočno osmatranje, tj. impulsi se odašilju u smjeru okomitom na smjer gibanja. Pretraživanje terena po udaljenosti (bočno) vrši se brzinom svjetlosti, a po azimutu (u smjeru gibanja) brzinom od ~ 50 m/s za avione i do ~ 8 km/s za satelite. Da bi se postigla velika rezolucija (razabirljivost sitnih detalja istog reda veličine kao pomoću optičkih instrumenata) po azimutu, antena bi u smjeru gibanja morala imati dimenziju od nekoliko stotina metara, što je, dakako, neizvedivo. Da bi se i s malom dimenzijom antene postigla velika rezolucija, primljeni radarski signal se na poseban način obraduje. Velika se rezolucija po udaljenosti postiže relativno lako upotrebom vrlo kratkih odašiljačkih impulsa.

Širina trake ΔR terena koji se želi snimati ovisi, grubo uvezši, o brzini v letjelice i željenoj rezoluciji u azimutnom smjeru Δx_a (sl. 34 dolje). Budući da je najsitniji detalj pri rekonstrukciji slike terena određen širinom (vremenom) uzimanja uzoraka, za vrijeme dok se letjelica pomakne u smjeru gibanja za Δx_a mora bar jedan odaslanji impuls prevladiti udaljenost ΔR tamo i natrag. To znači da je veza između širine trake i azimutne rezolucije izražena jednadžbom

$$\frac{2 \Delta R}{c} = \frac{\Delta x_a}{v} .$$



Sl. 34. Ozračavanja terena pri radu radara sa sintetskom antenom

Stvarna antena radara malih je dimenzija, tako da je azimutni kut usmjerenosti velik. Budući da se antena jednolikog giba, mogu se pojedini njezini položaji u prostoru shvatiti kao mjesto na kojima se nalaze elementi jednog fiktivnog antenskog niza. Sa svakog takvog mesta antena odašilje impuls, zatim ga prima i vodi u prijemnik gdje se mora uskladištitи, jer je za obradu potrebno imati istovremeno signale iz svih položaja antene koji čine fiktivni niz. Uskladišteni signali se obrađuju na način analogan načinom kojim bi se iz stvarnog linearog antenskog niza sa mnogo elemenata dobio signal. Budući da je ukupna duljina sintetske antene (fiktivnog antenskog niza) redovito velika, promatrani se objekti više ne nalaze u dalekoj, nego u Fresnelovoj zoni, što pri obradi treba uzeti u obzir. Sintetsku antenu treba stoga posebno "fokusirati" za svaku udaljenost.

Princip rada radara sa sintetskom antenom može se objasniti kako slijedi. Podatak o udaljenosti dobiva se na uobičajeni način iz vremenskog pomaka impulsa, a velika se rezolucija u azimutnom smjeru dobiva naknadnom obradom signala odjeka, koji je frekvencijski moduliran budući da sadrži vremenski promjenljiv Dopplerov pomak. Rekonstrukcija je modulacionog signala moguća jer je frekvencija uzimanja uzorka (repeticiona frekvencija radara) dovoljno velika.

Ako se prepostavi jedan točkasti cilj A, prema sl. 35, kojemu je udaljenost od točke C (s apscisom x_1) na pravcu leta aviona jednaka R_1 , signal odjeka primljen radarom u bilo kojoj točki na pravcu leta ima oblik

$$s_1(t) = A_1(t) \cos \left[\omega_0 \left(t - \frac{2R}{c} \right) + \varphi_1 \right],$$

gdje $A_1(t)$ predstavlja amplitudnu modulaciju sa repeticijom frekvencijom radara, ω_0 i φ_1 frekvenciju i fazu visokofrekventnog signala, R trenutnu udaljenost radara od točkastog cilja A. Ako se primjeni aproksimacija

$$R = \sqrt{R_1^2 + (x - x_1)^2} \approx R_1 + \frac{(x - x_1)^2}{2R_1}$$

i uzme u obzir jednoliko gibanje aviona $x = v t$, dobiva se

$$s_1(t) = A_1(t) \cos \left[\omega_0 t - \frac{4\pi R_1}{\lambda_0} - \frac{2\pi v^2}{\lambda_0 R_1} \left(t - \frac{x_1}{v} \right)^2 + \varphi_1 \right],$$

uz $\left| t - \frac{x_1}{v} \right| \leq \frac{1}{2} T$.

Trajanje signala odjeka T ograničeno je kutom usmjerenošću po azimutu i jednako je vremenu u kojem avion prevali put \overline{BD} . Ako na pravcu paralelnom pravcu leta aviona i udaljenom od njega za R_1 postoji niz ciljeva, reflektirani signal predstavljat će sumu svih odjeka, dakle

$$s(t) = \sum_i s_i(t) = \sum_i A_i(t) \cos \left[\omega_0 t - \frac{4\pi R_1}{\lambda_0} - \frac{2\pi v^2}{\lambda_0 R_1} \left(t - \frac{x_1}{v} \right)^2 + \varphi_i \right].$$

Kako je signal odjeka svakog cilja linearno frekvencijski moduliran (treći član u uglastoj zagradi), može se analogno metodi kompresije impulsa (opisanou na str. 702) izvršiti vremensko sabijanje. Na sl. 35 to bi značilo da su se točke B i D približile točki C, odnosno da je smanjen kut usmjerenošću u azimutnom smjeru, a to je ekvivalentno povećanje rezolucije.

Za svaki od pravaca paralelnih pravaca leta aviona s različitim udaljenostima R_1 treba posebno izvršiti kompresiju impulsa, što zahtijeva sustav za obradu signala s vrlo velikim brojem kanala. Najprikladnije je u tom slučaju signal uskladišti na filmu i zatim signale optički obraditi. Snimanje na film vrši se posredstvom katodne cijevi, u kojoj se intenzitet elektromagnetskog mlaza modulira primljenim signalom, a otklanjanje je sinhrono repeticijom frekvencije. Budući da signal sadrži i negativne poluperiode, a negativan intenzitet svjetlosti ne postoji, dodaje se istosmjerna komponenta.

Uzastopna pretraživanja po udaljenosti smještena su na filmu jedna pored drugih, što znači da zapis na filmu u poprečnom smjeru sadrži informaciju o udaljenosti, a u uzdužnom smjeru o azimutu. Pri zapisivanju na film vremenska je varijabla reflektiranog signala $s(t)$ pretvorena u prostornu, određenu udaljenostima uzduž filma. Takav »sirov« film podvrgava se koherentnoj optičkoj obradi samo u azimutnom smjeru. Ta obrada se može izvesti kao operacija vektorskog zbrajanja, kao operacija optimalnog filtriranja ili kao unakrsna korelacija. Postoje konfiguracije optičkih elemenata (u što se ovdje neće ulaziti) koje automatski izvode spomenute integralne transformacije. Kao rezultat optičke obrade dobiva se film s velikom rezolucijom u azimutnom smjeru.

Maksimalna moguća rezolucija u azimutnom smjeru ne ovisi o obradi signala, nego o dimenziji stvarne antene D_a u azimutnom smjeru. Najsitniji detalji su određeni relacijom

$$(\Delta x_a)_{\min} = \frac{D_a}{2}.$$

Važno je napomenuti da azimutna rezolucija ne ovisi ni o uđa-

jenosti ni o valnoj duljini elektromagnetskog vala, što se ne bi moglo postići s ekvivalentnom stvarnom antenom.

Maksimalna azimutna modulaciona frekvencija ovisna o Dopplerovom efektu iznosi

$$(f_m)_{\max} = \frac{2v}{D_a}.$$

Repeticija frekvencija radara ograničena je širinom ΔR trake terena koji se želi snimiti:

$$f_r \leq \frac{c}{2\Delta R}.$$

Pri osmatranju iz satelita, ΔR može biti mnogo manji od ukupne udaljenosti satelit-Zemlja. Kako se teži za što većom repeticijom frekvencijom, koja je ograničena gornjim izrazom a ne maksimalnom udaljenošću, neće biti sačuvana jednoznačnost u određivanju daljine. Da se ta mala otkloni, svaki se k -ti impuls (njihov broj ovisi o maksimalnoj udaljenosti) posebno kodira. Time je omogućeno da se »prepozna« kojem odašilačkom impulsu pripada pojedini impuls odjeka.

Kako je poznato, frekvencija uzimanja uzoraka mora biti bar dvaput veća od najviše modulacione frekvencije: $f_r \approx 2(f_m)_{\max}$, iz čega slijedi da minimalna duljina stvarne antene na letjelicu mora biti

$$(D_a)_{\min} = \frac{8v \cdot \Delta R}{c}.$$

Trajanje signala odjeka jednog točkastog cilja može se odrediti iz širine snopa stvarne antene. Ako se prepostavi da je antena po cijeloj svojoj duljini pobudjivana s konstantnom amplitudom i fazom, vrijeme da avion prevali put \overline{BD} na sl. 35, dakle razmak između nultočaka s obiju strana glavne latice, iznosi

$$T = \frac{2\lambda_0 R}{D_a v}.$$

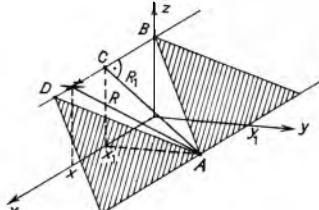
Ako postoje ciljevi koji se gibaju u odnosu prema terenu koji se želi snimiti, nastupit će kod obrade greška. Brzina svakog cilja može se rastaviti u dvije komponente, jednu paralelnu gibanju letjelice i jednu okomitu na taj smjer. Brzina u smjeru gibanja letjelice smanjuje, a brzina u obratnom smjeru povećava širinu pojasa azimutne modulacije u odnosu prema mirujućim objektima, što povećava, odnosno smanjuje, trajanje T signala odjeka takvog cilja. Kod pokretnog cilja, dakle, postoji neprilagodenje s obzirom na proces obrade koji je podešen za stacionarne ciljeve, pa će kompresija u azimutnom smjeru biti loša. Kod »bočnog« gibanja objekta dobiva se uslijed Dopplerovog efekta nelinearna modulacija, što ima za posljedicu da se slika cilja jako pomakne u azimutnom smjeru. Npr. pri snimanju iz satelita, automobil brzine 100 km/sat može se na slici terena pojavit pomaknut i do 1 km od svog stvarnog položaja.

Meteorološki radar

Radar može poslužiti i za otkrivanje područja s intenzivnim oborinama, jer one vrlo dobro reflektiraju elektromagnetske valove, a dobro izvježbani promatrač može na pokazivaču uočiti i mnoge druge meteorološke pojave. Za meteorološke se svrhe primjenjuju obično standardni tipovi osmatračkih radara.

Avionski meteorološki radari, koji služe za izbjegavanje opasnih olujnih područja, imaju dodatne sklopove za isticanje područja velike turbulencije. Naime, turbulencija i kiša, koju radar lako registriра, u uskoj su vezi. Međutim, korelacija ne postoji između intenziteta padanja kiše i turbulencije, nego između brzine promjene intenziteta padanja po jedinici dužine (njegovog gradijenta) i turbulencije. Što je veći gradijent intenziteta padanja kiše to su veće i turbulencije. Budući da amplituda signala odjeka direktno ovisi o količini oborina, na PPI-pokazivaču intenzitet odjeka bit će proporcionalan intenzitetu kiše. Nažalost PPI-pokazivač ima pre malo dinamičko područje svjetline, jer vrlo brzo dolazi u zasićenje, pa je razlikovanje po amplitudama nemoguće.

Avionski meteorološki radari koriste se za otkrivanje turbulentnih područja sklopovima kojih obilježavaju konture konstantnog intenziteta padanja kiše. Najjednostavniji i gotovo isključivo upotrebljavani sklop radi tako da, pošto je amplituda signala odjeka



Sl. 35. Tumačenje rada radara sa sintetskim antenom. A cilj; B, C, D uzastopne pozicije aviona; R, R₁ udaljenosti aviona od cilja

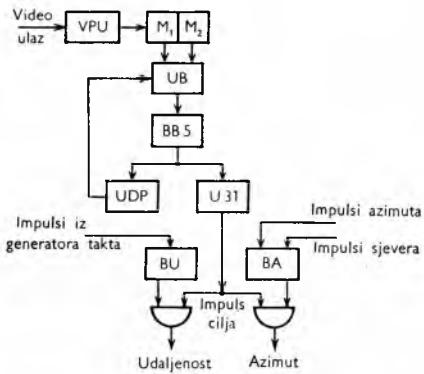
prešla određeni prag, zakoči izlaz video-signalu. Na PPI-pokazivaču će se pojaviti samo kontura kišnog oblaka, dok će njegova unutrašnjost biti tamna, što odgovara području u kojem je intenzitet padanja veći od unaprijed postavljenog praga. Vanjska granica konture kišnog oblaka odredena je pragom detekcije, a unutarnja granica namještenim pragom intenziteta padanja, koji je obično $10\cdots20$ dB iznad praga detekcije. Budući da isti intenzitet kiše na različitim udaljenostima od radara daje različite amplitude odjeka, avionski meteorološki radar mora imati sklop koji mijenja osjetljivost prijemnika u ovisnosti o udaljenosti. To znači da se između dva okidna impulsa vremenski mijenja pojačanje prijemnika, kako bi amplitudu odjeka identičnih kišnih oblaka bile jednake bez obzira na udaljenost.

Na temelju širine konture kišnog oblaka pilot može ocijeniti opasnost. Što je kontura uža, gradijent intenziteta padanja je veći, turbulencije su veće i područje je opasnije.

Antena radara smještena je redovito u kljunu aviona zaštićena dielektričnim plaštem aerodinamičkog oblika i ima mali horizontalni i vertikalni kut usmjerenosti. Ona rotira oko vertikalne osi, čime se ostvaruje osmatranje u horizontalnoj ravnini. Sam trup aviona ometa osmatranje, pa se ono ograničava na $\pm 120^\circ$ od smjera leta. Kod nekih se radara ravnina osmatranja može nagnuti, što omogućava promatranje meteoroloških prilika na različitim visinama. Da bi se izbjeglo iskrivljene slike na pokazivaču zbog kosog položaja aviona, često se primjenjuje sustav za stabilizaciju položaja antene. Preciznost stabilizacije određena je kutom usmjerenosti antene.

Digitalni radar

S naglim porastom zračnog prometa počinje se radi veće sigurnosti primjenjivati sve više automatizacija u kontroli leta. Radari za osmatranje (obično tipa MTI) moraju se u tom slučaju povezati s računalima koja sortiraju podatke o letu pojedinih aviona. Zbog velike količine računalu nepotrebnih informacija postavlja se između radara i računala *ekstraktor cilja* koji iz video-signala »filtrira« informacije o cilju. Ekstraktor cilja sadrži: sklopove za digitalizaciju video-signala (opisane u poglavljiju o detekciji signala odjeka), digitalni detektor i sklopove za obradu (registre, memorije, brojila, logičke sklopove i dr.).

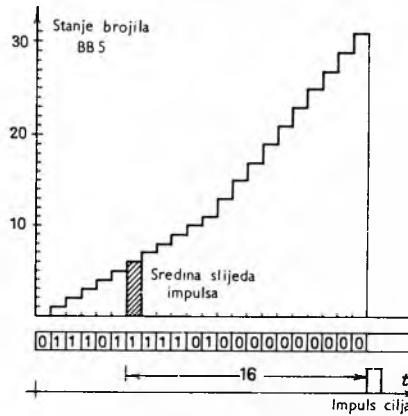


Sl. 36. Blok-shema digitalnog detektora. BA brojač impulsaz azimuta, BB5 binarno brojilo, BU brojilo udaljenosti, M₁ i M₂ multivibratori pomičnog registra, U31 sklop za uspoređivanje, UB upravljačko brojilo, UDP uspoređivanje s digitalnim pragom, VPU vrata prstena udaljenosti

Područje osmatranja radara koje se vidi na PPI-pokazivaču podjeli se na niz kružnih vjenaca jednakih širina (rezolucije po udaljenosti), tj. na tzv. *prstenove udaljenosti*. Kako se pri okrećanju antene odjeci jednog cilja nalaze unutar jednog prstena udaljenosti, bio bi potreban po jedan digitalni detektor za svaki prsten udaljenosti. Međutim, signali pojedinog prstena udaljenosti ne pojavljuju se istovremeno, a to znači da se može za sve prstenove upotrijebiti samo jedan digitalni detektor, s time da se signali na prikladan način uskladište u memoriju. Kapacitet memorije ovisi o broju prstenova udaljenosti i o broju impulsa odjeka potrebnih za obradu samo jednog cilja u digitalnom detektoru.

Digitalni detektor prikazan je blok-shemom na sl. 36. Na ulazu se digitalizirani video-signal propušta kroz vrata prstena

udaljenosti VPU, koja se otvaraju uvijek s jednakim kašnjenjem u odnosu prema okidnom impulsu. Time je garantirano da samo impulsi istog prstena udaljenosti ulaze u detektor. Slijed impulsu cilja vodi se na pomični registar, koji se sastoji od dva multivibratora M₁ i M₂. U trenutku kad M₁ prima novi podatak, stari se prebacuje iz M₁ u M₂. Ako se ili M₁ ili M₂ nalazi u položaju 1 (impuls cilja postoji), upravljačko brojilo UB broji i pomiče se za jedinicu. To znači da se u slijedu impulsa odjeka može premostiti »rupa« nastala gubitkom jednog impulsa odjeka. Upravljačko brojilo pobuduje binarno brojilo BB5 (u primjeru na slici 37 ono ima 5 mesta). Upravljačko brojilo broji s korakom 1 sve do posljednjeg impulsa odjeka, nakon kojeg udvostručava brzinu brojenja ako je iz sklopa za uspoređivanje s digitalnim pragom UDP dobilo obavijest da je prag (u primjeru na slici $k_0 = 9$) pređen. Ako digitalni prag nije dosegnut, oba brojila UB i BB5 vraćaju se na nulu. Kad binarno brojilo BB5 dosegne krajnju vrijednost 31, sklop za uspoređivanje U31 odašilje impuls cilja. Ako se pogleda vremenski dijagram brojanja na sl. 37, vidi se da je odaslan impuls cilja uvijek pomaknut za 16 širina impulsa od sredine slijeda impulsa, koja se iskorištava za određivanje smjera po azimutu.



Sl. 37. Vremenski dijagram brojenja brojila BB5 u digitalnom detektoru radara i impuls cilja

Smjer azimuta određuje se u odnosu prema jednom referentnom smjeru (obično prema sjeveru). Kut u odnosu prema tom smjeru dobiva se pomoću jedne ploče koja rotira zajedno s antenom, a na sebi ima raster željene finoće. Fotoelektričnim postupkom dobiva se slijed impulsâ od kojih svaki predstavlja minimalnu kutnu jedinicu. Brojenjem impulsâ u brojilu BA počevši od referentnog smjera azimuta dobiva se u digitalnom obliku podatak o azimutu cilja.

Udaljenost se dobiva očitavanjem brojila BU, koje počinje brojiti iznova kod svakog odašiljačkog impulsa. Impulsi iz generatora taka koji pobuduju to brojilo duljine su odašiljačkog impulsa, tako da je najmanja jedinica po udaljenosti jednaka rezoluciji.

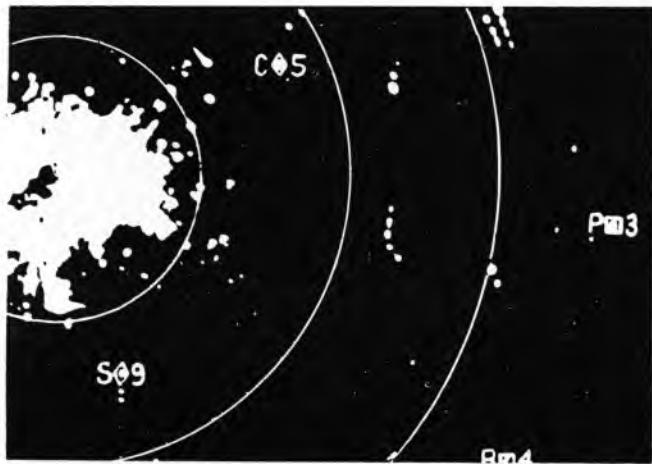
Memoriranje i kruženje podataka prije i nakon prolaza kroz digitalni detektor ovdje neće biti opisano, jer je slično kao i kod drugih računala.

Obično se osim u obliku digitalnih podataka cilj prikazuje i na običnom PPI-pokazivaču. Postoji mogućnost da se svakom pokretnom cilju na ekranu pridruži jedan znak (kružić, kvadrat, romb, križić, zvjezdica, neki broj i sl.), koji se elektronički generira i pomiče po ekranu zajedno s ciljem (sl. 38). Time je vizuelno praćenje određenog cilja u mnoštvu drugih jako olakšano.

Za kontrolu svih logičkih operacija posljednji prsten udaljenosti zatvori se za video-signal, ali otvori se za prolaz posebnog test-signala kojim se trajno ispituje ispravnost cijelog sustava. Test-signal zadovoljava uvjet praga detekcije, pa detektor u određenom trenutku mora emitirati impuls test-cilja. Ako se impuls test-cilja ne pojavi, ili je vremenski pomaknut od mesta kada bi trebalo da se pojavi, daje se signal za uzbunu.

Smanjenje smetnji. U područjima jakih smetnji (bliski objekti, oborine) mijenja se prag detekcije, kako se cijeli sustav ne bi opteretio prevelikom količinom informacije koja sadrži mnogo lažnih

ciljeva. U tim se područjima prag detekcije postavlja prema amplitudi signala smetnji. Maksimalna udaljenost radara podijeli se na određeni broj jednakih dijelova, npr. područja od po 8 prstenova udaljenosti. U svim područjima se na pomoćnim sklopovima vrši digitalizacija video-signala uspoređivanjem s konstantnim pragom.



Sl. 38. Dio slike radarskog PPI pokazivača. Na slici se vide odjeci zemljista (lijevo), odjeci usidrenih i plovećih brodova (između prvog i drugog daljinskog prstena) i odjeci aviona (nizovi svjetlećih točaka) i ciljevima pričvršćeni znaci (kvadrat, romb, slova i brojke)

Broj impulsâ dobivenih u svakom području mjerilo je nivoa smetnji. U svakoj se periodi osmatranja na temelju memoriranog broja impulsâ iz prethodne periode postavlja prag za digitalizaciju video-signala koji se kasnije obraduje. Na PPI-pokazivaču je pri promatranju ovako dobivenog signala raspodjela smetnji po cijelom zaslonu jednolika.

Prijenos podataka digitalnog radara. Na izlazu digitalnog radara dobivaju se signalni ciljevi u nepravilnim vremenskim razmacima. Minimalni razmak dvaju ciljeva jednak je dvostrukoj širini impulsa (nakon pojave impulsa slijedeći prsten udaljenosti je blokirani), a srednji je vremenski razmak dvaju ciljeva daleko veći. Naime, za vrijeme jednog okreta antene, koji traje npr. 10 s, obuhvatit će se svi ciljevi u području dometa радара, a to nije više od ~ 100 . Može se pretpostaviti da će biti približno isto toliko i lažnih ciljeva, pa srednji razmak dvaju ciljeva iznosi $10\text{ s}/200 = 50\text{ ms}$. Ako se primijeni pomoćna memorija dovoljnog kapaciteta, može se nepravilan slijed podataka o ciljevima pretvoriti u pravilan (s međusobnim razmacima približno jednakim srednjem razmaku ciljeva).

Pravilan slijed svih podataka o cilju može se smjestiti sigurno u format od 32 bita. Ako se u interval od 50 ms moraju smjestiti 32 bita, to je 640 bita u sekundi, što se može prenijeti telefonskim kanalom. Dakle radarski video-signal širine nekoliko megaherca moguće je nakon digitalizacije prenijeti običnim telefonskim vodom.

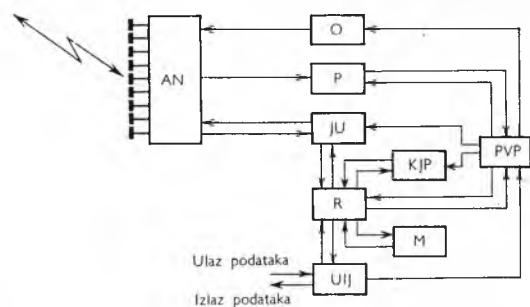
Digitalni radar smije u jedinici vremena registrirati samo toliko ciljeva koliko ih može primiti prijenosni kanal. Broj ciljeva se regulira pragom detekcije. Kao mjerilo reguliranja praga služi srednji sadržaj pomoćne memorije. Za što bolje iskorištenje prijenosnog kanala povoljno je da memorija bude stalno gotovo puna, što, međutim, povećava vjerojatnost da će podatak o cilju naći na punu memoriju i biti izgubljen. Prema tome srednji sadržaj pomoćne memorije treba odabrat kompromisno.

Za osmatranje šireg područja može se više digitalnih radara povezati na jedno računalo. Pri takvom multiradarskom osmatranju zajedničko računalo vrši slijedenje svih letova, a posebno je važno područje preklapanja dvaju radara. Smetnje ili prekidi od nekoliko sekundi u kanalu do računala mogu potpuno one-mogući automatsko osmatranje zračnog prostora. Pomicanje podataka o cilju za jedan ili više koraka nije dozvoljeno, jer računalo radi u realnom vremenu. Zbog toga se na prijenosni kanal (sklopove za modulaciju i demodulaciju + telefonski vod) postavljaju ostri zahtjevi u pogledu grešaka i sinhronizacije.

Radar s električnim usmjeravanjem elektromagnetskog zračenja

Obični radarski sustavi primjenjuju za usmjeravanje elektromagnetskog zračenja na cilj mehaničko pomicanje antene, a time i glavne laticice. U novije se vrijeme upotrebljavaju i radari s antenom koja miruje, a usmjeravanje zračenja postiže se električkim elementima. Prednost je električnog usmjeravanja zračenja što se može vrlo brzo pomaknuti (bez inercije mehaničkih dijelova) smjer zračenja i istovremeno pratiti više ciljeva pomoću više simultanih glavnih latica dobivenih iz jednog antenskog sustava. Takvi radari služe primarno za praćenje balističkih projektila, a zatim za satelite i avione. Njihove se antene sastoje od velikog broja (čak od više desetaka hiljada) elemenata (dipola, helikoidnih antena, lijevak-antena i sl.). Svi su elementi povezani tako da se njihovi međusobni fazni pomaci (ili vrijeme kašnjenja) vremenski mijenjaju, što dovodi do pomicanja glavne latice. Upravljanje se mora vršiti računalom, jer su zahtijevane brzine vrlo velike. Fazno pomicanje može se postići bilo kontinuirano bilo u skokovima. S obzirom na veliki broj elemenata u anteni, vjerojatnost da će zakazati antena gotovo je jednaka nuli, jer se istovremeno može desiti kvar samo na određenom broju elemenata, a to samo neznatno pogoršava karakteristiku. Velik broj elemenata zahtjeva kontinuiranu provjeru ispravnosti, što je moguće ostvariti samo računalom.

Za ilustraciju složenosti radara s električnim usmjeravanjem dana je na sl. 39 funkcionalna blok-shema takvog radara. Podaci se daju i dobivaju preko ulazno-izlazne jedinice UIJ, koja u određenom trenutku aktivira radar. Računalo R odabire koordinate po određenom programu, transformira ih u prikladan oblik i daje ih jedinici za usmjeravanje JU. Ta jedinica predstavlja specijalno računalo koje svakom antenskom elementu namješta fazu tako da se maksimalno zračenje dobije u odabranom smjeru. Procesor video-podataka PVP, koji takođe dobiva analog iz računala, daje okidni impuls za aktiviranje odašiljača O, koji preko antenskog niza AN zrači u prostor. Osmatrani sektor ispituje se ovisno o funkciji radara. Signal odjeka dobiva se iz prijemnika P u analognom obliku. Procesor video-podataka pretvara te podatke u digitalni oblik i daje ih računalu na obradu. Računalo na temelju dobivenih podataka donosi zaključke o položaju i brzini cilja koji su najbliži stvarnim vrijednostima.



Sl. 39. Funkcionalna blok-shema radara s električnim usmjeravanjem zračenja. AN antenski niz, JU jedinica za usmjeravanje, KJP kontrolna jedinica s pokazivačem, M memorije, O odašiljač, P prijemnik, PVP procesor video-podataka, R računalo, UIJ ulazno-izlazna jedinica

Ciljevi se, već prema tipu radara, prate simultano ili u vremenskom multipleksu. Jedinica za usmjeravanje JU sadrži i sklopove za automatsku kontrolu ispravnosti antenskog niza. Kontrolna jedinica s pokazivačem KJP omogućava praćenje cilja na zaslonu i odabiranje vrste rada, kao: normalno osmatranje, ispitivanje, ili kalibracija cijelog sustava. Dobiveni podaci o cilju mogu se ili uskladištiti u memoriji M ili preko ulazno-izlazne jedinice prenijeti u određeni centar.

Antena radara koji treba da osmatra cijeli prostor iznad zemlje sastoji se od 3 do 4 zasebna niza, od kojih svaki ima mogućnost osmatranja 120° ili 90° po azimutu. Može se upotrijebiti također kombinacija mehaničkog okretanja niza po azimutu i električnog usmjeravanja po elevaciji. Za prijem i odašiljanje mogu se primijeniti iste ili zasebne antene. Zasebne antene imaju prednost u slučaju kad se želi upotrijebiti drugačiji kut usmjerenoosti i

drugačija funkcija osmatranja za odašiljanje i za prijem. Jedna glavna latica ima prednost, ali se više ciljeva može pratiti jedino u vremenskom multipleksu. Ako su očekivane brzine ciljeva velike, primjenjuje se više simultanih latica.

Ometanje i maskiranje

Sve mjere koje se poduzimaju u ratnim uvjetima da se one mogući detekcija stvarnih ciljeva zovu se elektroničke protumjere ili ECM (engl. Electronic Counter Measures). Jedan od vidova tih mjera je *ometanje rada radara*, a bazira se na stvaranju lažnih ciljeva ili na potpunom onemogućavanju praćenja cilja. Za tu se svrhu primjenjuju tzv. *aktivni i pasivni ometači*.

Aktivni ometači služe za generiranje signala koji u radarsku izazivaju lažne ciljeve ili jake smetnje i time zbunguju protivnika.

Ometači koji stvaraju umjeren broj signala imaju za cilj da promatrač na ekranu pokazivača vidi veći broj ciljeva a da pri tome nije svjestan toga da je radar ometan. Budući da čovjek ne može pratiti veći broj ciljeva, promatrač se mora odlučiti za neke od njih, pri čemu je velika vjerojatnost da su upravo ti ciljevi lažni. Maksimalno zbungivanje se postiže kad su lažni odjeci iste amplitude kao i stvarni, a to znači da snaga takvih uređaja ne mora biti velika.

Odgovarač-ometač nakon što je primio radarski impuls odašilje s vremenskim zakašnjenjem jedan ili više impulsa. Kašnjenjem je postignuto da se azimut i udaljenost lažnog signala razlikuju od stvarnog. Odgovarač se može programirati da odašilje samo u trenucima kad je ozračen sekundarnim laticama antene.

Ometač praćenja po udaljenosti je odgovarač koji u početku svog rada neposredno nakon prijema radarskog impulsa odašilje signal koji je mnogo veći od odjeka cilja na kojemu se nalazi. Pošto je radar za praćenje uhvatio cilj, odgovarač odašilje impulse sa sve većim i većim zakašnjenjem u odnosu prema primljenim impulsima. S obzirom na to da je lažni odjek mnogo snažniji od stvarnog, radar prati taj lažni odjek. Vremenski pomak se može povećati toliko da nakon isključenja ometača radar više ne može „uhvatiti“ stvarni cilj. U tom slučaju treba preći sa praćenja na osmatranje da bi se ponovo pronašao cilj.

Ometanje praćenja po kutu pri koničnom osmatranju (v. str. 705) postiže se odašiljanjem signala čija je frekvencija jednaka frekvenciji koničnog osmatranja. To će izazvati smetnju u servosustavu za pokretanje antene i onemogućiti praćenje.

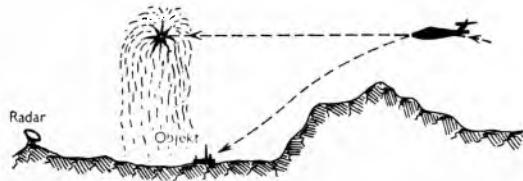
Smetnje koje potpuno onemogućavaju rad radara stvaraju se jakim uskopojasnim ili širokopojasnim ometačkim odašiljačima.

Uskopojasni ometači stvaraju najdjelotvornije smetnje. Kod njih se prijenosna frekvencija modulira „bijelim“ šumom (v. Šum, str. 627) kojemu se spektar proteže samo unutar širine pojasa prijemnika. Na taj se način jako poveća nivo šuma u prijemniku, što je isto kad se prijemnik ima velik faktor šuma. Ako je snaga smetajućeg signala dovoljno velika, cijeli zaslon pokazivača bit će ispunjen smetnjama i rad je nemoguć. Takav ometač vrlo je efikasan ako je točno poznata radna frekvencija radara koji treba ometati.

Širokopojasni ometač zrači šum u relativno širokom pojusu frekvencija, tako da je u mogućnosti paralizirati rad svih radara određene kategorije. Budući da ometajući signal sada ima vrlo širok spektar, mora snaga šuma takvog ometača biti mnogo veća nego snaga uskopojasnog ometača, ako se želi postići jednakna snaga šuma po jedinici frekvencije, tj. isti efekt ometanja. Širokopojasni ometajući signal može se postići direktnim pojačanjem visokofrekventnog šuma ili frekvencijskom modulacijom, gdje kao modulacioni signal služi bijeli šum.

Pasivni ometači ne generiraju niti pojačavaju elektromagnetsko zračenje, nego mijenjaju količinu reflektirane energije. Jedan od prvih oblika pasivnog ometanja iz aviona sastojao se od izbacivanja tankih *listića staniola*, koji su predstavljali dipole s dobrim refleksionim svojstvima. Ovisno o količini izbačenih listića mogao se ili proizvesti lažni cilj ili su se mogli velikim „oblakom“ listića maskirati avioni što dolaze. Budući da danas avioni imaju relativno velike brzine, lako je razlikovati listiće od stvarnog cilja (npr. MTI-radarom), pa se sada primjenjuju rakete punjene

listićima ili tankim žicama. To omogućava izbacivanje listića ispred (sl. 40), iza ili iznad aviona. Npr. oblak listića ispred aviona može na sebe privući radar za praćenje nakon što avion prode kroz njega. Upotrebljavaju se i *mamci* koji imaju slična refleksiona svojstva kao avion. Iako su mnogo manjih dimenzija, ne mogu se razlikovati od stvarnih ciljeva. Mamac se izbacuje iz aviona, a može da nosi i bombe. Ometanje rada s koničnim osmatranjem postiže se rotirajućim kutnim reflektorom koji izaziva fluktuacije amplitude odjeka. Uz povoljnu brzinu rotacije praćenje se može otežati ili čak onemogućiti.



Sl. 40. Shematski prikaz izbacivanja listića ili tankih žica raketom ispred aviona radi ometanja radara

Maskiranje je također jedan od vidova elektroničkih protumjera, a sastoji se u smanjenju refleksione površine stvarnog cilja ili postavljanju umjetnih ciljeva u takvom geometrijskom rasporedu da se ne može prepoznati stvarni cilj. Mala se refleksiona površina postiže plohama sa dyostrukom zakrivljenošću ili prevučenim apsorbirajućim materijalom koji prigušuje upadni val. Umjetni cilj mora, suprotno tome, imati veliku refleksionu površinu. U tu se svrhu upotrebljava kutni reflektor, leća za fokusiranje elektromagnetskih valova na vrlo visokim frekvencijama (Luneburgova leća) i Van Atta-niz (v. poglavje Antene, str. 621).

Elektroničke protuprotumjere ili ECCM (od engl. Electronic Counter-CounterMeasures) poduzimaju se radi sprečavanja elektroničkog ometanja. Ometanje uskopojasnog ometača izbjegava se promjenom frekvencije radara. Brzina izmjene frekvencije mora biti tolika da ometač nije u stanju da je slijedi. Poželjno je u idealnom slučaju mijenjati frekvenciju svakog odašiljačkog impulsa.

Ako postoji širokopojasno ometanje, mogu se pomoćnim prijemnikom odrediti frekvencijska područja koja su momentano minimalno ometana, pa se odašiljanje vrši na tim frekvencijama. Osim toga treba upotrijebiti mrežu radara koji rade u različitim frekvencijskim opsezima, što od protivnika zahtjeva posebne ometače za svaki opseg. Jednim se radaron može odrediti azimut ometača, ali udaljenost ne. Sa dva radara se, međutim, iz poznatih smjerova može dobiti lokacija ometača, a time i cilja koji treba uništiti.

Da bi radar bio što manje osjetljiv prema smetnjama, treba dimenzioniranjem njegovih sklopova sprječiti zasićenje ili preopterećenje prijemnika uslijed signala ometača. Dakle dinamika mora biti velika. Osim toga mora postojati mogućnost brze promjene frekvencije. Antena mora imati što veće potiskivanje sekundarnih latica ako se želi smanjiti ometanje iz smjerova koji se razlikuju od azimuta ometača. Da bi se u uvjetima ometanja moglo raditi, iako sa slabijim efektom, prijemnik mora biti građen tako da ima konstantnu vjerojatnost lažne uzbune, bez obzira na veličinu smetnji. Rad je i dalje moguć, ali sa manjom vjerojatnošću detekcije.

LIT.: L. N. Ridenour, Radar system engineering, New York 1947. — C. T. Coate, J. F. Reintjes, Principles of radar, New York 1952. — H. E. Penrose, R. S. H. Boulding, Grundlagen und Praxis der Radartechnik, Stuttgart 1958. — G. Bowen, Radar, Grundlagen und Anwendung, Berlin 1960. — D. J. Povejs, R. S. Raven, P. Waterman, Airborne radar, Princeton 1962. — A. C. Bušnitskij, Ocherk osnov radiolokacii po nепрерывном излучении радиоволн, Moskva 1961. — B. P. Peresada, Radiolokacijskaya vidimost' morskikh objektov, Leningrad 1961. — M. I. Skolnik, Introduction to radar systems, New York 1962. — W. Bopp, G. Paul, W. Taeger, H. Pouch, Radar, Grundlagen und Anwendung, Berlin 1962. — D. Barton, Radar system analysis, Englewood Cliffs, N. J. 1964. — G. J. Wheeler, Radar fundamentals, Englewood Cliffs, N. J. 1967. — Ch. E. Cook, M. Berndt, Radar signals. An introduction to theory and application, New York-London 1967. — A. W. Rihaczek, Principles of high-resolution radar, New York 1969. — E. B. Kuz'min, Monoimpul'skaya radiolokacija, Moskva 1969. — R. O. Harger, Synthetic aperture radar systems: theory and design, New York 1970. — A. A. Nemec, B. I. Fedotov, Osnovy radiolokacii i televizii, Moskva 1971. — E. H. Matijević, B. A. Gorjukov, Izmerenie karakteristika rasseyaniya radiolokacionnykh celей, Moskva 1972.

E. Zentner