

**ŠOLA ZA ČASTNIKE
XV. GENERACIJA**

NADZOR ZRAČNEGA PROSTORA

Zaključna naloga

PRINCIP DELOVANJA RADARJEV

Kandidat: vod. Damjan PERŠUH
Mentor: npor. Andrej GERJEVIČ

Ljubljana, marec 2006

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju npor. Andreju Gerjeviču za strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi naloge.

POVZETEK

V današnjem, zelo razvitem načinu vojskovanja, potrebujejo kopenske sile zelo hitro in zanesljivo zaščito na bojišču in podporo pred ofenzivnimi letali, helikopterji, kateri niso odkriti vse do trenutka, dokler je ponavadi že prepozno.

Odgovor na to so radarji. Predstavil sem delovanje radarjev, njihovo delitev, princip detekcije,...

Radarski elektronski sistemi se uporabljajo za lociranje letečih objektov izven radia vidljivosti in za določanje pozicije v prostoru le teh, s projeciranjem radijskih valov proti njim.

Termin »radar« izvira iz frazeologije »radio detection and ranging«. To ime se uporablja od zavezniških sil skozi drugo svetovno vojno, kot raznoliko sredstvo, zanimivo za iskanje pozicije z radijsko detekcijo.

Dasiravno je bil originalni razvoj radarja instrument vojne, radarje danes uporabljamo v širših mirnodobnih spektrih, kot navigacijske, za kontrolo zračnega prometa, spremljanje struktur meteoroloških stanj in sledenje vesoljskih plovil.

Ključne besede: radar, radarski sistemi, snop, mikrovalovi, identifikacija, frekvenca, valovna dolžina, valovod, antena, detekcija, oddaja, sprejem

SUMMARY

In the evolving battlefield, ground forces need rapid, reliable protection from attack aircraft and helicopters which are not detectable until it is almost too late.

The answer for this is radar. I have described radar principles of working, principles of radar detections,...

Radar, electronic system is used to locate objects beyond the range of vision, and to determine their location in the space, by projecting radio waves against them.

The term radar is derived from the phrase "Radio Detection And Ranging", and this name was used by Allied forces during World War II for a variety of devices concerned with radio detection and position finding.

Although radar originally is developed as an instrument of war, today is used extensively in many peacetime pursuits such as navigation, controlling air traffic, detecting weather patterns, and tracking spacecraft.

Key words: radar, radar system, beam, microwave, identification, frequency, wavelength, waveguide, antenna, detection, transfer, receive

KAZALO

1. UVOD	1
1.1 IZHODIŠČE ZAKLJUČNE NALOGE.....	1
1.2 NAMEN IN CILJI RAZISKAVE	1
1.3 METODE DELA.....	2
1.4 STRUKTURA NALOGE	2
2. ZGODOVINA RAZVOJA RADARJEV	3
2.1 PRED II SVETOVNO VOJNO.....	3
2.2 II. SVETOVNA VOJNA:.....	4
2.3 PO KONCU II. SVETOVNE VOJNE:.....	6
3. KAJ JE RADAR	9
4. DELITEV RADARJEV	10
4.1 DELITEV NA OSNOVI KONFIGURACIJE:	10
4.2 DELITEV PO PRINCIPU DELOVANJA:	10
4.3 DELITEV PO METODAH DETEKCIJE:.....	10
4.4 DELITEV PO TAKTIČNI UPORABI:.....	11
4.5 DELITEV PO DOSEGU:	12
4.6 RADARJI ZA NEVOJAŠKE POTREBE:	12
5. SESTAVNI DELI RADARSKEGA SISTEMA IN PRINCIP DELA LE TEH	13
5.1 ODDAJNIK.....	13
5.2 ANTENA.....	14
5.3 DUPLEXER.....	15
5.4 SPREJEMNIK (RECEWER)	15
5.5 PROCESOR (PROCESSOR)	16
5.6 PRIKAZOVALNIK (DISPLAY).....	16
6. PRINCIP DELA RADARJA	17
6.1 PRINCIP DELA PREPROSTEGA RADARJA	17
6.2 RADARSKA ENAČBA.....	19
6.3 ANTENSKA PASOVNA ŠIRINA.....	19
6.4 FREKVENCA PONAVLJANJA IMPULZOV	20
6.5 DOLŽINA IMPULZA IN VZORČENJE	21
6.6 FREKVENČNA AGILNOST	23
6.7 POVPREČNA RADARSKA POVRŠINA (<i>RADAR CROSS-SECTION</i>)	23
6.8 STALNI ODBOJI (<i>CLUTTER</i>)	24
6.9 ŠUM	24
7. TEORIJA RADARSKE DETEKCIJE	25
7.1 DETEKCIJA CILJA.....	25
7.2 PROCESIRANJE SIGNALOV IN PODATKOV	25
7.2.1 Lastnosti stalnih odrazov (<i>clutter</i>).....	26
7.2.2 MTI (<i>Moving target indication</i>) procesiranje	26
7.2.3 Tresholding.....	27
7.2.4 Procesiranje plotov.....	28
7.2.5 Pretvorba plota v track (<i>Plot - track association</i>).....	28
7.2.6 Inicializacija tracka.....	29
7.2.7 Spremljanje cilja (<i>tracking</i>)	29
8. SKLEP	30
9. LITERATURA	31

1. UVOD

Najpogostejša vprašanja, ki se porajajo vsakemu laiku so naslednja: »Kaj je radar?«, »Čemu služi?«, »Kakšna je njegova natančnost?«, »Ali oddaja ionizirajoče sevanje?«,...

Narava očitno drži primat nad vsakršno človekovo idejo. Netopirji so tisti, ki so učinkovito uporabljali zvočno zaznavanje in merjenje razdalj SONAR, že tisoče let, preden je človek zlezal na drevo in se razgledal po okolici. Zato velja biti previden in vsako idejo preveriti, ali ne obstaja že nekdo ali nekaj v naravi, ki že učinkovito izkorišča koncept, ki smo ga mi pred kratkim odkrili.

Podobno, kot v filmski industriji, kjer se celoten film lahko razdeli na 60 do 70 ključnih scen, se lahko razčlenijo tudi drugi problemi in na ta način že pridemo do manj kot 100 ključnih stvari, ki jih je potrebno dodobra poznati za razumevanje osnovnih principov delovanja radarjev in nekaj teh je zbranih v naslednjih poglavjih.

Termin »radar« se nanaša na vse, v zvezi z uporabo elektromagnetnih valov za ugotavljanje prisotnosti premikajočih se objektov in njihove pozicije. Termin označuje dva osnovna namena in sicer detekcijo objekta in njegovo lociranje.

Pri novejših radarjih je razvito še klasificiranje ali identifikacija cilja in celo izrisovanje cilja, kot je kartiranje terena s satelita.

Glavni princip delovanja radarja je v tem, da oddajnik pošlje v prostor radijski signal, ki se odbije od vsega, kar zadane (zemljišče, morje, ladje, letala, helikopterje, avtomobile,...) in le majhna količina te odbite energije se vrača v sprejemnik, ki je navadno (vendar ne vedno) lociran v neposredni bližini oddajnika. Po ojačitvi sprejetih signalov, se v procesorju signali obdelajo, tako, da se izločijo stalni in lažni odboji.

Radar se uporablja za zelo različne namene in sicer od merjenja razpok v zidovih, do sistemov dolgega dosega za proučevanje planetov v solarnem sistemu. Obstaja pa tudi sistem, ki deluje na podobnem principu kot radar, le da uporabljajo namesto elektromagnetnih valov zvočne valove. Te naprave so »sonarji«, ki se uporabljajo v podmorništvu, v medicinski ultrazvočni in pasivni detekciji.

Vsi radarski sistemi, se ukvarjajo z visoko frekvenco radijskih oddajnikov in sprejemnikov za pošiljanje signalov, ki temeljijo na principu elektromagnetnega sevanja valov valovnih dolžin od nekaj centimetrov pa do enega metra.

1.1 IZHODIŠČE ZAKLJUČNE NALOGE

Tema zaključne naloge je izbrana na osnovi razpisanih tem za izdelavo zaključnih nalog 15. generacije ŠČ, ki temelji na predstavitvi znanih dejstev o tehnološkem razvoju radarjev in principu delovanja le teh. Predmet proučevanja je princip delovanja radarjev.

1.2 NAMEN IN CILJI RAZISKAVE

Namen zaključne naloge je predstaviti princip delovanja radarjev in princip detekcije.

V nalogi sem poskusil seznaniti bralca z moderno tehnologijo na tem področju, in tudi predstaviti možnosti prihodnjega razvoja.

1.3 METODE DELA

Pri izdelavi zaključne naloge sem se v največji meri posluževala vsebinske analize pisnih in elektronskih virov, tako raznih priročnikov, zaključnih nalog, interneta, zakonov ter knjižnih publikacij.

V spodnji nalogi sem uporabil načelo enotnosti, načelo selektivnosti, načelo skladnosti, načelo enakomernosti in načelo raznovrstnosti.

1.4 STRUKTURA NALOGE

Nalogo sem razdelil na osem poglavij.

V uvodnem delu je poudarek predvsem na opredelitvi izbrane tematike zaključne naloge ter namenom in ciljem naloge.

V drugem poglavju sem predstavil zgodovinski razvoj radarjev. Poglavje sem dalje razdelil na čas druge svetovne vojne, na čas po drugi svetovni vojni in na današnji čas.

V tretjem in četrtem poglavju sem predstavil radar in opredelil delitev radarjev.

Peto poglavje je namenjeno sestavnim delom radarskega sistema.

V šestem poglavju sem razložil princip dela radarjev.

Sedmo poglavje je pa namenjeno teoriji radarske detekcije.

V osmem poglavju sem opisal bistvene ugotovitve.

V zadnjem poglavju je navedena literatura in viri iz katerih so črpane informacije.

2. ZGODOVINA RAZVOJA RADARJEV

Že od leta 1860 je britanski fizik James Maxwell predvideval obstoj radio valov (glede na Maxwellove enačbe), vendar pa sta obstoj teh valov dokazala neodvisno šele leta 1890 ameriški izumitelj Elihu Thomson in fizik Heinrich Hertz. Znanstveniki so kmalu odkrili, da se radio valovi odbijajo od objektov.

2.1 PRED II SVETOVNO VOJNO

Prvo idejo in patent za odkrivanje objektov s pomočjo radio valov je leta 1904 uresničil nemški inženir Cristian Hulsmeyer. Ideja se je nanašala na možnost boljše navigacije ladij v pogojih slabše vidljivosti. Njegova naprava je imela efektivni domet 1,5 km.

Srbski fizik Nikola Tesla je leta 1917 izdal opis radarja za odkrivanje podmornic, v katerem je opis najvažnejših delov takšnega radarja. V opisu je tudi specificirano, da bi takšna aparatura morala delovati na zelo kratkih valovih in v impulznem načinu delovanja.

Leta 1920 je predstavil italijanski radijski pionir Guglielmo Marconi svoj radarski sistem, ki je deloval na nizkih frekvencah (60MHz).

Nadaljni tehnološki razvoj na področju ultra kratkih radijskih valov in tehnološki razvoj na področju materialov, so pripeljali do možnosti konstrukcije posameznih delov (blok) radarja.

Tako so se začeli razvijati bistveni bloki radarja, ki so:

- oddajnik
- antenski sistem
- sprejemnik
- monitor ali prikazovalnik

Leta 1924 sta tako ameriška fizika in elektrotehnika Miles Barnett in Edvard Appleton izdelala prvo aparaturu, s katero je bilo mogoče odkrivanje in opazovanje ionosferskih slojev. Dejansko sta izvedla odboj radio valov od različnih slojev ionosfere.

Leta 1930 so znanstveniki v U.S. Naval Research Laboratory iz Washingtona D.C. prvi odkril letalo s pomočjo radio valov.

V letih 1930 do 1940 v vseh velikih državah spoznajo pomembnost in nepogrešljivost radarja za vojaške potrebe, in tako izdatno financirajo raziskave in razvoj ter eksperimente z novimi radarji. Vsaka država, ki je razvijala lastno radarsko tehniko, je prispevala k razvoju radarske tehnike. Do več bistvenih napredkov in odkritij je prihajalo istočasno ali v zamiku dveh let v več državah hkrati. Vsa odkritja so varovana v strogi tajnosti.

FRANCIJA: Prvi radarski eksperimentalni aparat sta leta 1934 skonstruirala Maurice Pounte in Henry Guton. Ta radar je deloval na 30 cm valovih in je lahko odkrival ladje, letala, hribe in ledene gore. Podoben radar, ki je deloval na samo 16 cm valovih je avgusta leta 1935 postavljen na potniško ladjo Normandija. V tem času so samo francozi uporabljali

decimetrsko valovno področje, medtem ko so vse ostale države eksperimentirale in izdelovale radarje do 1940 na metriskem valovnem področju.

VELIKA BRITANIJA: Spomladi leta 1935 si britanci izvedli uspešen praktični eksperiment z radarjem. Na osnovi teh eksperimentov je fizik Robert Watt predlagal izdelavo niza obalnih radarjev za obrambo pred zračnimi napadi. Leta 1936 je stekla njihova proizvodnja po odločitvi obrambnega ministrstva, in v marcu 1938 je začela na obali La Mansha delovati veriga petih kompletnih radarjev tipa CH. Ti radarji so delovali na valovni dolžini 12m in imeli 300 km dosega. Verigo radarskih sistemov pa so imenovali Chain Home. Leta 1938 so razvili letalski radar za odkrivanje ladij, tipa ASV in leta 1939 tudi letalski radar za prestrezanje, tipa AL.

V tem času sta britanska fizika Henry Boot in John Randall tudi konstruirala prvi resonančni magnetron (Resonant-cavity magnetron), ki se je pokazal kot najboljši izvor impulznega zračenja v decimetrskem in centimetrskim valovnem področju, saj so proizvajali visoko frekvenčni pulz z veliko močjo. Ti magnetroni so postali osnova za stalno izpolnjevanje in prednost britanskih in ameriških radarjev v teku II svetovne vojne. (britanci so po vstopu ZDA v II. svetovno vojno predali patente za resonančni magnetron tudi ZDA)

ZDA: Po prvem uspešnem radarju za opazovanje ionosfere, začnejo ZDA leta 1936 resno razvijati radarska sredstva. Leta 1937 je prikazan radar za spremljanje in navigacijo letal, leta 1938 pa že imajo v operativni uporabi tudi prvi namerilni radar tipa SCR-26. Radar SCR-26 je prvi radar, ki uporablja premikanje antenskega snopa. V novembru 1939 prikažejo novi uspešni radar za opazovanje na velike razdalje tipa SCR-270. Osnovni prispevek ameriške tehnologije na področju radarjev je uvedba premičnega snopa v odnosu na os cilja, s čimer se je povečala točnost merjenja kotnih koordinat (azimuta) in izdelava prvega opazovalno-namerilnega radarja za potrebe zračne obrambe.

SSSR: Leta 1938 dobijo enote ZO rdeče armade v oborožitev prve opazovalne radarje sovjetske proizvodnje tipa RUS 1 in REDUT, ki so že leta 1939 uporabljeni v Finsko-Sovjetski vojni.

NEMČIJA: Nemčija v času priprav na II. svetovno vojno intenzivno razvija radarske sisteme. Leta 1938 uvede v oborožitev ZO opazovalni radar FREYA, ki je deloval na valovnem področju 2,75 m z dometom 90 km. Leta 1940 uvedejo v oborožitev izpopolnjen opazovalni radar WARZBURG, ki je obenem služil tudi kot protiletalski namerilni radar. Zaradi Hitlerjevega zanimanja za druge vojaške projekte in orožja, razvoj radarjev v tistem času ni bilo pridodano toliko prioriteta, kot bi lahko bilo, vendar pa so prišli do tega spoznanja prepozno.

Za večino opazovalnih radarjev pred II. SV se lahko reče, da so premalo gibljivi, z ogromnimi antenami, ki opazujejo samo v fiksni smeri ali sektorju širine 50-90°, ter delujejo na metriskem valovnem področju. Namerilni radarji pa so bili velikanski in težki z zelo malo natančnostjo merjenja.

2.2 II. SVETOVNA VOJNA:

Druga svetovna vojna je prinesla ogromno povečevanje tempa v razvoju in uporabi radarja pri vseh v vojno vpletenih straneh. Vsaka država je delovala na tem področju samostojno in v

največji tajnosti, razen Velike Britanije in ZDA, pri katerima je obstajalo sodelovanje in izmenjava informacij.

ZDA: ZDA postanejo v tem času vodilna sila v smislu proizvodnje in razvoje radarske tehnike. Eden od osnovnih uspehov je izboljšanje resonančnega megatrona, ki so ga dobili od VB, s čimer so izkoristili prednosti decimetrskih in centimetrskih radio valov v primerjavi z metriskim. Ta prednost je zadržana do konca II. svetovne vojne. V času vstopa ZDA v II. svetovno vojno so izdelali veliko radarjev, ki so bili uporabljeni v vseh rodovih oboroženih sil. Tudi ob japonskem napadu na Pearl Harbor so imeli radar, s katerim so odkrili prihajajoče japonske bombnike, vendar so si odgovorni v radarskih postajah te prihajajoče cilje razlagali, kot svoja letala, ki se vračajo iz rednih poletov. Leta 1943 so imele enote ZO, mornarice in letalstva osnovne tipe radarjev v vseh enotah. Zelo uspešen je bil namerilni radar SRC-584, ki je ostal najboljši radar še celo desetletje po koncu II. svetovne vojne.

VELIKA BRITANIJA: V začetku vojne so imeli britanci v oborožitvi veliko število radarjev. Radarska mreža na kanalu La Mansha je bila v veliko pomoč RAF-u in lovcem Spitfire in je odigrala eno od pomembnih vlog pri zračnih bitkah za Britanijo. Tedanji opazovalno-namerilni radar 3MK7 je popolnoma zadovoljil potrebe obrambnih dejstev. Posebne uspehe pa so dosegli z konstrukcijo letalskih radarjev za navigacijo, letalskih namerilnih radarjev, radarjev za odkrivanje podmornic, ter radarskega sistema REBECA-EURECA, ki so ga uporabljali za precizno vodenje bombniškega letalstva.

NEMČIJA: V začetku II. svetovne vojne Nemčija ni zaostajala v razvoju radarskih sistemov za zavezniki. Proizvodnja radarjev je bila zadovoljiva do leta 1943, potem pa je prišlo do zastoja zaradi pomanjkanje generatorja moči (niso uporabljali resonančnega magnetrona). Radarji tipa MANHEIM so lahko zadovoljili potrebe protiletalskih lovcev, vendar so bili slabši od anglo-ameriških radarjev. Nemci so razvili široko uporabo radarjev v letalstvu, posebno v nočnih dejstvih lovskega letalstva. Za te potrebe so imeli široko razvito mrežo radarskih opazovalnih postaj z radarji tipa MAMMUT dometa 320 km in radarji WASSERMAN dometa 240 km.

SSSR: Nadaljevala je razvoj, uporabo in proizvodnjo radarjev, ki so jih uporabljali v Finsko-Sovjetski vojni. Opazovalne radarje so uporabljali v ZO na fronti in v zaledju, medtem ko v vojni mornarici in VL niso do konca II. svetovne vojne uporabljali radarjev v večjem obsegu. Do konca II. svetovne vojne so za svoje radarje uporabljali metrske radio valove, poglavitni razlog za to pa je bil, da niso imeli generatorja moči na dm in cm valovnem področju (magnetron).

JAPONSKA: Je zaostajala v razvoju radarjev in šele v začetku leta 1943 imajo nekaj radarske opreme. Njihovi radarji so bili slabi. Delovali so na metriskem valovnem področju do konca vojne, in niso odigrali nikakršne bistvene vloge v bojnih dejstvih.

2.3 PO KONCU II. SVETOVNE VOJNE:

Radarska tehnika ni več tretirana, kot izključno vojaška skrivnost. Napori so usmerjeni v uporabo radarjev v zračnem in pomorskem prometu. Radarje začnejo razvijati in uporabljati tudi manjše države (Švica, Švedska, Nizozemska, Italija, Češkoslovaška,...).

Na vojaškem področju se daje velik poudarek povezovanju opazovalnih, višinskih in namerilnih radarjev na daljavo s pomočjo aparatov za prenos podatkov, da bi se s tem povečala sposobnost obrambe pred reaktivnimi letali, ki jim skokovito narašča hitrost in višina letenja. Uvaja se avtomatizacija v opazovanju, merjenju in prenosu podatkov, s čimer se skrajšujejo reakcijski časi od odkrivanja ciljev pa do dejstva ZO.

Po letu 1950 se začne prva faza v razvoju radarjev, ki je spodbujena z vojaškimi potrebami in tehničnimi dosežki, ki jih prinaša hladna vojna. Vodenje, odkrivanje in opazovanje raket, satelitov in visokoletečega letalstva je možno uspešno doseči samo z uporabo radarjev. Povečan je domet opazovalnih radarjev, tako da lahko odkrivajo objekte, tudi zunaj zemeljske atmosfere. Prav tako so narejeni namerilni radarji za precizno opazovanje na velikih razdaljah s sposobnostjo odkrivanja hitro letečih ciljev, kakor tudi ciljev z majhno radarsko površino (RCS-Radar Cross Section). Tehnološki dosežki na področju elektronike so omogočili izpopolnjevanje radarjev. Proizvajajo se močne oddajne moči podobne magnetronom (amlitron, platinitron), ter močnostni klystroni. Polprevodniška tehnologija in tranzistorji se koristijo kot oscilatorji in ojačevalci na celotnem dm valovnem področju. Z iznajdbo gunnovih oscilatorjev se je izboljšalo generiranje mikrovalov male moči v cm valovnem področju.

Povečana je občutljivost sprejemnika, zmanjšano procesiranje šuma, znižan prag občutljivosti z uporabo nizkošumnih, molekularnih in parametričnih ojačevalcev.

V uporabo se uvajajo monopulzni radarji. Pri navadnih enokanalnih radarjih se informacija v cilju dobi šele po nizu impulzov, pri monopulznih radarjih pa sprejeti signal daje takoj informacijo o cilju. S tem je povečana točnost odkrivanja podatkov pri namerilnih in opazovalnih radarjih.

Radarji s sestavljenimi oddajnimi signali (znotrajimpulzno menjavo frekvence ali fazo modulacijo oddajnega impulza) so omogočili odkrivanje malih ciljev, dobro daljinsko razdvajanje ciljev in to na razdaljah tudi do nekaj tisoč kilometrov.

Radarji z večkratnim vzorčenjem bolje preiskujejo prostor, so manj občutljivi na elektronsko motenje in tako zelo zanesljivo odkrivajo cilje.

Tranzistorizacija velikega dela radarskih sklopov je omogočila, da se v radarjih zadržijo samo nekatere specialne radarske cevi (klystroni, twystroni,...), kot končne ojačevalne stopnje (FPA), medtem ko so skoraj vsi ostali sklopi radarja tranzistorizirani. Proizvajajo se tudi radarji, ki sploh ne uporabljajo več elektronskih cevi niti kot FPA (Final Power Amplifier) in se jim reče SOLID STATE radarji.

Miniaturizacija z uporabo integriranih vezij je zmanjšala dimenzije radarjev kljub večkratnemu povečanju elektronskih sklopov znotraj radarja in njihove zmoglosti.

Elektromehanične naprave za premikanje antene se zmanjšujejo. Uporabljajo se tudi nove tehnike za odklon antenskega snopa s pomočjo skeniranja prostora (Pencil Beam), kar pripomore k temu, da antena miruje, podatki o cilju pa so veliko bolj precizni.

Uvajanje računalniške tehnologije daje radarjem večje zmoglosti v procesiranju podatkov, kar pripomore k večji hitrosti odkrivanja, reagiranja in identifikaciji cilja v prostoru. S tem je omogočen še krajši reakcijski čas za enote ZO, prav tako pa omogoča posredovanje in obdelavo podatkov v OC, ki so od radarja oddaljeni tudi nekaj tisoč km.

Izpopolnjevanje radarjev se nadaljuje tudi danes (še posebno vojaških), saj se prav tako razvijajo materiali in tehnologije za izdelavo vojaških letal. Leta 1981 je poletel Lockheed F-117A (Night Hawk), ki je bilo prvo radarsko nevidno letalo (Stelth tehnologijo), leta 1989 pa tudi novi Northrop B-2 Stelth bombnik. Pred nekaj leti so američani prav tako izvedli uspešne polete s prototipi novih lovskih letal YF-22 in YF-23 baziranih na Stelth tehnologiji, ki naj bi prišla v oborožitev v začetku tretjega tisočletja. Tudi druge države dajejo poudarek pri razvoju nove generacije vojaških letal Stelth tehnologiji (SU-27, Evrofighter,...).

Slika 1: B-2 Stelth bombnik



Vir: http://www.globalsecurity.org/wmd/systems/images/b-2_769305.jpg

Slika 2: F-117A



Vir: http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/images/f-117_02-front.jpg

Radarji so našli svojo uporabnost na mnogih področjih. Poleg uporabe v vojaške namene so uporabljeni tudi v civilnem letalstvu in pomorstvu, kjer so prvenstveno namenjeni povečanju varnosti letenja in plovbe. Svojo praktično uporabnost so našli tudi v policiji, kjer jih policija uporablja za merjenje hitrosti vozil, pri nadzoru zemljišča,... Prav tako se veliko uporabljajo v meteorologiji po vsem svetu, saj zaradi uporabe Dopplerjevega efekta lahko zaznavajo gibanje majhnih delcev (vode, snega). V ZDA so leta 1990 postavili nacionalno mrežo meteoroloških radarjev, ki jo sestavlja preko 130 radarskih postaj, ki so v veliko pomoč pri napovedi vremena, še posebno pa ob morebitnih hurikanih in tornadih.

Veliko uporabnost so našli tudi v raziskovanju vesolja in same zemlje iz vesolja. Sateliti za raziskavo zemljine površine SEASAT, so pričeli radarsko topografiranje površine zemlje že leta 1970. Tako so se pridobili prvi digitalni reliefi površine zemlje (DEM, DCW), ki so našli veliko uporabnost na mnogih področjih. Sonda Magellan je leta 1990 s pomočjo radarja posnela večino površine planeta venera. Leta 2004 pa naj bi sonda Cassini, ki je namenjena proti Saturnu, s pomočjo radarskih instrumentov raziskala površino Saturnove lune Titan.

3. KAJ JE RADAR

Radar se nanaša na vse v zvezi z uporabo radijskih valov za ugotavljanje prisotnosti objektov in njihove pozicije. Beseda radar, prvič uporabljena s strani US Navy leta 1940, je izvedena iz *radio detection and ranging*, ki označuje dva osnovna namena in sicer detekcijo in lokacijo. Pri novejših radarjih je razvito še klasificiranje ali identifikacija cilja in celo izrisovanje slike cilja, kot je kartiranje terena s satelita.

Princip radarja je v tem, da oddajnik pošlje v prostor radio signal, ki se odbija od vsega, kar zadene (teren, morje, ladja, letalo) in majhna količina te odbite energije se vrača v radio sprejemnik, ki je navadno, vendar ne vedno, lociran zraven oddajnika. Po ojačevanju v sprejemniku so signali obdelani, da se izloči "clutter" in lažni odboji z uporabo elektronskega signal procesiranja in računalniškega *software-a* (*data processing*).

Radar se uporablja za več namenov, ki variirajo od nekaj centimetrov, kot je za merjenje razpok v zidovih, pa do sistemov dolgega dosega za preučevanje planetov v solarnem sistemu.

Obstaja tudi veliko sistemov, ki delujejo na podobnem principu kot radar, kot je sonar (uporablja zvočne valove namesto radijskih), medicinska ultrazvočna in pasivna detekcija.

Slika 3: Radar AN/TPS-70



Vir: Sejem sodobna vojska 2005 (predstavitev)

4. DELITEV RADARJEV

Radarski sistemi imajo različne karakteristike, zato obstaja več različnih delitev. Nobena od delitev pa ni zadostna in popolna.

4.1 Delitev na osnovi konfiguracije:

- **MONOSTATIČNA KONFIGURACIJA**
Radarski sistem uporablja za oddajo in sprejem isto anteno. Značilna konfiguracija za impulzni režim delovanja radarskega sistema.
- **BISTATIČNA KONFIGURACIJA**
Radarski sistem uporablja za oddajo in sprejem različni oz. ločeni anteni. Radarji običajno delujejo v režimu neprekinjenega sevanja - CW (continuous wave) radarski sistemi.

4.2 Delitev po principu delovanja:

- **AKTIVNI RADAR**
Oddaja in sprejem odbitega signala se vršita iz istega mesta. Antena je ena sama. Uporablja se za oddajo in sprejem. Princip aktivnega radarja je najpogosteje uporabljeni princip dela pri radarjih.
- **POLAKTIVNI RADAR**
Oddaja in sprejem odbitega signala se ne vršita iz istega mesta. Oddajnik uporablja za oddajo močnostnega signala svojo anteno. Sprejemniki lahko uporabljajo več anten na različnih lokacijah. Pogosto se uporablja za pokrivanje določenih sektorjev. Ni potrebe po rotiranju antene.
- **AKTIVNI RADAR Z AKTIVNIM ODGOVOROM**
Radarski cilj ima svoj sprejemnik in oddajnik (transponder). Doseg je odvisen predvsem od moči oddajnika na cilju in od sprejemnikove občutljivosti. Ni pa več odvisen od velikosti in od vrste cilja. Vprašalni signal (interogacija) je oddajni signal. Signal odgovora je signal, ki ga vrne cilj. Signal odgovora je nosilec različnih informacij (pripadnost, podatki o letu, višina...). Navadno mu pravimo sekundami radar. Vojaški namen je razločevanje med lastnimi in sovražnimi letali. Sekundarni radar sodeluje z letalom (pilot ga lahko tudi izključi).
- **PASIVNI RADAR**
Za odkrivanje ciljev se ne uporablja oddajni signal. Uporablja se le elektromagnetno sevanje, ki ga oddajajo cilji. Vsako »telo« oddaja neko obliko elektromagnetnega sevanja. Pasivni sprejemniki na Zemlji sprejmejo podatke, jih obdelajo in prikažejo.

4.3 Delitev po metodah detekcije:

- **IMPULZNI RADAR**
Preko usmerjene antene oddaja kratke visokofrekvenčne impulze v prostor. Oddajnik je aktiven zelo malo časa. Večina časa je namenjena sprejemanju šibkih odbitih

signalov od morebitnih objektov v prostoru. V času oddaje sprejemnik ni aktiven. Prednost so dobre karakteristike pri merjenju pozicije objektov v prostoru. Slabost je slaba detekcija hitrosti odkritih ciljev. Imajo eno anteno za oddajo in sprejem.

- **RADAR Z NEPREKINJENIM SEVANJEM**
Oddajnik neprekinjeno oddaja elektromagnetno valovanje. Radarski sistemi morajo imeti dve anteni. Eno za oddajo in drugo za sprejem. Zelo dobro merijo hitrost in smer gibanja objekta. Slaba je detekcija razdalje, ki je nenatančna.
- **IMPULZNO-DOPPLERJEV RADAR**
Je kompromis med prejšnjima dvema metodama detekcije. Možno je doseči odlične karakteristike odkrivanja objektov po razdalji, po smeri in merjenju hitrosti.

4.4 Delitev po taktični uporabi:

- **OPAZOVALNI RADARJI**
Namenjeni so pravočasnemu odkrivanju objektov v določenem prostoru. S pomočjo snopa elektromagnetne energije radar preiskuje določen prostor. Običajno odkrivajo smer (azimut) in oddaljenost cilja od radarskega sistema (razdaljo). Gre za 2-D opazovalne radarje. 3-D opazovalni radarji lahko ciljem določijo tudi višino. Opazovalni radar lahko izračuna hitrost gibanja ciljev.
- **NAMERILNI RADARJI (ZA SLEDENJE CILJA)**
Namenjeni so odkrivanju točnih koordinat ciljev. Pridobljeni podatki se prenesejo v računalnik, ki jih preračuna in usmeri določena orožja na posamezne cilje. Imajo sposobnost avtomatskega sledenja cilju. Morajo biti zelo točni in hitri pri obdelavi podatkov. Antenski snop tega radarskega sistema je zelo ozek. Parametri radarskega sistema se prilagajajo tipu orožja in vrsti ciljev (raketa zemlja-zrak, raketa zemlja-zemlja, raketa morje-morje, artilerijsko orožje...).
- **RADARJI ZA VODENJE (MISSILE GUIDANCE RADAR)**
Namenjeni so vodenju raket na nasprotnikove cilje. V svoji sestavi imajo ponavadi tri radarske snope, ki so potrebni za vodenje rakete:
 - širok snop (capture beam) - uporablja se za opazovanje cilja
 - srednje širok snop (guidance beam) - uporablja se za vodenje
 - ozek snop (track beam) - uporablja se za sledenje rakete v cilj
- **RADARJI SPECIALNEGA NAMENA**
Zagotavljajo podatke, ki jih ne morejo zagotoviti radarji, ki so povezani v radarske mreže oz. sisteme.
Radarji specialnega namena so:
 - navigacijski radarji
 - radarji za instrumentalno pristajanje letal (ILS)
 - radarji za instrumentalno plovbo ladij
 - meteorološki radarji
 - radarji za nadzor gibanja na letališčih in drugi infrastrukturi (SMR Surface Movement Radar)
 - radarji za raziskave zemlje (GPR - Ground Penetrating Radar)
 - radarji za odkrivanje ljudi

4.5 Delitev po dosegu:

- **RADARJI VELIKEGA DOSEGA**
Sem uvrščamo radarske sisteme, katerih izhodna moč visokofrekvenčnega oddajnega impulza znaša do 30 MW.
- **RADARJI SREDNJEGA DOSEGA**
Sem uvrščamo radarske sisteme, katerih izhodna moč visokofrekvenčnega oddajnega impulza znaša do 3 MW.
- **RADARJI KRATKEGA DOSEGA**
Sem uvrščamo radarske sisteme, katerih izhodna moč visokofrekvenčnega oddajnega impulza znaša do 1 MW.

4.6 Radarji za nevojaške potrebe:

- **METEOROLOŠKI RADARJI**
- **NAVIGACIJSKI RADARJI**
- **SATELITSKI RADARJI ZA PROUČEVANJE ZEMLJE, VESOLJA**
- **RADARJI ZA PROUČEVANJE SESTAVE SNOVI**
- **RADARJI ZA ZNANSTVENE NAMENE...**

5. SESTAVNI DELI RADARKEGA SISTEMA IN PRINCIP DELA LE TEH

Delovanje radarja bazira na oddaji in sprejemu elektromagnetne energije, ki je v obliki radio valov ali mikrovalov. Elektromagnetna energija se giblje skozi prostor v valovih s hitrostjo svetlobe. Karakteristike elektromagnetnih valov so odvisne od njihove valovne dolžine (frekvence). Gama žarki in X žarki imajo zelo majhno valovno dolžino. Vidna svetloba je le majhen del elektromagnetnega spektra, ki ima valovno dolžino večjo od X žarkov, vendar manjšo od mikrovalov. Radarski sistemi uporabljajo elektromagnetno valovanje, ki je v mikrovalovnem in radio področju elektromagnetnega spektra. Zaradi večje valovne dolžine od vidne svetlobe ali X žarkov se mikrovalovi in radio valovi bolje odbijajo od objektov, za razliko od le teh, ki so podvrženi, da povzročijo prevelik scatter (izotropni odboj v vse smeri in s tem premalo odboja nazaj v smeri proti sprejemniku), ali pa se celo absorbirajo preden dosežejo objekt, od katerega naj bi se odbili. Radio valovi z nižjo valovno dolžino na koncu elektromagnetnega spektra, pa so podvrženi refleksiji od ionosfere in celo od električno nabitih delcev v atmosferi.

Radarski sistem prične z oddajo EME, ki ji pravimo signal (oddajni signal ali pulz). Signal potuje skozi prostor in ima karakteristiko, da se odbija od objektov, ki jih sreča na poti. Na objektu, ki ga dosežejo na svoji poti, povzročijo efekt Scatter in le manjši del te odbite energije se vrne nazaj v smeri proti radarju in temu delu pravimo tudi radarski odboj, Echo ali Back Scattering. Radarski sistem sprejme ta signal in ga v odvisnosti od sofisticiranosti sistema le prikaže kot odboj, ali pa analizira tudi druge podatke, ki so sestavni del radarskega odboja. Čeprav se radio in mikrovalovi bolje odbijajo od ostalega dela elektromagnetnega spektra, se vme nazaj proti radarju le biljoninka ali celo manj oddane energije. Zaradi tega mora biti radar sposoben oddati veliko količino elektromagnetne energije, ter sprejeti zelo majhne vrednosti odbite energije.

Radarski sistem je sestavljen iz osnovnih sklopov ki so :

- oddajnik (Transmitter)
- antena
- duplexer
- sprejemnik (Receiver)
- procesor
- prikazovalnik (Display)

5.1 ODDAJNIK

Oddajnik proizvede elektromagnetni signal velike moči in končne oblike. Preko antene se ta elektromagnetni signal seva v prostor kot elektromagnetno valovanje. Antena prav tako sprejema odbiti signal od objektov, na katere je naletelo elektromagnetno valovanje in pošlje v sprejemnik, ki te signale obdela, ter jih pošlje na prikazovalnik, kjer se prikažejo. Prikazovalnik omogoča, da človek vidi odkriti objekt in podatke o njem.

5.2 ANTENA

Ojačani oddani signal se vodi iz oddajnika na anteno, katere funkcija je, da ta oddajni signal velike moči pošlje v prostor. Pri radarskih sistemih se pojavlja še dodatna zahteva, da se oddajni signal pošlje v prostor v usmerjenem snopu v določeni smeri. Zahteve po usmerjenosti antene so zelo velike, saj imajo ponavadi širino snopa po horizontali med 1 in 2°. Večina radarskih anten je sestavljenih iz sevalnega elementa in parabolično ali konkavno oblikovanega kovinskega diska, ki energijo odbije in usmeri. Takšnim antenam pravimo parabolične reflektorske antene.

Anteno ponavadi poganja motor, ki omogoča, da se vrtilni okoli svoje osi ali pa skenira po višini. S tem se omogoča, da se radarski snop oddajne energije pomika okoli svoje osi (horizontalno premikanje), ali pa skenira po višini (vertikalno premikanje). S tem se doseže, da energija lahko potuje v različne smeri in ni stalno usmerjena samo v eno smer ali točko. V novejšem času se antene proizvajajo tudi po drugačnih tehnologijah kot so reflektorske antene. Druge vrste radarskih anten so Planar array antene, Phased array antene in Slotted waveguide antene.

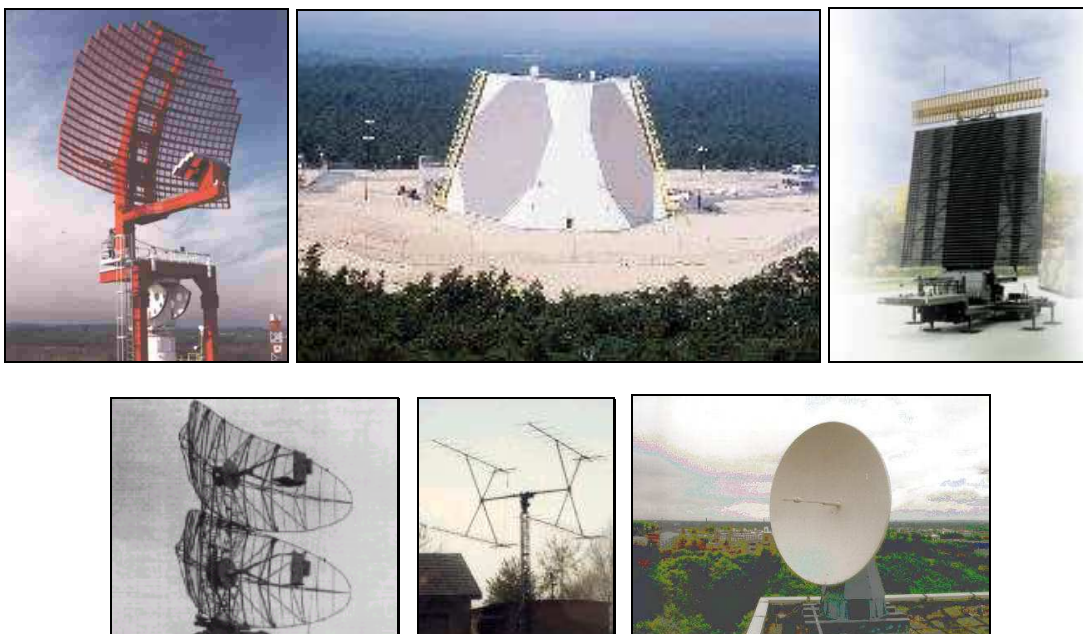
Antena ima tudi bistveno funkcijo pri polarizaciji oddajnega signala. Večina radarjev ima vertikalno ali horizontalno polarizacijo, čeprav se v novejšem času pri nekaterih radarjih uporablja tudi cirkularna (krožna) polarizacija.

Antena ima tudi funkcijo pri sprejemu odbitega signala od objekta, saj se odbiti signal sprejme preko antene. Odbito elektromagnetno valovanje se s pomočjo antene spremeni v električni tok, ki ga bo kasneje obdelal in analiziral sprejemnik.

Antena ima tri osnovne funkcije:

1. Usmerjevanje energije v določeni smeri s ciljem povečanja občutljivosti radarja v tej smeri.
2. Zagotavljanje širjenja impulza, tako da se lahko zagotovi pokritost določene površine.
3. Da dovoljuje kotna merjenja, tako da se lahko določi smer cilja.

Slika 4: Različne vrste radarskih anten





Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

5.3 DUPLEXER

Duplexer omogoča radarskemu sistemu, da lahko oddaja močen oddajni signal, ter sprejema zelo šibke signale odboja (echo). Glavna naloga Duplexerja je, da igra neke vrste vrata med oddajnikom in anteno ter sprejemnikom in anteno. Pri oddaji je njegova naloga, da pošlje močnostni signal na anteno, obenem pa preprečuje, da bi ta močnostni signal prišel tudi v sprejemnik. Če bi oddajni signal prišel direktno v sprejemnik, bi prišlo do zasičenja ali poškodbe le tega. Po koncu oddajnega pulza, bo duplexer preklopil pot z antene proti sprejemniku in tako omogočil sprejem radarskemu sistemu. Najbolj poznani duplexerji so CIRCULATORJI.

Radarski sistemi z neprekinjeno oddajo (continuous-wave radar), ki neprekinjeno oddajajo in sprejemajo signal nimajo duplexerjev, ampak uporabljajo dve ločeni anteni (eno za oddajo in drugo za sprejem).

5.4 SPREJEMNIK (RECEWER)

Po sprejemu odbitega signala s pomočjo antene se le ta pošlje v sprejemnik. Naloga sprejemnika je, da z obdelavo odbitega signala pridobi čim več podatkov o objektu, ki ga je radar zaznal. Sodobni radarski sistemi imajo tako več vrst sprejemnikov, ki v zaporedju obdelujejo odbiti radarski signal. Prvi v seriji je ponavadi Low Noise Amplifier (LNA), čigar naloga je, da čimprej po sprejemu ojača šibek signal odboja. Naslednji je Radio Frequency Receiver (RF Sprejemnik, ki bo ta odbiti signal obdelal z pomočjo STALO (Stabilni lokalni oscilator) signala (referenčni oddajni signal, ki je zmanjšan za vrednost medfrekvenčnega signala), ter se bo na izhodu pojavil signal, ki bo sedaj na neki medfrekvenci (IF - inremidiate frequency), v sebi pa bo še zmeraj imel podatke o Dopplerjevi frekvenci. Ta IF signal se vodi v IF Sprejemnik, ki ima nalogo, da ponovno meša IF signal s signalom COHO (Coherentni oscilator), tako da lahko poišče Dopplerjevo frekvenco. Prav tako je naloga IF sprejemnika, da na izhodu proizvede dva signala o odkritem objektu. Ta signala se imenujeta I in Q signal (Inphase in Quadri phase signal). Razlika med temi signali je v tem, da je Q signal po fazi zamaknjen za 90 stopinj v primerjavi z I signalom, s čimer se onemogoča, da bi prišlo do izgube informacij o odkritem objektu zaradi slepih faz. (Blind Phases).

Sodobni radarski sistemi so seveda digitalizirani in zaradi tega je potrebno pretvoriti analogne signale, ki so na izhodu iz IF sprejemnika v digitalno obliko, zato se uporablja A/D pretvornik, čigar naloga je, da analogni signal spremeni v digitalno obliko, ki se bo kasneje obdelovala v procesorju.

5.5 PROCESOR (PROCESSOR)

Procesor je namenjen procesiranju podatkov, ki jih je odkril radarski sistem. Procesor je del radarskega sistema, ki bo odločal o tem, kaj je stalni odboj, kaj je premična tarča, ter poskušal iz digitalne informacije pridobiti čim več podatkov o njej (odločitev o stalni ali premični tarči se odreja na osnovi Dopplerjeve frekvence). Glavna karakteristika procesorja je njegova zmogljivost. Celoten procesor mora biti konstruiran tako, da poteka obdelava signala v realnem času (Real time processing). To z drugimi besedami pomeni, da se vsi potrebni podatki, ki naj bi jih radarski sistem pridobil iz odbitega signala, pridobijo v najkrajšem možnem času, ki pa ne sme biti preveč dolg, kajti v nasprotnem ti podatki o cilju že zastarajo. Procesor ima tudi nalogo, da pripravi podatke o odkritih objektih, da se le ti lahko prikažejo na prikazovalniku, prav tako pa poskrbi, da se podatki o odkritih objektih lahko pošljejo tudi drugim uporabnikom.

5.6 PRIKAZOVALNIK (DISPLAY)

Naloga prikazovalnika je, da radarskemu operaterju ali uporabniku informacij prikaže odkrite objekte in podatke o njih. Prvi radarski sistemi so imeli preproste prikazovalnike, ki so zgledali kot prikazovalniki na osciloskopu. Na teh prikazovalnikih je bilo možno videti le amplitudo odbitega signala in oddaljenost odbitega signala od antene. Današnji radarji uporabljajo Plan Position Indicator (PPI display) prikazovalnike. Ti prikazovalniki že takoj dajejo nekaj več informacij o cilju, ki je odkrit. Poglavitna prednost je v tem, da se cilj prikaže prostorsko glede na os severa, na določeni razdalji od centra prikazovalnika, ki predstavlja dejansko pozicijo radarskega sistema. Nekateri PPI prikazovalniki uporabljajo še zmeraj amplitudno informacijo o odkritem objektu in tedaj pravimo, da prikazujejo surovo (RAW) radarsko sliko. Prikazovalniki v drugih radarskih sistemih pa prikazujejo digitalne simbole o odkritih objektih. Pravimo, da prikazujejo digitalno sliko.

Slika 5: Prikazovalnik radarja AN/TPS-70



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

6. PRINCIP DELA RADARJA

6.1 PRINCIP DELA PREPROSTEGA RADARJA

Glavni sklopi radarskega sistema so: oddajnik, antenski sistem, sprejemnik in prikazovalnik.

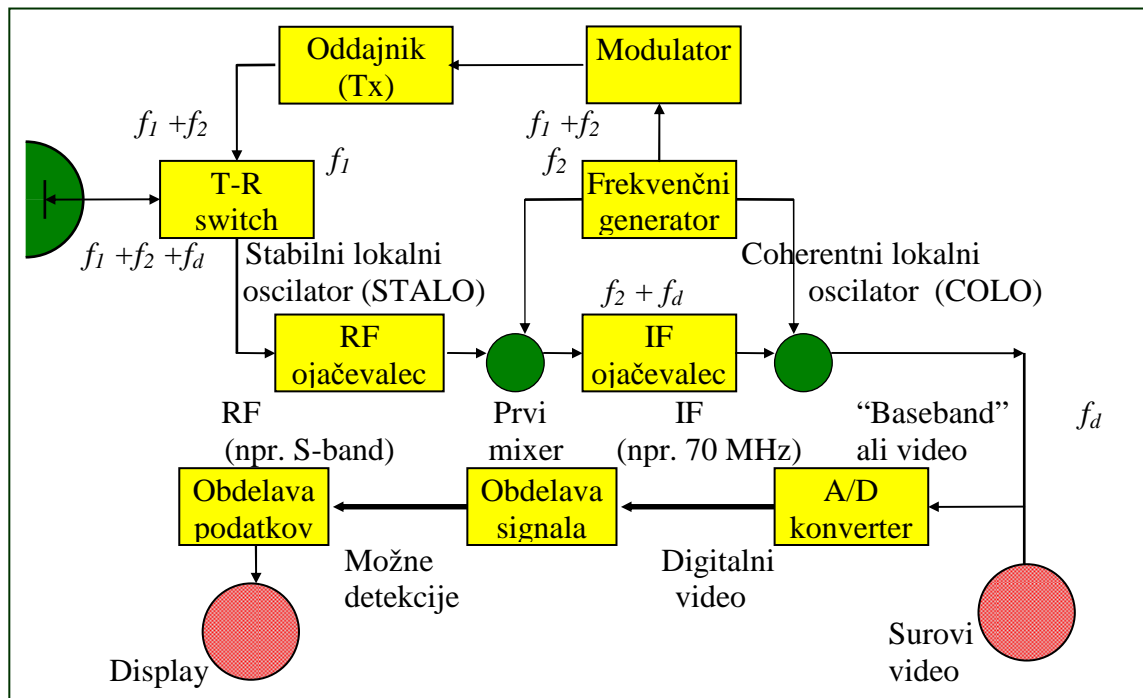
Slika 6: Radarja kratkega dosega EL/M-2106 HEE in radar dolgega dosega AN/TPS-70



Vir: Sodobna vojska 2005 (Predstavitev)

Slika 7 prikazuje preprost radarski sistem. Za ta primer smo izbrali impulzni radar. Osnovna radio frekvenca (RF) radarja, nosilni signal, je generiran v frekvenčnem generatorju. Ta kontinuirani signal je pulziran (vključen/izključen - navadno več časa izključen kot vključen) s pomočjo modulatorja. Kratki signali, ki so rezultat tega pulziranja so ojačeni v oddajniku in poslani na anteno preko preklopnika, imenovanega variabilni sprejemno-predajni preklopnik (T-R switch ali duplexer). Obstajajo različne izvedbe tega preklopnika, toda vse imajo dve osnovni funkciji: spajanje antene na oddajnik ali sprejemnik v določenem času in zaščito sprejemnika pred polno močjo oddajnega impulza.

Slika 7: Blok shema preprostega radarskega sistema



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Ko je impulz oddan, ura radarja začne meriti čas. Radarski impulz se oddaljuje od radarja s svetlobno hitrostjo. Odbije se od cilja in vrne v radar. Oddaljenost cilja, R (range), se nato lahko izračuna na osnovi zakasnitve signala. Ko se impulz vrne v radar, je sprejet na sprejemniku, ki mora biti zelo kvaliteten, da se čim manj vrnjene energije izgubi. Po ojačevanju in konverziji v medfrekvenco (IF), za katero je lažje izdelovati elektronske komponente, je signal detektiran in pripravljen za prikazovanje na displayu. *Plan position indicator* (PPI) je prikazovalnik, ki je večini ljudi najbolj poznan. Rotirajoči sledovi ustvarjajo krožno mapo, na kateri je radar predstavljen kot center ekrana, oddaljenost pa je prikazana kot oddaljenost od centra proti robu ekrana. Prikaz je lahko "surova" informacija, ki predstavlja vse odboje, ki jih je radar sprejel, toda v zadnjem času se v glavnem uporablja prikaz sintetizirane informacije, ki prikaže samo odboje, ki so pomembni za operaterja.

6.2 RADARSKA ENAČBA

Maximalni doomet radarja je mogoče izračunati po naslednji enačbi:

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 L_s}{(4\pi)^3 N(\text{SNR})} \right)^{1/4} \quad [\text{m}]$$

kjer je:

R_{\max}	- maksimalni doomet radarja	[m]
P_t	- vršna izhodna moč radarja	[W]
G_t	- faktor ojačanja predajne antene	[]
G_r	- faktor ojačanja sprejemne antene	[]
σ	- radarska površina cilja	[m ²]
λ	- valna dolžina	[m]
L_s	- sistemski faktor slabljenja	[]
π	- 3,14	[]
N	- povprečna moč šuma	[W]
SNR	- odnos signal/šum	[]

6.3 ANTENSKA PASOVNA ŠIRINA

Nadzor zračnega prostora nas postavlja pred dilemo: radar mora skenirati celoten zračni prostor in se čimprej vrniti v izhodiščni položaj. Istočasno pa bi moral čim dlje opazovati vsak del prostora, da bi dobili čim bolj natančne rezultate.

Najpogostejši izbor frekvence je L-band (» 1.3 GHz), ker s tem zmanjšamo vpliv slabega vremena, ki močno vpliva na delovanje pri višjih frekvencah. S-band (» 3 GHz) je največkrat uporabljen za opazovanje na srednjem dosegu do 60 NM (111 km). V praksi pa veliko faktorjev vpliva na končni izbor frekvence, na kateri bo deloval radar.

Pri dizajniranju antene imamo dve nasprotujoči si zadevi. Prva je, da uporabljamo čim ožje snope.

Pozitivne strani ozkih snopov:

- Kotna pozicija cilja je lahko izmerjena zelo natančno
- Število neželenih odbojev, ki motijo sliko je zmanjšano
- Število motečih signalov, ki lahko pridejo v snop je prav tako zmanjšano
- Faktorji ojačanja antene G_t in G_r v radarski enačbi se povečajo, kar poboljša odnos signal/šum in s tem omogoči lažjo detekcijo cilja.

Nasprotno pa ožji snop pokrije manjšo površino in tako zahteva pogostejše premike s pozicije na pozicijo, da bi lahko opazovali celo hemisfero (za širino snopa 3⁰ to znaša 2000 pozicij). Vsaka pozicija snopa mora biti preverjena najmanj vsakih 10 s, ker je to hitrost s katero morajo pritekati podatki za dobro spremljanje cilja. Če ima radar samo en snop, potem znaša opazovanje vsake posamezne pozicije samo 5 ms, kar je premalo za doseganje zadovoljive točnosti. Pri vojaških ciljeh se čas med dvema preverjanjema iste pozicije še zmanjša, zaradi hitrejših manevrov vojaških letal.

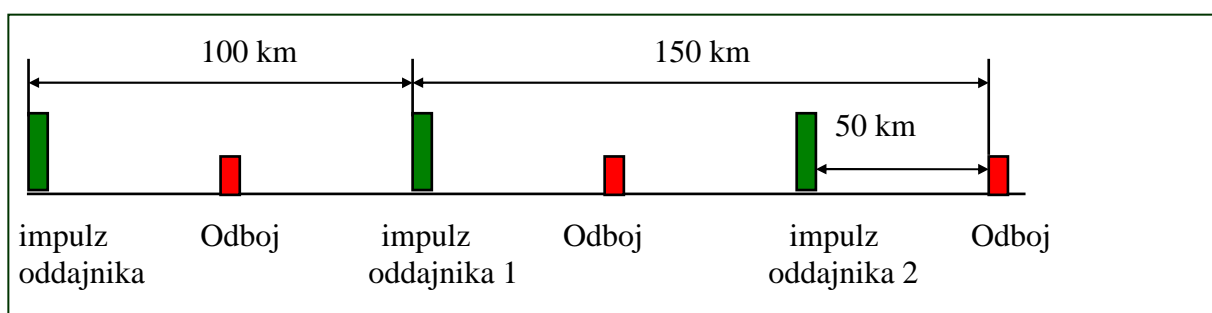
6.4 FREKVENCA PONAVLJANJA IMPULZOV

Večja ko je frekvenca ponavljanja impulzov (PRF), večja je srednja moč, ki jo oddajamo. Meja za PRF je postavljena s tem da se prvi oddani impulz še ni vrnil od cilja, oddali pa smo že drugega.

Če vemo, da impulz naredi 150 m v 1 μ s, potem bi bil maksimalni domet s PRF 1 MHz približno 150 m. Pri PRF 1 kHz se domet poveča že na 150 km.

Obstajajo še drugi načini za povečanje PRF, brez da bi s tem morali zmanjšati daljino odkrivanja. To so metode "označevanja" impulzov z drugačnimi frekvencami, fazami, polarizacijami ali impulznimi oblikami. Vendar se pri tem javljajo motnje pri dopplerjevem efektu, kot tudi pri MTI filtrih.

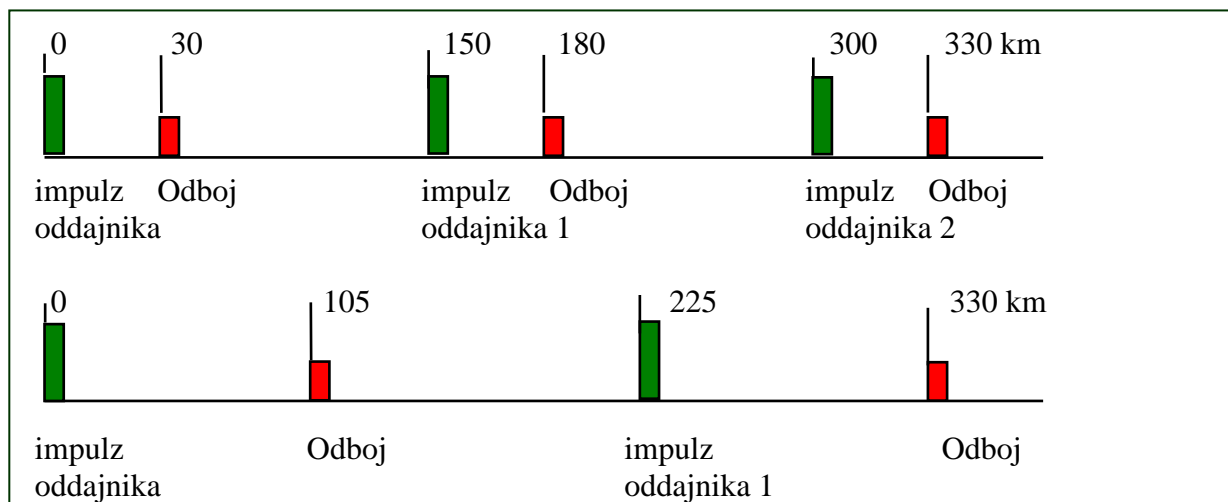
Slika 8: Radar z efektivnim dometom 100 km



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Zraven tega se lahko uporabljajo tudi razni "burst" in "stagger" načini, kjer se vsak paket impulzov pošilja na drugi PRF, pri sprejemu pa se potem primerjajo in tako se dobi stvarni odboj.

Slika 9: Uporaba dveh PRF - *burst mode* (dejanska daljina do cilja je 330 km)



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Radarji z nizko PRF imajo večje domete, vendar se pri teh PRF pojavi problem v določanju dopplerjevega faznega pomaka pri hitrostih novejših letal. Zato prihaja do pojava ti. *slepih hitrosti*, ko je pri določeni hitrosti cilj prikazan kot stacionaren, v resnici pa se premika.

Problem slepih hitrosti se rešuje z višjo PRF, vendar se tu pojavi problem *slepih oddaljenosti*, ko je sprejemnik blokiran zaradi oddaje drugega impulza.

Določeni radarski sistemi uporabljajo tudi *stagger* načine, ko je PRF od impulza do impulza drugačna.

6.5 DOLŽINA IMPULZA IN VZORČENJE

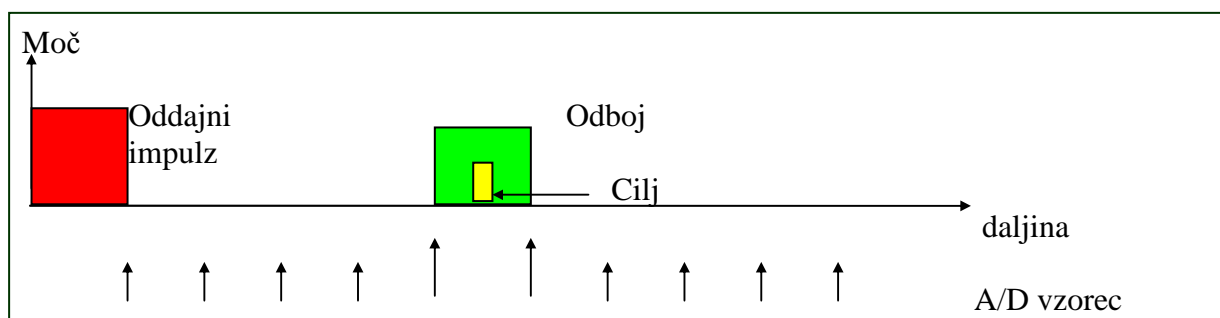
Dolžina oddajnega impulza vpliva na vzorčenje na izhodu sprejemnika, kar lahko povzroči težave pri digitalnem procesiranju signalov.

Pri impulzni dolžini 3 ms, ki je tipična za radarje dolgega dosega, lahko izračunamo, da je razločevanje po daljini okoli 450 m. V praksi je razločevanje precej slabše, okoli 750 m, zaradi oblike impulza in drugih izgub v sistemu. Nasprotno pa je daljina lahko izmerjena bolj natančno kot po izračunu (450 m), če imamo dober odnos signal/šum. Ta poboljšanja lahko dosežemo z dvema procesoma. Prvi je poznan kot *plot extraction* in se nanaša predvsem na interpolacijo daljine za vsak odboj. Drugi proces je *tracking*, ki predstavlja "mehčanje" dejanske poti cilja skozi več odbojev. Tako bo splošna točnost sistema po daljini znašala okoli 50 m, kar je adekvatno za radar dolgega dosega.

Izhod iz sprejemnika radarja bi moral biti vzorčen vsake 3 μ s, saj so takrat vzorci razdeljeni po čas/oddaljenost adekvatno dolžini oddajnega impulza (sl.10). Ker mora biti impulz odboja vsaj enake dolžine kot oddajni impulz, takšno vzorčenje zagotavlja, da nobena informacija ne bo izgubljena. Če je vzorčenje redkejše, lahko izgubimo nekatere, predvsem manjše cilje. S pogostejšim vzorčenjem, poznanim kot *oversampling*, pa lahko izboljšamo odnos signal/šum, vendar to zahteva veliko večjo procesno moč za majhno korist.

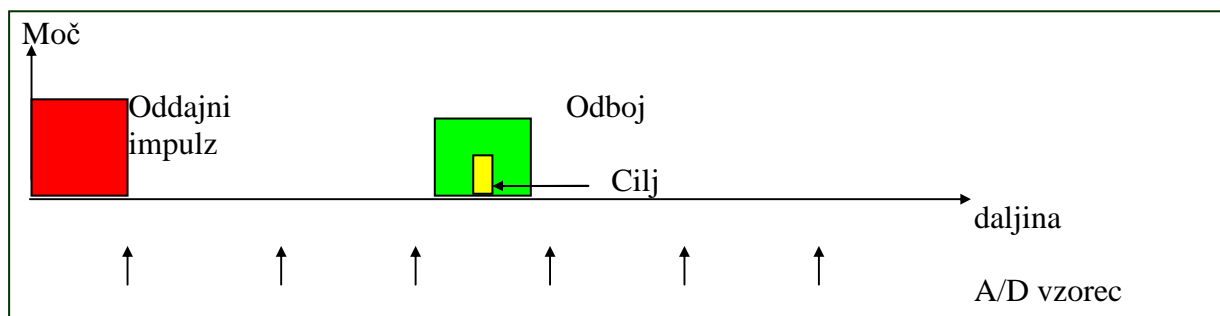
Pod vzorčenjem podrazumevamo A/D konverzijo, ki analogne vrednosti na izhodu sprejemnika spreminja v digitalne, ki jih računalniki lahko obdelajo. Za 3 μ s vzorčenje potrebujemo 333 kHz A/D konverter.

Slika 10: Vzorčenje 3 μ s (cilj detektiran)



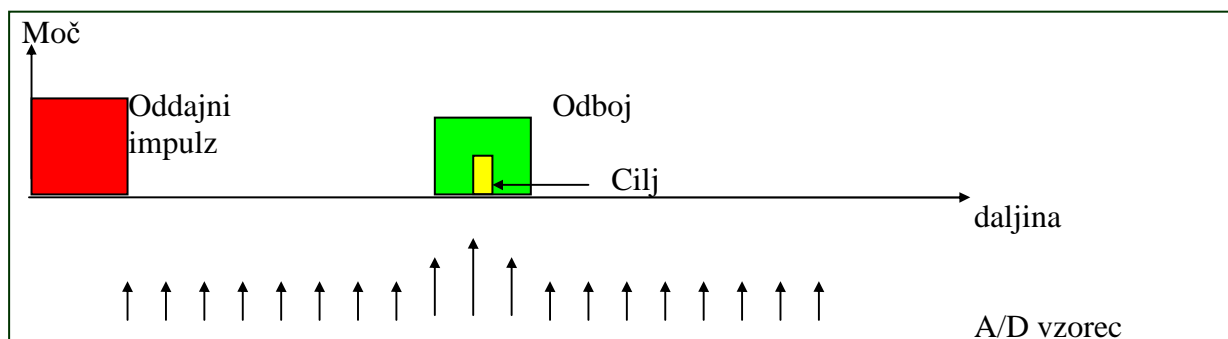
Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Slika 11: Vzorčenje $> 3 \mu\text{s}$ (cilj izgubljen)



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Slika 12: Vzorčenje $< 3 \mu\text{s}$ (oversampling)



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Radarski sistemi morajo imeti *high dynamic range*, kar pomeni, da morajo biti sposobni razlikovati velike odboje od bližnjih objektov (pogosto motenj), istočasno pa tudi prepoznati oddaljene majhne objekte. Čim večji je ta razpon na izhodu iz sprejemnika, tem več bitov je potrebno za njegovo obdelavo. Ta težava se lahko delno reši z uporabo ojačanja, ki je odvisno od daljine ali *swept gain*. Pri oddaji je vrednost tega ojačanja 0 in z daljino narašča, da na maksimalnem dometu doseže maksimalno ojačanje.

Pri sprejemniku potrebujemo 2 kanala za merjenje dopplerjevega efekta. Z enim samim kanalom lahko izmerimo vrednost hitrosti, ne moremo pa vedeti ali se nam cilj približuje ali oddaljuje. Zato se uporabljata 2 kanala, ki sta fazno zamaknjena za 90° ; poznana sta kot I in Q kanal.

Za vzorčenje obeh kanalov v danem primeru potrebujemo 666.000 bytov/sec, kar znaša približno 1,3 Mb podatkov v sekundi. Ta količina podatkov še ni prevelika za današnje računalnike, vendar pa se težave pojavijo kadar je z danimi podatki potrebno izvesti še dodatne operacije in izračune.

6.6 FREKVENČNA AGILNOST

Frekvenčna agilnost je proces spreminjanja frekvence radarja od impulza do impulza. To prinaša določene prednosti, povzroča pa dodatno kompleksnost radarskega sistema. Prednosti so:

- Zmanjševanje kotnega šuma zaradi različnih odbojev od istega cilja na različnih frekvencah
- Večja odpornost na elektronske motnje

6.7 POVPREČNA RADARSKA POVRŠINA (RADAR CROSS-SECTION)

Za določanje tipičnih ciljev, ki jih želimo odkrivati je potrebno določiti povprečno radarsko površino (RCS). RCS pomeni površino cilja, kot ga vidi radar in je mera za količino pretoka moči na cilju in odbitega nazaj v radar.

Stvarni cilji imajo veliko različnih površin, ki povzročajo velike variacije v RCS. Zato se uporabljajo povprečne vrednosti in definirajo dopustna odstopanja od teh vrednosti za določanje RCS.

RCS σ objekta je delno odvisna od valne dolžine radarja in na osnovi tega lahko določimo nekatere smernice:

- Za velikosti ciljev $\gg \mu$ je RCS skoraj enaka kot dejanska površina cilja (optical region).
- Za velikosti ciljev približno enako μ nam RCS močno varirira v odvisnosti od valne dolžine in je lahko manjša ali večja od optične površine (resonance ali Mie region).
- Za velikosti ciljev $\ll \mu$ je RCS $\sigma \propto \mu^4$ (Rayleigh region).

V slučaju L-band radarja bo RCS letala v *optical region*, ker je valna dolžina 23 cm veliko manjša od letala. Ne moremo določiti enotne vrednosti RCS zaradi odvisnosti od kota pod katerim opazujemo letalo in polarizacije radarja. Ti faktorji, skupaj z motnjami zaradi različnih odbojnosti površin letala pomenijo, da bo RCS variirala v času opazovanja letala. Zaradi tega se določi povprečna vrednost RCS.

Tabela 1: Povprečne vrednosti RCS za nekatere objekte za L-band radar

Objekt	RCS na linearni skali	RCS na log. skali
Ptica	0,001 m ²	-30 dB m ²
Raketa	0,01 m ²	-20 dB m ²
Oseba, majhna ladja, majhno letalo	1 m ²	0 dB m ²
Jahta, lovec-bombnik	10 m ²	10 dB m ²
Cestni promet, veliko letalo	100 m ²	20 dB m ²
Tankerji, velike potniške ladje	1000 m ²	30 dB m ²

Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

6.8 STALNI ODBOJI (*CLUTTER*)

Clutter je beseda, s katero označujemo vse neželene odboje, ki motijo radarsko sliko. *Clutter* je skoraj vedno prisoten in se javlja zaradi odbojev od bregov, zgradb, morja, ptic, insektov in mnogih drugih virov.

Clutter se lahko pojavlja kot distribuirani clutter, ki je odvisen od resolucije ali kot točkovni (point) clutter. Točkovni clutter se pojavlja zaradi osamljenih objektov, kot so stebri daljnovoda. Pojem *sufrace clutter* (motnje terena) se uporablja za definiranje vseh odbojev od terena.

Odboji od terena so večkrat večji od odbojev od cilja, vendar se večina ciljev ki nas zanimajo premika in jih zato lahko ločimo z dopplerjevim filtrom. Eden od načinov brisanja stalnih odrazov od terena je tudi *clutter mapa*, ki je lahko statična ali dinamična (spreminja se glede na razmere).

6.9 ŠUM

Osnovni šum, ki moti radar je interni šum. Šum je predvsem odvisen od temperature sistema in če vzamemo, da je ta konstantna, je konstanten tudi šum. Nivo šuma, ki moti naš radar, je odvisen tudi od pasovne širine sprejemnikov (večja ko je, večji je šum). Na osnovi tega lahko vzamemo, da je nivo šuma konstanten.

Tabela 2: Izgube v radarskem sistemu

Izguba	Karakteristična vrednost
a) Izgube prisotne v večini opazovalnih radarskih sistemov	
Valovodi, T-R switch, rotary joint...	3,5 dB
Izguba zaradi oblike impulza (cilj ni v sredini impulza)	2,0 dB
Izguba zaradi kompresije impulzov	1,0 dB
Izguba zaradi vzorčenja	0,5 dB
b) Komponente, ki povzročajo izgube v nekaterih radarskih sistemih	
Tx filter	
Izolatorji	
Konektorji	
Radom	
c) Ostale izgube	
Neprilagojenost impedance antene	
Izgube na kratkih oddaljenostih (sprejemnik ni preklopil na polno občutljivost po oddaji impulza)	
Izgube pri integraciji	
Izgube zaradi stalnih lažnih odrazov	

Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

7. TEORIJA RADARSKE DETEKCIJE

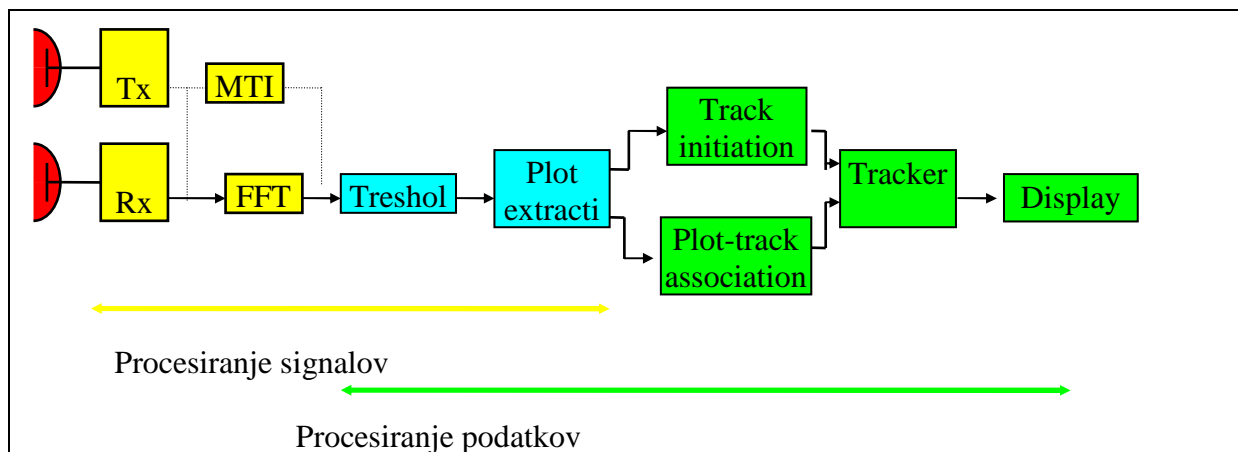
7.1 DETEKCIJA CILJA

Detekcija cilja je v osnovi verjetnostna ideja; šum in clutter nam preprečujejo, da bi bili prepričani, da vidimo cilj, ki ga iščemo in nam po navadi prikazujejo veliko "ciljev", ki jih ne želimo. Definiramo lahko samo verjetnost detekcije in lažnih alarmov, s katero bomo vsaj približno zadovoljni. To določa odnos signal/šum, ki je zahtevan za detekcijo. Optimalna detekcija se dobi s povečanjem odnosa signal/šum na izhodu iz sprejemnika. Sprejemnik pri tem uporablja principe korelacije in filtriranja. Pri dovolj visokem odnosu signal/šum na izhodu sprejemnika oblika impulza ne vpliva veliko na verjetnost detekcije. Če pa vzamemo v obzir tudi variacije v signalu cilja in druge faktorje, ki vplivajo na sprejem, so potrebne kompleksnejše grafične in numerične metode, ki omogočajo detekcijo.

7.2 PROCESIRANJE SIGNALOV IN PODATKOV

Zanesljivost in nizka cena moderne digitalne elektronike sta povzročili, da se je vedno več analognih delov v sprejemnem delu zamenjanih z digitalnimi. Procesiranje signala je določeno predvsem z elektronskimi komponentami in tehničnimi rešitvami, medtem ko je procesiranje podatkov določeno predvsem s software-om in matematičnimi funkcijami. Današnji odnos procesiranja signalov in podatkov je približno takšen kot je prikazan na sliki 13.

Slika 13: Procesiranje signalov in podatkov v sodobnem radarskem sistemu



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

7.2.1 Lastnosti stalnih odrazov (clutter)

Clutter se dobi, ko glavni ali bočni snop radarja "osvetli" določen teren. Pri nekaterih vrstah clutter-ja je nivo signala skoraj konstanten (dež, velike kmetijske površine, mirno morje...) in ga lahko eliminiramo z enakimi metodami kot termalni šum, ki se javlja na sistemu. Te metode pa se ne morejo uporabiti, kadar je clutter neenakomeren, tj. sestavljen iz nekaj močnejših in več slabih odbojev od različnih površin. Zaradi tega dobivamo veliko več lažnih alarmov, vse dokler ne dvignemo *threshold* nivoja, kar pa posledično tudi zmanjšuje verjetnost odkrivanja manjših ciljev.

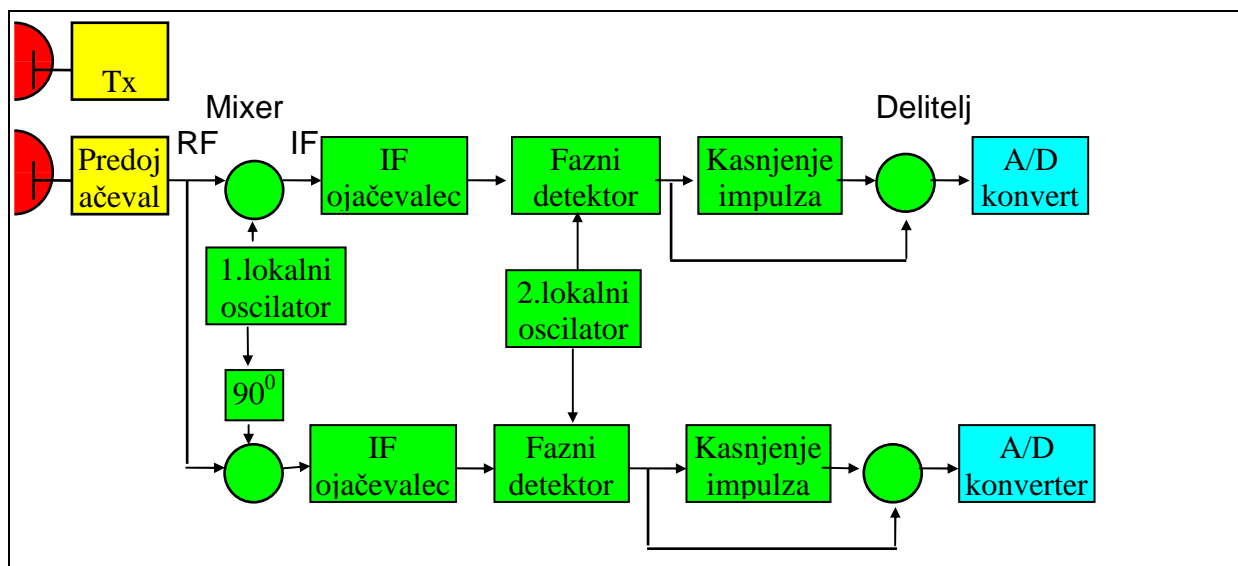
Iz teh razlogov se uporabljajo za procesiranje clutter-jev razni modeli in verjetnostne funkcije, ki temeljijo na izkušnjah. Eden od načinov ločevanja ciljev od clutter-jev je tudi procesiranje dopplerjevega efekta (za premikajoče cilje).

7.2.2 MTI (Moving target indication) procesiranje

Večina radarskih sistemov uporablja katero od oblik dopplerjevega procesiranja za razlikovanje premikajočih ciljev od motenj. Danes so ti filtri večinoma digitalni (*fast Fourier transform* (FFT) algoritem ali skupina transverzalnih filtrov).

Princip delovanja MTI je prikazan na sliki 14.

Slika 14: Blok diagram MTI procesiranja



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Vsak odboj za določeno daljino je koherentno deljen od zakasnjene verzije predhodnega odboja za isto daljino. Če ni spremembe, se odboj briše. Če ni šuma, je brisanje popolno. Če je odboj delno spremenil fazo zaradi gibanja cilja, bo brisanje odboja samo delno. Za cilje s stalnim gibanjem obstaja konstanten pomik faze in brisanje odboja ne obstaja. Performanse dvo-impulznega MTI se lahko poboljšajo z dodajanjem več stopenj za kasnjenje impulza in se tako primerja fazni pomik za tri ali celo več impulzov. Pri analognih linijah za kasnjenje je

zelo težko rešiti ti. *slepe hitrosti*, saj je kasnjenje fixno. Z uporabo digitalnih linij za kasnjenje se je dobilo več fleksibilnosti pri PRF in s tem tudi lažje izogibanje slepim hitrostim.

Slepe hitrosti se pojavljajo, kadar je hitrost cilja takšna, da se premakne za dolžino $\lambda/2$ (ali $n\lambda/2$) med dvema impulzoma. V tem primeru bo videti, kot da ima stalno fazo in bo odboj brisan, enako kot clutter s hitrostjo 0. Majhne spremembe PRF omogočajo detekcijo tudi takšnih ciljev, vendar je pri tem potrebno spreminjati tudi kasnjenje impulzov v MTI filtru.

Druga težava pri MTI je imenovana *tangencialna izguba*. Ta se pojavlja, kadar se cilj giba tangencialno na radarski snop. Pri tem je radialna komponenta njegove hitrosti 0 in signal procesor ga zanemari.

Tudi gibanje antene vpliva na performanse MTI filtra, zato se v novejšem času vse bolj teži k uporabi elektronskega skeniranja snopa.

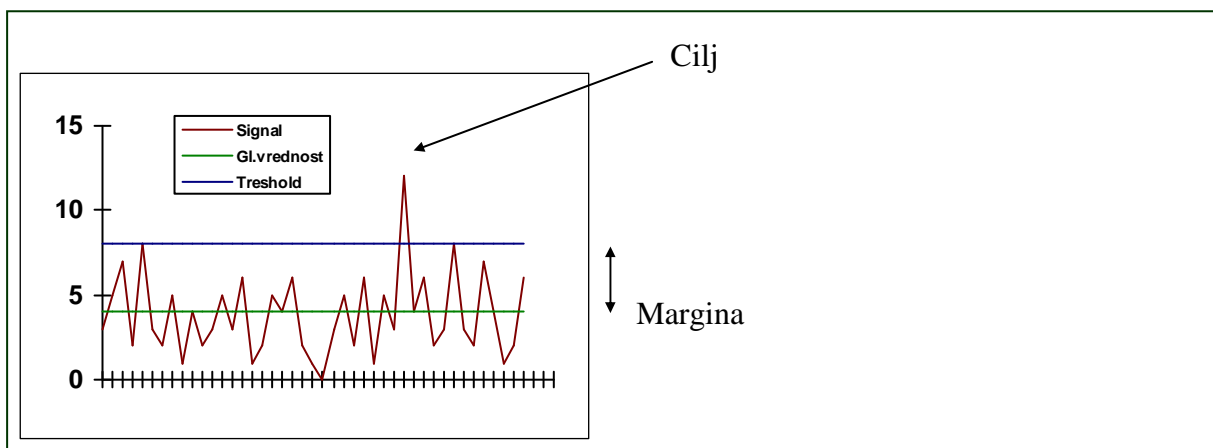
7.2.3. Tresholding

Zaradi velike količine podatkov, ki prihajajo iz izhoda sprejemnika v obdelavo, je potrebno količino teh podatkov nekako reducirati. To se doseže s *treshloding*-om, kjer se podatki primerjajo z nekim vnaprej določenim nivojem in samo podatki, ki presegajo ta nivo so poslani v daljno obdelavo.

V prvih radarjih so se v ta namen uporabljali komparatorji napetosti, kjer je operater kontroliral referenčno napetost. Zato je bila uporabnost te funkcije odvisna predvsem od izkušenj in usposobljenosti operaterja. Imela pa je tudi druge omejitve zaradi obračanja antene, saj se referenčna napetost ni mogla kontinuirano regulirati, da bi dobro kompenzirala motnje na različnih lokacijah.

Uvedba digitalnega procesiranja je omogočila interno reguliranje referenčnega nivoja na osnovi sprejetega signala in s tem povečala občutljivost in hitrost reagiranja tresholdinga. Obstajata dve ključni vrednosti, ki definirata treshold. Najprej je potrebno določiti glavno vrednost šuma ali motenj, kadar ni nobenega odboja od cilja. Zatem se določi še *margina*, tj. nivo do katerega lahko sega šum ali motnja. Vsak odboj, ki presega ta nivo, bo predstavljen kot cilj.

Slika 15: Treshlod



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

Treshold je najučinkovitejši, kadar se tudi margina določa na osnovi sprejetega signala in ne s strani operaterja, saj se le tako lahko sproti prilagaja vsem spremembam v nivoju šuma in motenj.

7.2.4 Procesiranje plotov

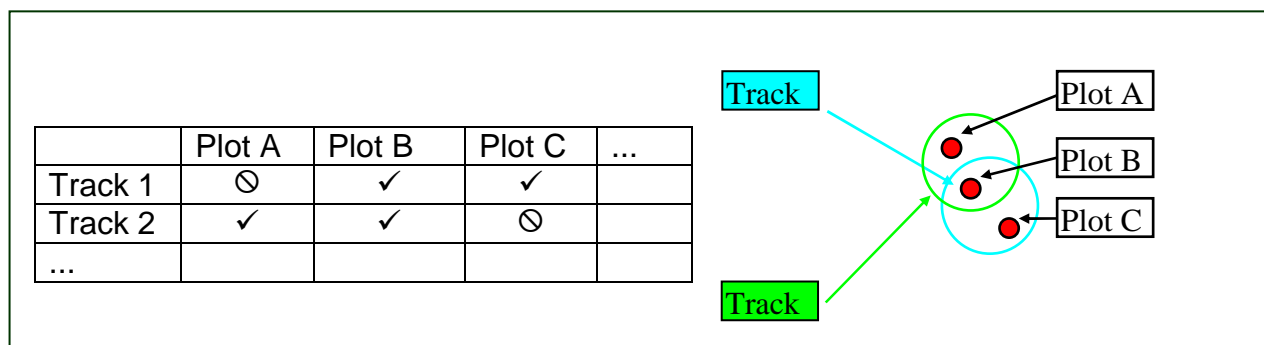
Ko je enkrat potencialni cilj ali plot identificiran kot signal, ki je večji od tresholda, je naslednji korak ekstrakcija vseh uporabnih podatkov iz njega. Azimut in elevacija sta po navadi izmerjena po monoimpulzni tehniki, daljina z interpolacijo vrat daljine in hitrost s pomočjo interpolacije dopplerjevih efektov. Namen izdvajanja teh podatkov v tej fazi je v tem, da se bo dejanski cilj vedel predvidljivo po izmerjenih podatkih in se lahko pravilno definira kot cilj, za razliko od motenj, ki se pojavljajo naključno.

7.2.5 Pretvorba plotov v track (Plot - track association)

Ko radar preiskuje določeno površino, detektira več različnih plotov. Ti ploti so lahko del obstoječega tracka v *track list*, del novega tracka ali naključni lažni alarmi. Prvi del te operacije je razvrščanje plotov v eno od teh treh kategorij.

Vsak novi plot se tretira kot kandidat za dodajanje na obstoječi track. To se izvaja na osnovi matrike. Plot, ki ni pridodan nobenemu obstoječemu tracku, se naprej obravnava kot kandidat za novi track. Vsi ostali ploti, ki ne formirajo nobenega tracka, se smatrajo kot lažni alarmi.

Slika 16: Plot-track association



Vir: Skripta radarski sistemi (Ljubljanski vrh)

7.2.6 Inicializacija tracka

Ko se na displayu pojavi novo zaporedje plotov, ki formirajo prepoznavno linijo, operater ve, da gre za dejanski cilj. Kako bi ta proces lahko avtomatizirali?

Predstavljajmo si radar z rotirajočo anteno. Pri prvem obratu je plot označen kot mogoč del novega tracka in števec se poveča za 1. Pri naslednjem obratu je plot spet na pravem mestu in števec se poveča še za 1. Pri tretjem obratu plot ni in števec se zmanjša za 1. Ta proces se nadaljuje, vse dokler števec ne doseže vrednosti 0, ko se track briše iz track liste ali vnaprej določene vrednosti, ko se track definira kot realni cilj in se javi operaterju.

Obstajajo še druge tehnike za izboljšanje določanja ali je plot del tracka ali ne, kot je zmanjševanje vrat za *plot-track association* s povečanjem števila opazovanj, uporaba *Boolean* funkcij pri števcu zadetkov ipd.

7.2.7 Spremljanje cilja (tracking)

Dejansko spremljanje cilja je sestavljeno iz algoritma za "mehčanje" spremljanja (*smoothing track algorithm*) in algoritma za vzdrževanje spremljanja (*track maintenance algorithm*), ki poskuša nadomestiti manjkajoče podatke pri spremljanju cilja.

Najpogostejši problemi, ki jih ti algoritmi rešujejo so spremljanje pri nenadnem manevru letala, ki je prej letelo v ravni liniji in kadar letalo zaide v področje kjer je veliko lažnih odbojev in je zato težko določiti kateri od plotov je pravi. Še vedno pa preostane možnost posega operaterja, kadar software sam ne more določiti dejanskega cilja.

8. SKLEP

Nadzor zračnega prostora se zagotavlja z nepretrganim opazovanjem zračnega prostora, z pravočasnim odkrivanjem, identifikacijo in spremljanjem ciljev v zračnem prostoru, z posredovanjem podatkov, oz. valom obveščanja in javljanje podatkov poveljstvom in enotam ZO. V določenih okoliščinah pa tudi z upravljanjem ognja raketnih enot in vodenje letalstva. Nadzor zračnega prostora deluje neprekinjeno v miru in vojni. Naša enota 16.BNZZ je opremljen z dvema 3D radarjema dolgega dosega in z osmimi 2D radarji kratkega dosega.

Današnji svetovni izzivi in zmanjšanje proračunov za vojaško opremo narekujejo, da morajo biti radarji večnamenski, operativno prilagodljivi, omogočati pa morajo tudi nizko ceno obratovanja in vzdrževanja.

Revolucionarni razvoj informacijske tehnologije in področja zvez v zadnjih letih omogoča prenašanje in obdelavo ogromnega števila podatkov, ki so pomembni poveljniški strukturi pri odločanju o uporabi enot, načrtovalcem pri izdelavi in usklajevanju načrtov delovanj ter enotam pri izvedbi postavljenih nalog. Z digitalizacijo podatkov, pridobljenih iz raznih virov in z različnimi tehničnimi pripomočki, še posebej pa z zmogljivimi računalniki je mogoče podatke, ki bi jih še pred nekaj leti seštevali, kot hruške in jabolka, sedaj prenašati, združevati, prikazovati, dopolnjevati in uporabljati v enem programskem okolju, na isti opremi in kar je v VLZZ še najbolj pomembno, v realnem času, ali saj približno.

Avtomatizacija sistema C2 se uporablja v svetu za podporo poveljevanju in kontrole na kopnem, morju in v zračnem prostoru. Vojskovališče postaja digitalizirano, kopenska, zračna in morska komponenta pa se v informacijskem in operacijskem smislu združujejo.

Poseben pomen imajo avtomatizirani sistemi C2 za podporo aktivnosti, ki se odvijajo v zračnem prostoru. Hitrost letal, še posebno vodenih in balističnih orožij za delovanje iz zračnega prostora, s katerim se sodobne zračne obrambe že lahko soočijo so tako visoke, da vsaka zamuda pri odkrivanju nevarnosti, odločanju o uporabi najprimernejših sredstev za nevtralizacijo napadalca ter prenos podatkov do enot in za vodenje izbranih sistemov orožij, mora potekati v realnem času. Brez te sposobnosti se verjetnost, da napadalca preprečimo uspešno izvedbo naloge lahko primerja z verjetnostjo »da bo slepa kura res zrno našla«.

General Horner, poveljnik zavezniških sil v puščavskem viharju, je v eni od analiz opravljene operacije priznal, da je dejavnik, ki je odločilno obrnil tehtnico na zavezniško stran, ni razlika v kakovosti orožja, ampak dejstvo, da so zavezniki v vsakem trenutku natančno vedeli, kaj se na bojišču dogaja. Iračani teh podatkov zaradi uničene ali blokirane infrastrukture C2 niso imeli. Brez tega so bili iraški lovci in raketne enote zračne obrambe na vročem bojevališču le »boksarji z zavezanimi očmi, ki nasprotnika lahko zadanejo le , če je ta zelo nespreten«.

Skozi analizo gradiva zaključne naloge sem bolj in bolj odkrival vpliv radarskih sistemov na način bojevanja. Z radarjem, ki zagotavlja ustrezno obveščenost o dogajanju na bojišču in ustreznimi bojnimi sistemi, ki podatke iz radarja izkoriščajo, lahko sovražniku vsilimo svoj način bojevanja.

9. LITERATURA

INTERNET

1. <http://www.radarpages.co.uk>
2. <http://www.vectorsite.net/ttradar1.html>
3. <http://www.vectorsite.net/ttradar2.html>
5. <http://www.vectorsite.net/ttradar3.html>
6. <http://www.vectorsite.net/ttradar4.html>
7. <http://www.vectorsite.net/ttradar5.html>
9. <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/radarsys/radarsys.htm>

VIRI

1. RAKUŠA Ladislav, Osnove radarske tehnike; 2001
2. Zapiski iz prenavanj v času specializacije NZP, 2005/2006
3. Zakon o avtorski in sorodnih pravicah UL RS, št. 21/95

SEZNAM TABEL IN SLIK

Tabela 1: Povprečne vrednosti RCS za nekatere objekte za L-band radar.....	23
Tabela 2: Izgube v radarskem sistemu.....	24
Slika 1: B-2 Stelth bombnik.....	7
Slika 2: F-117A.....	7
Slika 3: Radar AN/TPS-70.....	9
Slika 4: Različne vrste radarskih anten.....	14
Slika 5: Prikazovalnik radarja AN/TPS-70.....	16
Slika 6: Radarja kratkega dosega EL/M-2106 HEE in radar dolgega dosega AN/TPS-70...17	17
Slika 7: Blok shema preprostega radarskega sistema.....	18
Slika 8: Radar z efektivnim dometom 100 km.....	20
Slika 9: Uporaba dveh PRF - <i>burst mode</i> (dejanska daljina do cilja je 330 km).....	20
Slika 10: Vzorčenje 3 μ s (cilj detektiran).....	21
Slika 11: Vzorčenje > 3 μ s (cilj izgubljen).....	22
Slika 12: Vzorčenje < 3 μ s (oversampling).....	22
Slika 13: Procesiranje signalov in podatkov v sodobnem radarskem sistemu.....	25
Slika 14: Blok diagram MTI procesiranja.....	26
Slika 15: Treshlod.....	27
Slika 16: Plot-track association.....	28

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

ACP	azimuth change pulse
ATC	air traffic control
COHO	coherent oscillator
D/A	digitalno-analogni
EM	elektromagnetni
EME	elektromagnetna energija
EMS	elektromagnetno sevanje
FM	frekvenčna modulacija
FPA	final power amplifier
HF	visoke frekvence
IF	medfrekvenca
IFF	identification Friend or Foe (identifikacija prijatelj sovražnik)
LNA	low noise amplifier
MFI	monitoring and fault isolation
MTD	moving target detector
MTI	moving target indicator
PPI	plan position indicator
RCS	radar Cross-Section (Radarska površina)
RADAR	Radio Detection And Ranging (radijsko zaznavanje in merjenje razdalj)
SLR	side lobe reference
SNR	signal/noise ratio
SSR	sekundar surveillance radar
STALO	stabil local oscillator
STC	sensitivity time control
T-R	transmitt - receive
Tx	oddajnik
UHF	ultra visoke frekvence
ULRS	uradni list republike Slovenije
VC	voice communication
VHF	zelo visoke frekvence
ZDA	združene države Amerike

IZJAVA O AVTORSTVU

Na osnovi **Zakona o avtorski in sorodnih pravicah**, UL RS, št. 21/95, z dne 14. 04. 1995, s pričetkom veljave 29. 04. 1995, spodaj podpisani Peršuh Damjan,

IZJAVLJAM,

da je strokovno delo z naslovom

PRINCIP DELOVANJA RADARJEV

lastna avtorska stvaritev, s korektnim navajanjem avtorjev uporabljene literature, virov in slikovnega materiala v času nastajanja tega strokovnega dela.

Skladno z veljavno zakonodajo navajam, da je nadaljnja reprodukcija strokovnega dela možna le ob doslednem upoštevanju določil **Zakona o avtorski in sorodnih pravicah**.

Strokovno zaključno nalogo je pregledal : nadporočnik Andrej GERJEVIČ.

vod. Peršuh Damjan, dipl. ing. elektrotehnike

Datum: 15. februar 2006