

**ŠOLA ZA ČASTNIKE
XV. GENERACIJA**

NADZOR ZRAČNEGA PROSTORA

Zaključna naloga

RADARSKI SISTEMI

Kandidat: vod. Arber Kramar

Mentor: npor. Andrej Gerjevič

Ljubljana, februar, 2006

KAZALO

POVZETEK	ii
SUMMARY	iii
1 UVOD	1
1.1 IZHODIŠČE ZAKLJUČNE NALOGE	1
1.2 CILJI IN NAMEN ZAKLJUČNE NALOGE	3
1.3 METODE IN NAČELA ZAKLJUČNE NALOGE	3
1.4 TEMELJNI POJMI	4
1.5 STRUKTURA NALOGE	6
2 RADARSKI SISTEMI	8
2.1 POMEMBNI RADARSKI SISTEMI MED 2. SVETOVNO VOJNO	8
2.1.1 CHAIN HOME	8
2.1.2 RADAR FREYA IN WURZBURG	11
2.1.3 H2S	14
2.1.4 BLIŽINSKI VŽIGALNIK	15
2.2 POMEMBNI RADARSKI SISTEMI PO DRUGI SVETOVNI VOJNI	18
2.2.1 RADARJI Z VALOVODNO ANTENO	18
2.2.2 RADAR NA BOJNEM LETALU	20
2.3 MODERNI RADARSKI SISTEMI	24
2.3.1 RADAR AN/SPY-1 V SISTEMU AEGIS	24
2.4 PRIHODNOST	26
2.4.1 LIDAR	26
3 ZAKLJUČEK	28
LITERATURA	30
VIRI	30
SEZNAM SLIK IN TABEL	31
SEZNAM KRATIC	31
IZJAVA O AVTORSTVU	32

POVZETEK

V zaključni nalogi sem obravnaval radarske sisteme, katerih uporaba je pomenila ali pomeni izreden vpliv na razplet svetovnih konfliktov, konkretno druge svetovne vojne, in vpliv na taktiko in način bojevanja vseh rodov moderne vojske.

Sisteme sem opisal po kronološkem vrstnem redu. Najprej prvi v boju uporabljen radarski sistem, ki je dejansko pripomogel k razpletu bitke – Chain Home. V Nemčiji so razvili radar za zgodnje opozarjanje Freya in namerilni radar Wurzburg. Prvi pravi radar za sledenje zemljišču in natančno bombardiranje je bil angleški H2S, ki je bil tudi prvi večfunkcijski radar. Opisal sem bližinski vžigalnik, ki je spremenil način bojevanja podobno, kot ga je uporaba topov v srednjem veku in pulzno dopplerski valovodni radar, ki je bil narejen med hladno vojno. Spremljal sem razvoj radarja na bojnem letalu, ki pa še vedno ni razvil polnega potenciala, in pa analiziral današnji najbolj izpopolnjeni in najsposobnejši bojni sistem AEGIS in njegov radar AN/SPY-1.

Po mojem mnenju je bil vsak od teh sistem v svojem času prelomnica, ki je poskrbela za spremembo v toku časa in dogodkov. Če katerega do teh sistemov ne bi razvili, bi se lahko zgodovina drugače pisala.

Na koncu pa sem si dovolil še vpogled v prihodnost z LIDAR sistemom, ki postaja čedalje bolj podoben našemu prirojenemu senzorju – očesu.

Ključne besede: RADAR, radarski sistemi, radarska mreža, konusno skeniranje, zaznavanje, razdalja, merjenje, azimut, snop, mikrovalovi, identifikacija, frekvenca, valovna dolžina, senzor, skeniranje, bitka za Britanijo, radarski stolp, radarska postaja, Freya, Wurzburg, AESA, AEGIS, H2S, bližinski vžigalnik, baterija, V1, VT, valovod, antena, elektronka, IFF, letalo, fazni zamik, rešetka, Ticonderoga, balistična raketa, LIDAR

SUMMARY

In my graduation work i chose and analysed few of the radar systems, that in my opinion had substantial impact on the outcome of the major military conflict in the world history, the second world war, and are stil influencing tactics and the way of combat of all branches in the modern armies.

I described the systems cronologically. Starting with the first radar system used in actual combat, the Chain Home, that actually decided the battle of Britain. Germans developed early warning and gun laying radar systems Freya and Wurzburg. The second being extremely efficent targeting radar. The first multipurpose radar system was H2S, with chatode ray tube, on which the terrain in the target area was clearly visible. The development of the proximity fuse changed the combat the way cannon had changed the middle ages. Next the pulse doppler radar with planar array that emerged during the cold war. Then the fighter aircraft radar that still has not reached its full potential. And finnaly the most advanced and up to date radar system AEGIS AN/SPY-1.

In my opinion, every one of these systems is a turning point in history and directly influenced future events. If development of one of these systems would not take place, future would change.

Finally while retrospecting, i allowed myself a glympse in the future to the LIDAR system which is becomming more and more alike to our natural sensory organ – the EYE.

Key words: RADAR, radar system, chain of radars, conical scanning, detection, range, measuring, azimuth, beam, microweave, identification, frequency, weavelenght, sensor, scanning, battle of Brittain, radar tower, radar station, Freya, Wurzburg, AESA, AEGIS, H2S, proximity fuse, battery, V1, VT, weaveguide, antenna, vacum tube, IFF, aircraft, phased, array, Ticonderoga, ballistic missile, LIDAR

1 UVOD

Človek ni bil prvi, ki je uporabil radar kot sredstvo za zaznavanje ovir in za prestrezanje ciljev. 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 ravnokar odkrili.

1.1 IZHODIŠČE ZAKLJUČNE NALOGE

Pred začetkom druge svetovne vojne so angleški znanstveniki želeli radar uporabiti kot direktno orožje. Teorija je bila, da bi se pilot pod vplivom močnega radarskega sevanja dobesedno skuhal v kabini. Vemo pa, da do tega ni prišlo, ker so ugotovili, da radijski valovi ne gredo skozi predmete, temveč se od trdne snovi odbijejo. Tako se je rodila ideja o sistemu za zgodnje opozarjanje. Z njim bi lahko nadomestili verige opazovalcev, sistem bi videl dlje kot človek in predvsem ob podpori dobrega IFF-sistema ločil med prijateljskimi cilji in sovražnikom. Ne bi mogli napraviti večje usluge svojemu narodu!

Izredno dodelan sistem za zgodnje opozarjanje pred letalskimi napadi Chain Home ali CH, kot so ga imenovali, je v bitki za Britanijo poleg letala Spitfire imel izreden pomen pri zaustavitvi osvajalnega pohoda nacistične Nemčije. Brez te verige radarjev Velika Britanija ne bi mogla tako učinkovito uporabiti svojega številčno manjšega letalstva. Velike skupine letal bi morale vzleteti in izgubljati čas z iskanjem sovražnika, tako pa so na različnih letališčih alarmirali lovce v pripravljenosti in jim podali točno lokacijo sovražnika. Lovci so v majhnih skupinah napadali sovražnika in ga nadlegovali skozi njegovo celo nalogo in dosegli celo večjo učinkovitost kot v primeru, če bi se letala srečala v eni sami veliki bitki.

Kot nasprotje sem prikazal dva nemška sistema; Freya za zgodnje opozarjanje in namerilni oz. radar za sledenjem cilja v zraku Wurzburg, ki so ga učinkovito uporabljali v navezi z nočnimi lovci in protiletalsko artilerijo. Prednost teh dveh sistemov pred Britanskim CH je bila popolna mobilnost, kompaktnost in napajanje na terenu. Slabost pa je bila zapletenost podslobov ter tehnologija brez možnosti razvoja – iz radarja niso mogli spraviti več moči, ker niso imeli ustreznega ojačevalnika.

Ravno to pa je bila naslednja prednost zaveznikov - na področju moči; resonantni magnetron je omogočal uporabo radarja kratke valovne dolžine, 10 cm in relativno velikih moči. S tako napravo so lahko na zaslonu dobesedno videli relief terena ali obliko mesta ponoči. Nočni bombniki so bili sedaj samozadostni in niso potrebovali vodenja preko zapletenih sredstev na zemlji. Povečala se je tudi natančnost bombardiranja. Vse to z napravo H2S, ki so jo malenkost predelano uporabljali za navigacijo, protipodmorniški boj, prestrezanje v zraku in natančno bombardiranje v pogojih zmanjšanje vidljivosti.

Izreden vpliv na taktiko je imel tudi razvoj vžigalnika za aktiviranje eksplozivne polnitve granate v ubojnem dosegu cilja. Bližinski vžigalnik je vplival tako na spremembo taktike in tehnologije v letalstvu, iz njega so namreč razvili protiletalske vodene rakete, kot taktike

pehote – lisičje luknje niso več dajale kritja pred minometnimi minami, ki so se raztreščile nekaj metrov nad zaklonilnikom. Tehnologijo v osnovi še vedno uporabljajo vodeni izstrelki vseh vrst in oblik.

Skozi hladno vojno se z radarskimi sredstvi ni zgodilo omembe vrednega napredka. Največ se je naredilo v smeri taktike in uporabe radarskih sredstev ter direktnega boja proti njim. Na področju tehnologije se je največ naredilo na antenskem sistemu in v načinu delovanja. Govorim o valovodni anteni, ki je omogočila tudi uporabo relativno ozkega snopa za preiskovanje zračnega prostora in radar naredila bolj neobčutljiv za različne motnje. Sama antena je lahko manjša in bolj učinkovita. Povečalo pa se je število sekundarnih sistemov v podporo radarskemu sistemu. Od klime do kompresorjev in vodnega hlajenja. Odkrili so tudi pulzno dopplerski radar, ki je lahko bolje zaznaval cilje, ki so se gibali pred mirujočim ozadjem.

Nadalje sem navedel razvoj radarske tehnologije za letala in uporabo le-te v letalstvu. To so razvijali že sredi druge svetovne vojne na obeh straneh, vendar so bili ti radarji namenjeni odkrivanju ciljev ponoči, pilot pa je še vedno moral cilj videti, da ga je lahko sestrelil. Kasneje se je z miniaturizacijo zmanjšala velikost radarja, kar je bilo ugodno ravno tedaj, ko so letala postala prehitra. Tako so imeli piloti možnost opaziti nasprotnika na daljši razdalji in ne šele tedaj, ko je bil že za njimi.

Pomen uporabe radarja na letalu pa ni le za prestrežanje nasprotnikovih letal ali delovanje na cilju na zemlji, temveč tudi prenos informacij o ciljih, ki jih ta radar vidi, v skupno sliko, ki je namenjena vsem sobojujočim. To že uporabljajo armade v svetu, konkretno NATO uporablja Link 1. Tak je pravi sistem C3I, vendar pa to ni več tema moje naloge.

Naslednji preobrat je sledil z razvojem in uporabo radarskega sistema z aktivno rešetko. Predstavnik tega rodu je sistem AEGIS oz. radar AN/SPY-1. Radar je revolucionaren zaradi sposobnosti sledenja veliko ciljem hkrati, do 100, in izvajanjem bojnih aktivnosti proti vsem tem ciljem. Vse to hkrati v istem času. Radar je tudi izredno občutljiv, sistem pa lahko deluje popolnoma avtomatizirano, skratka najnovejše čudo moderne tehnologije. Sistem pa nameravajo uporabiti tudi v sklopu protibalistične obrambe ameriškega kontinenta in sil. Za tak podvig pa mora biti radar predvsem dovolj hiter v skeniranju neba, imeti pa mora dovolj veliko ločljivost, da zazna cilje z radarsko površino RCS enega lista iz te zaključne naloge in proti njim usmeri prestreznike ali rakete.

Nazadnje pa sem razmišljal še o uporabi radarjev ali podobnih senzorjev v bližnji prihodnosti, kajti razvoj se premika prehitro, tako da je daljna prihodnost za kakršna koli ugibanja predaleč.

1.2 CILJI IN NAMEN ZAKLJUČNE NALOGE

Namen je bil opisati različne vojaške radarske sisteme, ki so po mojem mnenju najbolj vplivali na dogodke v zgodovini. Poskušal sem utemeljiti trditev, da brez učinkovite uporabe radarja kot podpore vsem rodovom v vojski zgodovina človeštva ne bi potekala v istih smernicah kot sedaj. Odločil sem se, da bom sisteme opredelil glede na čas njihove uporabe, oziroma na način uporabe določenega sistem in vpliv teh sistemov na potek dogodkov v zadnjih 70 letih, odkar je radar aktivno v uporabi. Analiziral sem tudi uporabljeno tehnologijo in podal njene prednosti in slabosti. V nalogi sem poskusil seznaniti bralca z modernimi dosežki na tem področju, in tudi predstaviti možnosti prihodnjega razvoja.

1.3 METODE IN NAČELA ZAKLJUČNE NALOGE

V tej zaključni nalogi sem uporabil metodo analize pisnih virov in virov elektronskih medijev kot temeljno metodo preučevanja dane problematike in deskriptivno metodo za predstavitev obdelanih in analiziranih virov, ki zajemajo področje zaključne naloge. Po analizi sem uporabil metodo dedukcije za podajanje svojih trditev

V spodnji nalogi sem uporabil načelo enotnosti, načelo selektivnosti, načelo skladnosti, načelo enakomernosti in načelo raznovrstnosti, hkrati pa sem uporabil še svoje načelo, da mora biti naloga zanimiva za branje!

1.4 TEMELJNI POJMI

RADAR	Beseda radar, ki je v današnjem svetu uporabljana za elektronsko napravo za nadzor zračnega prometa, je dejansko kratica ameriškega izvora. RADAR je akronim za <u>RA</u> dio <u>D</u> etection <u>A</u> nd <u>R</u> anging, kar pomeni radijsko zaznavanje in določanje razdalj.
Magnetron	Resonantni magnetron je končna stopnja ojačanja signala oddajnika v radarju. Narejen je iz bakra in je valjaste oblike z izvrtinami v pravilnem vzorcu. V teh izvrtinah se signal ustvarja in ojača, preden gre na anteno in v zrak. Še danes jih uporabljamo za ustvarjanje sevanja v t. i. mikrovalovnih pečicah.
Aegis	Mitološki oklep grškega boga Zeusa – egida v slovenskem prevodu. V Homerjevem delu Iliada izvemo, da ga je uporabljala tudi boginja modrosti Atena in vsako orožje je bilo proti nosilcu egide neučinkovito, še več: z njim je lahko nosilec celo zaslepil sovražnike.
Ojačevalec	Podsklop radarja s funkcijo ojačati signal, ki smo ga predhodno ustvarili in je prešibek za zahtevano razdaljo. Tehnologija temelji na posebnih ceveh – elektronkah, ki pospešijo nabite delce – jim dodajo energijo, ali pa za to uporabimo zapleteno mrežo tranzistorjev. Z ojačevalcem lahko v več stopnjah dosežemo velike moči v kratkih pulzih in s tem povečamo domet radarja.
Pencil beam	Zelo ozek radarski snop, uporabljan na radarjih s fazno zamaknjeno rešetko. Omogoča zelo natančno skeniranje tarče, ne da bi ostali nasprotniki izvedeli za položaj radarja. Lahko si ga predstavljamo kot laserski snop, ki se premika po prostoru. Vidi jo ga le tisti, ki jih zadene. To je tudi prednost te tehnologije.
Phased array	Antena z elementi, ki oddajajo signal s faznim zamikom drug na drugega. Uporabljena je predvsem za kombinirane iskalno-namerilne radarje.
Planar array	Valovodna antena z elementi-valovodi, postavljenimi v ravnini in z režami v valovodih, ki usmerjajo valovanje v želeni smeri.
Valovod	Kovinska cev, v kateri se širi visokofrekvenčno valovanje. V valovodih je nadtlak in suh zrak. Prvi, da preprečuje vstop nečistoč, drugi zato, ker vlažnost povzroča iskrenje v valovodih. Valovodi na antenah so točno določenih dimenzij.
IFF	Identifikacija prijatelj-sovražnik (identification friend or foe), elektronika odgovarja le na določen signal, s tem pa se predstavi kot prijateljski element.
PRF	Število oddanih pulzov na časovno enoto, v našem primeru na sekundo.

Klystron	Močnostni ojačevalnik, elektronska cev za pospeševanje delcev.
Twystron	Močnejši in bolj izpopolnjeni ojačevalnik kot klystron z možnostjo oddaje hkrati natančnejšega in močnejšega signala.
Valovna dolžina	Fizično pomeni dolžina med vrhoma sosednjih valov. Je neposredno povezana s frekvenco.
Superheterodyne sprejemnik	Moderen sprejemnik, ki v sprejemnem procesu frekvenco signala zniža na svojo lastno standardno frekvenco in tako ne potrebuje visoke občutljivosti na vsem spektru frekvenc temveč obravnava le eno. S tem dosežemo boljšo čistost signala.
V-1	Nemško maščevalno orožje, inercialno vodena letéča bomba z majhnim reaktivnim motorjem in tonno eksplozivna.
Frekvenca	Število ponovitev v časovni enoti, označujemo jo z Hz.
RCS	Radarska slika letala, ekvivalentna s površino ustreznega kvadrata.
Preskakovanje frekvenc	Način dela radarja v primeru elektronskega motenja. Naključno menjamo delovno frekvenco.
LIDAR	Svetlobno zaznavanje in določanje razdalj.
LASER	Ojačanje svetlobe s pomočjo vzbujanja s sevanjem. Laser je naprava, ki zoža curek svetlobe in ga usmeri tako, da je valovanje vzporedno. Tako svetlobno valovanje ima ponavadi eno samo valovno dolžino, ima pa tudi večjo energijo kot ostali tipi svetlobe.
Hz	Enota za pojem frekvence, pomeni število sprememb na sekundo.
CH	Chain Home, britanska veriga radarjev uporabljena v drugi svetovni vojni.
S-pas	Frekvenčni pas, razdelitev pogledajte v Tabeli 1 na strani 6.

Tabela 1: Tabela radiofrekvenčnih pasov

RADIO-FREKVENČNI PASOVI			
Ime pasu	Frekvenčni razpon	Razpon valovne dolžine	Opombe
HF	3-30 MHz	10-100 m	Obalni radarski sistem za nadzor zračnega prostora in zgodnje opozarjanje z dosegom preko obzorja.
P	< 300 MHz	1 m+	Frekvenčni pas zgodnjih radarskih sistemov.
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Zelo dolg doseg, signal prodira skozi zemljo.
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Zelo dolg doseg, signal prodira skozi rastlinje, uporablja se za radarje protibalističnega ščita.
L	1-2	15-30 cm	Dolg doseg, nadzor in vodenje civilnega zračnega prometa.
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Zaključno vodenje zračnega prometa, vremenski radar dolgega dosega.
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Satelitski odzivniki, vremenski radar.
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Vodenje izstrelkov, mornariški radarji, sistem za snemanje površja z srednjo ločljivostjo.
K _u	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	Kartografiranje z visoko ločljivostjo, merjenje višine satelitov.
K	18-27 GHz	1.11-1.67 cm	Omejena uporaba zaradi absorpcije signala v vodnih molekulah, zaznavanje oblakov in policijski radar.
K _a	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Kartografiranje, nadzor prometa na letališču, foto radar, ki aktivira kamero pred predorom, če vozimo prehitro.
mm	40-300 GHz	1 - 7.5 mm	Milimetrsko področje, razdeljeno na V in W pas.
V	40-75 GHz	4.0 - 7.5 mm	Rezerviran za znanstvene raziskave.
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	Uporabljajo vizualne senzorje eksperimentalnih avtonomnih vozil in za meteorološka opazovanja.

1.5 STRUKTURA NALOGE

Nalogo sem razdelil na tri poglavja, ker sem hotel ohraniti povezanost jedra.

Ta poglavja so: Uvod, Radarski sistemi in Zaključek. Jedro z naslovom Radarski sistemi, sem razdelil naprej na smiselna podpoglavja, ki so temeljila na kronološkem vrstnem redu.

V uvodnem poglavju sem predstavil osnovni oris zgodovinskih dejstev in postavil tezo.

V drugem poglavju sem se opredelil na opis posameznih sistemov in njihovih zmogljivosti. Poglavje sem dalje razdelil na sisteme v času druge svetovne vojne, na sisteme v času po drugi svetovni vojni in na sisteme v današnjem času. Na koncu sem opisal še sistem, ki šele prihaja v uporabo.

V zaključnem poglavju sem izpostavil dogodke in dejstva, na katera so ti radarski sistemi vplivali, in podal še svojo misel.

2 RADARSKI SISTEMI

2.1 POMEMBNI RADARSKI SISTEMI MED 2. SVETOVNO VOJNO

2.1.1 CHAIN HOME

Prva znana in uporabljena radarska mreža za zgodnje opozarjanje je bil britanski »CHAIN HOME«. Prvi je bil uporabljen kot sestavni del zračne obrambe 1937, veriga radarjev ni vsebovala nikakršne nove tehnologije, temveč preizkušeno radijsko tehniko. Ključ uspešnosti sistema je bila postavitve oddajnikov in sprejemnikov na način, da je mreža pokrivala večino ozemlja in vsaj 100 km navzven.

V kolikor bi britanska vojska čakala na moderno tehnologijo, bi samo vpeljevanje le-te porabilo preveč časa, posledično mreža ne bi bila gotova do začetka bitke za Britanijo. Od vsega začetka je imela izgradnja CH sistema najvišjo prioriteto – enako kot izdelava lovskih letal.

Radar je deloval na naslednjem principu. Prostor, kamor je obrnjena antena, preplavimo z radarskimi pulzi in z drugo anteno sprejememo energijo, odbito od ciljev ali od objektov na zemlji. Merjenje razdalj je izvedeno z meritvijo časov med oddajnim pulzom in sprejetim signalom. Smer letala pa ugotovimo z različno postavljenima antenama, izmerimo azimuta z različnih lokacij in v sečišču azimutov je trenutna lokacija našega cilja. Naprava je v svojem bistvu radio goniometer.

Radar je imel na voljo štiri oddajnike in štiri sprejemnike za borbo proti motnjam. Frekvence so bile od 20 do 55 MHz. Radarski sistem CH so sestavljali štirje stometrski jekleni stolpi, oddaljeni po 60 m in postavljeni v vrsto (Slika 2). Med te stolpe je bila obešena oddajna zavesa, ki so jo napeljali iz zaščitene oddajne stavbe v bližini. Dva identična oddajnika sta bila na voljo z možnostjo hitrega prekopa v primeru odpovedi enega od njiju. Štirje lesni stolpi višine 80 m, postavljeni v obliko romba, so nosili sprejemne antene. Skupaj s sprejemno stavbo so bili ločeni od oddajnega dela za nekaj sto metrov (Slika 1).

Operativni podatki za radarski sistem CH:

Frekvenca: 20 – 30 MHz

Najvišja moč pulza 350 kW

PRF: 25 – 12.5 pulzov v sekundi

Slika 1: Sprejemni stolpi sistema CH

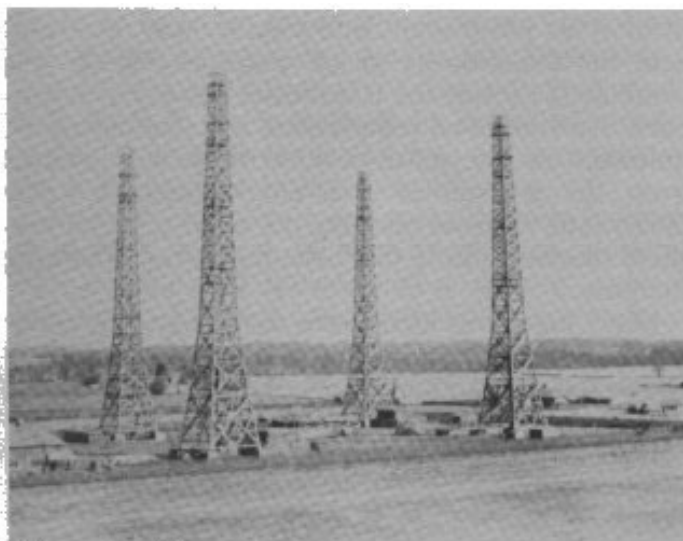
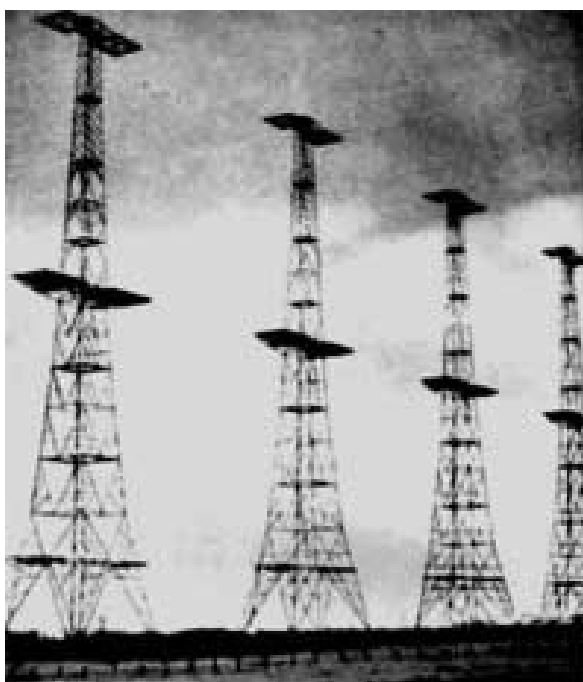


Fig. 7. East Coast CH receiver towers

Vir: internet: <http://www.radarpages.co.uk/mob/ch/chainhome5.htm>

Slika 2: Oddajni stolpi sistema CH



Vir: internet: <http://www.radarpages.co.uk/mob/ch/chainhome2.htm>

Slika 3: Sprejemna soba sistema CH



Vir: internet: <http://www.radarpages.co.uk/mob/ch/chainhome9.htm>

Poročila o ciljnih so poslali po telefonu v filtrirne sobe, ki so koordinirale majhno količino lovcev in tako povečale njihovo učinkovitost (Slika 3).

Nemške sile niso nikoli zares razumele CH-sistema in ga torej niso poskusile zares motiti ali uničiti.

Slika 4: Položaj radarskih postaj CH na vzhodni obali Anglije



Vir: internet: <http://www.radarpages.co.uk/mob/ch/chainhome11.htm>

2.1.2 RADAR FREYA IN WURZBURG

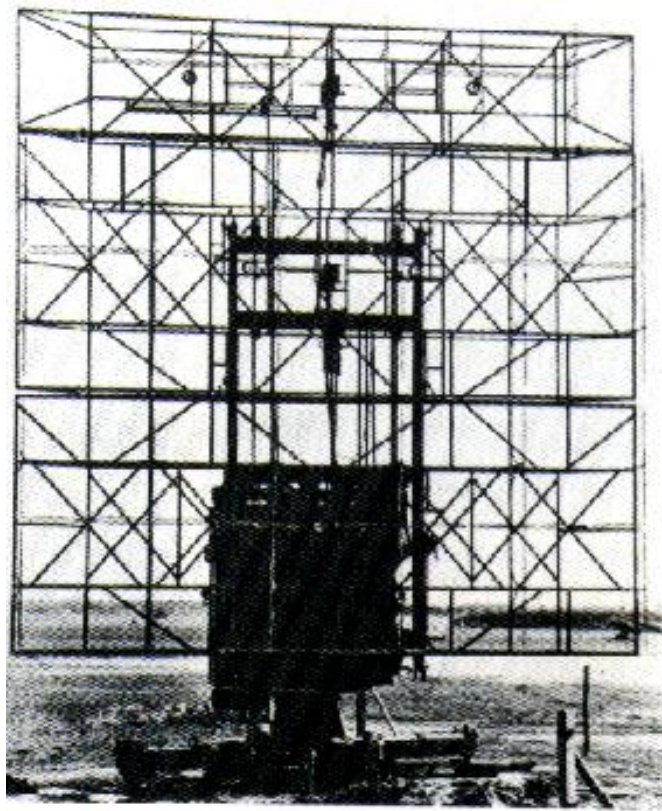
Radar Freya je zgodnja oblika nemškega radarja, uporabljenega med drugo svetovno vojno. Ime nosi po skandinavski boginji.

Prve preizkuse radarja za zgodnje opozarjanje so izvedli v začetku 1937, 1938 pa so delujoč radar izročili mornarici.

Kljub večji sofisticiranosti kot britanski CH je imel njegov razvoj veliko nižjo prioriteto skoraj do konca vojne.

V nasprotju s CH-sistemom, ki je deloval na 20-30 MHz, deluje Freya pri 1.2 m valovne dolžine v MHz, kar je 10x več kot CH, zato je bil lahko cel sistem manjši, a je imel boljšo ločljivost. Toda le osem teh sistemov je bilo na voljo, tudi pokritost je bila temu primerno manjša. Kasneje med vojno je Freya delovala v območju 2.3–2.5 metre/120–130 MHz. Širina pulza je bila 3 mikrosekunde z vršno močjo pulza 15–20 KW. PRF je bila 500 Hz. Zaradi manjše moči je imel domet sicer le 160 km in ni bil sposoben natančno določati višine, toda bil je popolnoma mobilni sistem (Slika 5).

Slika 5: Nemški radar Freya



Vir: internet: <http://www.radarworld.org/germany.html>

Radar Wurzburg je bil razvit pred II. svetovno vojno kot projekt privatnega podjetja Telefunken. Pod vodstvom dr. Wilhelma Runge so radar razvili do stopnje, ko so leta 1939 opravili demonstracije z radarjem kot namerilno napravo za topove nemške vojske. Seveda je bila vojska navdušena in je naročila proizvodnjo. Wurzburg je vstopil v aktivno rabo 1940.

Slika 6: Radar Wurzburg



Vir: internet: <http://www.radarworld.org/germany.html>

Kot prototip so razvili napravo FuMG62, ki je bila julija 1939 prikazana Hitlerju. Ekipo Telefunken je na osnovni mikrovalovne elektronke Klystron razvila natančen sistem, ki je deloval v območju 53-54 cm (553-566 MHz), za tiste čas zelo kratka valovna dolžina in s pulzem dolžine 2 mikrosekundi. Oddajna moč je bila 7–11 kW. PRF 3750 Hz. Največji doseg naj bi bil 29 km in je bil natančen na 25 m za merjenje razdalje.

Wurzburg je uporabljal 3 metre veliko parabolično anteno, nasajeno na kolesni prikolici. Sama antena se je lahko zložila za transport (Slika 6).

Med vojno so razvili več izvedenk radarja, ki so jih uporabili za različne namene.

Prvi Wurzburgu so uporabljali ročno, operater je moral signal najti s pomočjo osciloskopa. Ne zelo učinkovita metoda, posebno še zato, ker so morali za natančno določanje položaja tarče uporabiti žaromet! Ne glede na to pa je radar zahteval prvo žrtev maja 1940, ko so protiletalski topovi sklatili letalo po glasovnih navodilih operaterja radarja. Nekaterim radarjem so dodali še infrardečo opazovalno enoto, kar pa se je izkazalo za neuporabno, zato so to izvedenko nehali proizvajati.

Sledile so izboljšave v namerilnem sistemu. Model C so namerjali s pomočjo dveh oddajnikov oz. oddajnih rogov v sredini antene, iz katerih so izmenično pošiljali signal. Oba odboja sta šla skozi osciloskop z majhno časovno zakasnitvijo. Rezultat sta bili dve ločeni špici v signalu. Sedaj je moral operater le premikati anteno in držati signala v isti višini. Sistem je ponujal hitrejšo povratno informacijo glede spremembe višine in smeri tarče. Za

nameček pa operaterju ni bilo treba loviti maksimuma signala – moral je le izenačiti oba snopa.

Wurzburg D je leta 1941 prinesel konično skeniranje in ločen sprejemnik, ki se je vretel s 25 obrati na sekundo. Pridobljen signal je bil sedaj pomaknjen iz centra radarske antene in se je vretel okrog osi antene tako, da je ustvaril navidezni stožec, v katerem je bil cilj. Če se je letalo nahajalo na eni strani osi antene, je operater to videl kot naraščanje in upadanje signala, ko se je snop premaknil mimo njega. Operater je nato premaknil anteno v smeri močnejšega signala in centriral cilj (Slika 7).

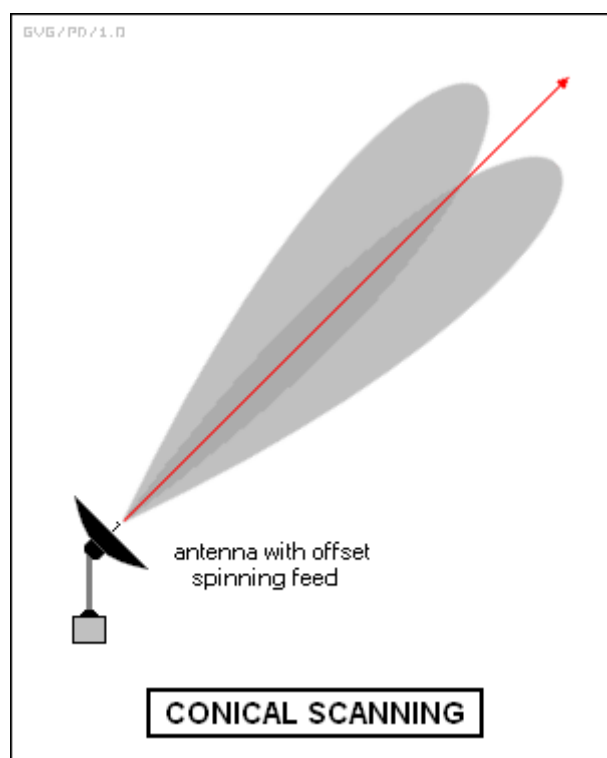
Izkazalo se je tudi, da je območje, kjer je signal najmočnejši, manjše kot je ločljivost snopa, ki ga zagotavlja antena, kar pomeni izredno povečano natančnost. Ločljivost D-izvedenice je bila 2 stopinji azimuta in 3 stopinje po elevaciji. Toda tudi model D ni bil dovolj natančen za direktno usmerjanje topov.

Da bi zagotovili sistem z večjo natančnostjo, so izdelali FuG 65 Wurzburg velikan. Temeljlil je na enakem vezju kot manjši model. Večja je bila antena – 7.4 m, močnejši je bil oddajnik, s tem pa se je povečal doseg na 70 km. Poleg tega je bila sedaj natančnost 0.2 stopinje po azimutu in 0.1 stopinje po elevaciji; več kot dovolj za direktno usmerjanje topov. Sistem je bil sedaj prevelik za transport na prikolici tovornjaka, zato so ga prilagodili za delovanje na železniškem vagonu. Med vojno so izdelali 1500 takih sistemov. Najmočnejši oddajnik, ki so ga izdelali, je zmogel 160 kW, vendar te izvedenke radarja niso nikdar prišle v proizvodnjo.

Britanski padalci so februarja 1942 napadli radarski položaj pri Brunevalu v Franciji in odnesli sklope radarja Wurzburg A. Odkrili so nekaj značilnosti sistema. Zaradi narave radaja – za podporo protiletalski artileriji je moral biti kar se da natančen, torej je bila frekvenca zelo stabilna. To lastnost so zavezniki izkoristili in razvili sistem motenja tako imenovano »okno«. Iz posebnih letal so spuščali aluminijaste trakove narezane na točno določeno dolžini, valovno dolžino radarja. Ti so ustvarili tolikšno količino ciljev, da jih operaterji nis mogli spremljati.

Britanski elektroničarji pa so bili predvsem presenečeni nad modularnostjo sistema, ki je vseboval tudi sistem za izločanje napak. Posledično nemški vzdrežvalci niso potrebovali tako veliko znanja iz elektronike kot njihovi angleški kolegi.

Slika 7: Primer konusnega skeniranja



Vir: internet: <http://www.vectorsite.net/ttradar2.html#m2>

2.1.3 H2S

Radar H2S je bil uporabljen kot navigacijsko sredstvo za sledenje zemljišču. Vgrajen je bil v britanske bombnike, ki so ponoči napadali nemška mesta in industrijska središča.

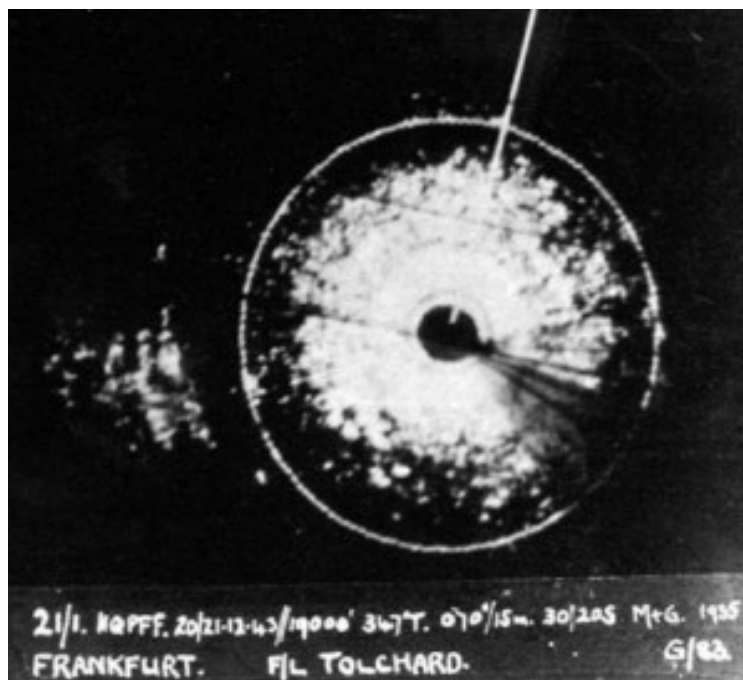
Razvoj tega radarja, ki je deloval v 10 cm področju, to je S-pas, je bil mogoč zaradi izdelave resonančnega magnetrona. Magnetron je močnostna vakumska cev – elektronka, ki proizvaja usmerjeno mikrovalovno sevanje. Ohišje je narejeno iz izvotlenega bakrenega kosa in ima dodan trajni magnet. Zaradi vzdolžnih cilindričnih izvrtin v ohišju se v tem inducira radijsko polje, ki ga pripeljemo po valovodu na anteno. Velikost izvrtin določa resonančno frekvenco, posledično pa tudi izhodno frekvenco.

Bombniško poveljstvo RAF je potrebovalo zanesljiv sistem navigacije, ki bi bombnike v vseh razmerah pripeljal na cilj. Kljub temu da so taki sistemi že obstajali, pa so bili še vedno odvisni od zemeljskih postaj, imeli so predvsem prekratek doseg. Že pred vojno so opazili spremembo slike na zaslonu, ko so z radarjem obsevali polja, mesta in industrijska središča. Leta 1941 pa so z 10 cm radarjem (3GHz) opremili letalo Bristol Blenheim. Med standardnim preizkušanjem radarja so odkrili bližnje mesto, oddaljeno 55 km. Po preizkusu so ustanovili skupino za razvoj namerilnega radarja v S-področju, ki bi ga vgradili v bombnik.

Radarja se je hitro prijela oznaka H2S – Home sweet home, kar je bilo učinkovito kot koda. Po učinkovitem testiranju je britanska vlada naročila 200 radarjev za vgradnjo v bombnike.

Bombniško poveljstvo je letala, opremljena s H2S, uporabljalo kot predhodnico glavnega vala. Stezosledci, kot so se imenovali, so odvrgli svetilne in zažigalne bombe nad tarčo, ki so jo predhodno zaznali s H2S. Preostali bombniki so se usmerili proti osvetljenemu območju in tam odvrgli smrtonosni tovor.

Slika 8: Radarska slika mesta Frankfurt; radar H2S



Vir: internet: <http://www.doramusic.com/Radar.htm>

Nemci niso vedeli za to napravo do leta 1943, ko je stezosledec treščil blizu Rotterdama. Nemški preiskovalci so v razbitini odkrili nenavadno napravo, ki je niso mogli spraviti k delovanju, ker niso imeli zaslona. Čez leto dni so v drugi razbitini našli delujoč zaslon in so napravo postavili na protiletalski bunker pri Berlinu. Pred njimi je zasijala radarska slika mesta z obrobjem in vsemi ulicami (Slika 8).

Radar H2X je ameriška različica H2S radarja, delovala je v X-območju. Zaradi manjše valovne dolžine je bila slika ostrejša. Radar je deloval na 3 cm področju s frekvenco 9375 MHz in uporabljal superheterodyne sprejemnik. Radar so uporabljali za bombardiranje z velikih višin. Vgrajen je bil v B29 in podatki z zaslona so se stekali v bombardirjev računalnik. Radar so lahko uporabljali tudi za navigacijo in iskanje ciljev. Po vojni so radar uporabili v civilni sferi, in sicer za meteorološki radar za opozarjanje pred nevihtami.

2.1.4 BLIŽINSKI VŽIGALNIK

Od obstoja letala kot bojnega sredstva so že razmišljali, kako se braniti proti takemu sredstvu. Zaradi hitrosti in gibljivosti letal je bilo zelo težko zadeti cilj z direktnim strelom. Potrebovali bi ali orožje z zelo visoko hitrostjo streljanja ali pa ogromno orožij. Skozi drugo svetovno vojno se je pokazalo, da je bila Nemčija pri uporabi protiletalskega topništva zelo učinkovita.

Malokalibrska orožja so bila nevarna letalom z gostoto ognja, velikokalibrski 88 mm topovi pa so bili natančno povezani z radarji. Manjkala je le ena stvar – vžigalnik, ki bi granato aktiviral v oddaljenosti, ki je najbolj primerna za uničenje letala. To napravo pa so iznašli v ZDA med samo vojno. Mornarica je namreč iskala način, s katerim bi lahko svoje težke topove uporabili tako proti letalom kot proti nasprotniku, skritej v gosti džungli.

Pojavilo se je veliko idej: zvočno, elektrostatično, toplotno magnetno in radijsko aktiviranje vžigalnika. Večina ponudb je bila nezadostnih, ker naprave niso prenesle centrifugalnih sil pri izstrelitvi iz topa z ožlebljeno cevjo. Tako so morali nazaj za projektne mize. Na koncu so izbrali elektronski vžigalnik.

Elektronski vžigalnik naj bi deloval po dveh konceptih. Od cilja odbite radijske valove bi ujela antena v granati in jih uporabila za oceno razdalje do cilja. Ta način so kasneje uporabili v vodenih protiletalskih in protitankovskih raketah. Imenoval se je polaktivno radarsko vodenje.

Drugi način, ki naj bi bil bolj logičen in je bil izbran, je temeljil na vžigalniku, sestavljenem iz štirih glavnih delov. Miniaturni radijski oddajnik–sprejemnik z ojačevalcem in kondenzatorjem, baterija, eksplozivna polnitev in varovala. Vse to so stlačili v prostor za vžigalnik in zadeva se je z navojem privila na granato. Vžigalnik je uporabljal telo granate kot anteno, kar je bilo še najbolj učinkovito.

Delovanje je bilo naslednje: Ko bi se granata dovolj približala cilju, bi nivo signala narasel in sprožil stikalo, ki bi sprostito električni naboj, shranjen v kondenzatorju. Ta bi bil dovolj močan, da bi aktiviral eksplozivno polnitev.

Koncept je zahteval, da bi naprava vzdržala pospeške v območju 20000G in vrtenje okoli 500x na sekundo. Ko je bilo to doseženo, so morali »le še stisniti« zadevo skupaj z baterijo in detonatorjem v prostor velikosti steklenice.

Januarja 1942 so izdali več izpopolnjenih vžigalnikov, jih vgradili v 5-inčne granate (Slika 9) in jih izstrelili iz protiletalskega topa. Po 8 kilometrih leta je 52 % granat eksplodiralo tik nad vodno površino, ostale so sicer zatajile, vendar pa je zaščita polovice granat, ki so delovale, daleč odtehtala ostale, tako da je bilo vredno odpreti proizvodnjo linijo. Vžigalniki so dobili ime VT – variable time, spremenljivo časovni! Razvili so tudi novo baterijo, kjer je izstrelitev aktivirala kemično reakcijo v celici. Pomen te baterije je bila njena majhnost – velikost kemičnega svinčnika.

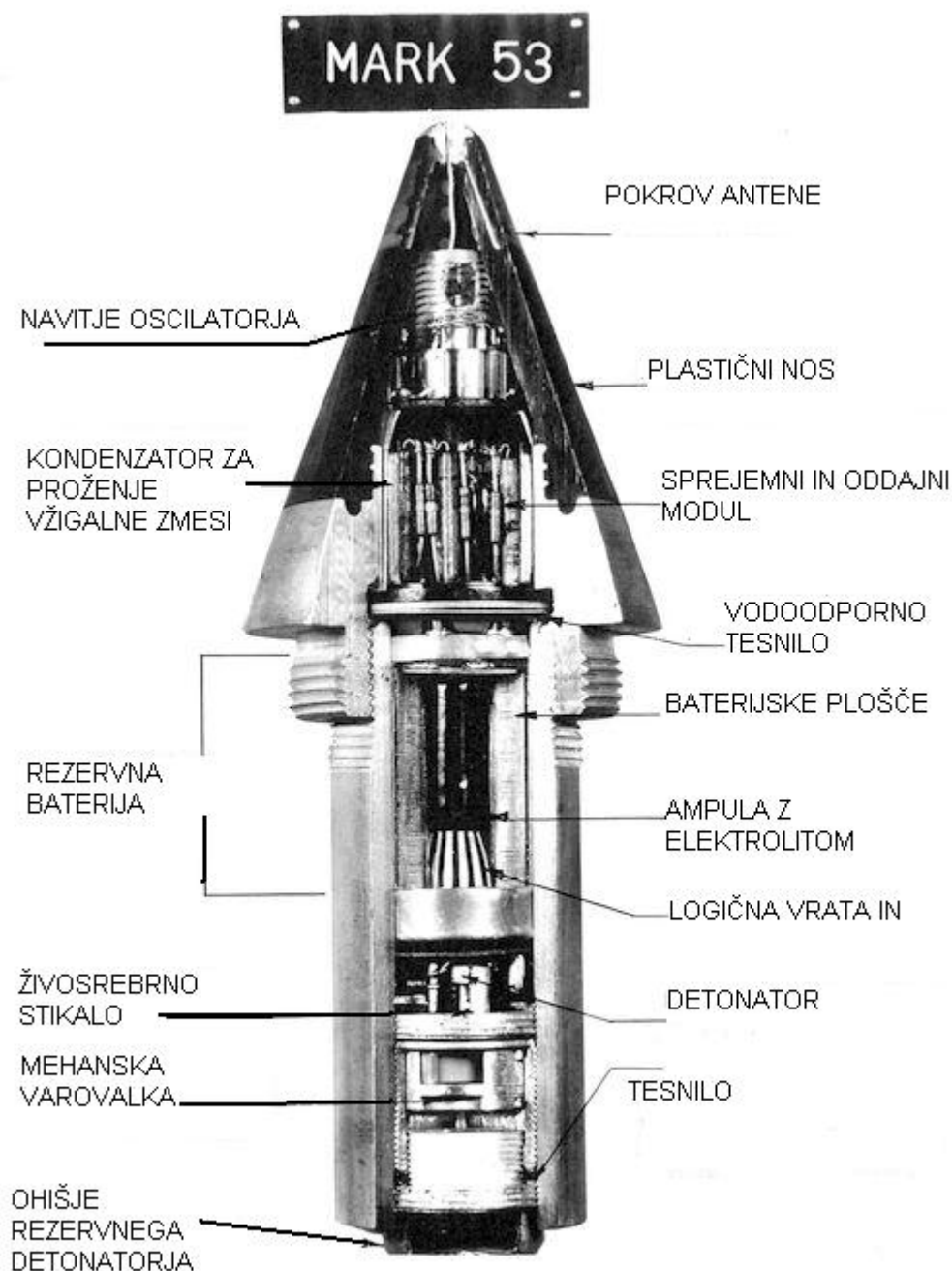
Aprila 1942 so napravo uspešno preizkusili na leteči tarči, toda vgraditi so morali še varovalke in stikalo za samouničenje. Novembra 1942 so strelivo z bližinskim vžigalnikom razdelili med ladje in prva, ki je strelivo bojno uporabila, je bila »USS. Helena«. Januarja 1943 so jo napadli štirje japonski bombniki in Helena je enega sklatila z drugo salvo.

Skozi 1943 naj bi 51 % letal sestrelile granate z bližinskimi vžigalniki, kar je bil izreden dosežek, glede na to, da je bilo nebo ves čas polno lovskih letal.

Med letom 1944 pa se je pokazala potreba po ukinitvi prepovedi tega streliva v Evropi. Nemčija je namreč začela bombardirati London z novim sredstvom – vodljivimi zračnimi bombami V1. Zavezniki so veliko število protiletalskih topov premaknili v obroč okrog Londona. Prostor okoli mesta so razdelili na kolobarje, zunanja dva so imeli na voljo za prestrežanje letala, notranja dva pa protiletalski topovi in zaporni baloni. Uporaba VT-granat se je pokazala v povečanem številu sestreljenih V1. V zadnjem mesecu bombardiranja so uničili 79 % bomb V1, za primerjavo 24 % uničenih na začetku bombardiranja. Na zadnji dan so se le 4 V1 »prebile« skozi, ostalih 100 pa so večinoma sestrelile VT-granate.

Po decembru 1944 je tudi artilerija dobila svoje VT-vžigalnika, kar je za pehoto pomenilo strah in trepet. Izkopani zaklonilniki niso bili več varni pred granatami, ki so eksplodirale nad njimi. Nemška vojska je to rešila z oklepnimi vozili, ki so prevažali vojake. Vendar pa so tudi ta vozila imela odprt vrh in so bila tako ranljiva za obstreljevanje.

Slika 9: Bližinski vžigalnik za 12,7 cm granato



Vir: internet: <http://www.history.navy.mil/faqs/faq96-1.htm#anchor1190487>

2.2 POMEMBNI RADARSKI SISTEMI PO DRUGI SVETOVNI VOJNI

2.2.1 RADARJI Z VALOVODNO ANTENO

Iz oddajnika se po valovodih širi signal z visoko frekvenco in veliko močjo – 3 MW ter na koncu uide skozi reže na valovodnih antene. Te reže so vrezane pod preverjenimi koti, tako da ima radar vedno snop z enako obliko. Zgodi pa se, da snop zaradi spremembe frekvence spremeni kot glede na ravnino antene. To lastnost odpravimo z zamikanjem antene za določen horizontalni kot, lahko pa tudi s programsko opremo, ki računa ta kot sproti. Horizontalni zamik snopa pa ni najslabša lastnost; predvsem za lovska letala to pomeni, da je snop usmerjen naravnost, antena pa rahlo v desno, kar povzroči, da se signal iz nasprotnovega radarja ne odbije nazaj, ampak vstran. To pa pripomore k zmanjšani radarski sliki letala, seveda pa le, če leti direktno proti nasprotniku.

Predstavniki valovodnih radarjev je AN/TPS 70, taktični radar srednjega dosega, katerega ima v lasti tudi Slovenska vojska. Na Sliki 8 vidimo primer ameriškega radarja AN/TPS 75, ki je v vsem enak radarju TPS 70, le antena je večja in vidno deljena. Na sliki vidimo antenski sistem, kontejner, ki vključuje prikazovalnik PPI, oddajnik, sprejemnik in operaterje ter periferno opremo na levi strani kontejnerja.

Radar ima doseg 240 milj z močjo pulza do 3 MW. Deluje na E/F področju s frekvenčnim razponom od 2.9 GHz–3.1 GHz. Moč oddajnega pulza mu zagotavlja močnostna elektronika oziroma pospeševalnik delcev twystron. Pulz pa odda 250-krat na sekundo.

Slika 10: Radarski sistem AN/TPS 75



Vir: internet: <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/equip/an-tps-75.htm>

Radar je namenjen za nadzor zračnega prostora in zgodnje opozarjanje. Hkrati je sposoben slediti x ciljem, opremljen je za preskakovanje med frekvencami, in sicer 16 frekvenc v enem modulu, če pa želimo drug sklop, ga moramo fizično zamenjati. Opremljen je tudi za boj proti elektronskemu motenju, predvsem s pasivnimi sredstvi, skakanjem po frekvencah, ima dodatno anteno, ki izloča motnje, tako imenovano omni anteno. Omni anteno dobro vidimo na zgornji sliki. To je pokončna antena s pokrovom na vrhu. Lahko tudi prikaže smer, iz katere prihajajo motnje, ki se poskušajo vriniti v sistem. Sistem preverja, ali je signal prišel v anteno po pravi poti, to je skozi glavni snop, in če opazi, da se smeri vstopa v sprejemnik ne pokrivajo s trenutnim položajem antene, tak signal avtomatično izloči, tudi če ima pravilno kodo. V sredi med glavno in omni anteno je še antena sekundarnega radarja IFF. Izgleda, kot bi bila antena IFF zamaknjena za določen kot glede na glavno anteno, v resnici pa je valovodna antena zamaknjena v desno glede na oddajni snop. Ta je namreč zaradi različnih faznih zamikov na valovodih usmerjen za nekaj stopinj v levo. Ta učinek se spreminja s spremembo oddajne frekvence. Oddajni snop je na grobo kompenziran z zamikom glavne antene, za bolj fine nastavitve pa skrbita procesor in post procesor, ki računsko uravnavajo pomen signala.

Radar je prikazan v transportni obliki, sicer ni popolnoma mobilna, lahko pa se ga v krajšem času sestavi in naloži na tovornjak ter prepelje na drugo lokacijo, kjer moramo zagotoviti pravilno napajanje in določeno višino položaja.

Radar pa ima zelo veliko pomanjkljivost, vsaj s stališča elektrotehnike. Namreč vse pomembne elektronske dele je potrebno hladiti, še posebno močnostne. In za hlajenje vitalnih delov radarja TPS 70 je uporabljena voda! Radar brez vodnega hlajenja ne more delovati, zato je pričakovati, da veliko časa vzdrževanja vzame preverjanje tesnjenja hladilnih cevi. Po mojem mnenju bi lahko hlajenje izvedli tudi drugače, brez vode.

Enak radar nosi v sebi letalo za zgodnje opozarjanje AWACS, le da je antena drugačne oblike – jajčasta. Letalo je dodatno opremljeno še s sistemom za prenos obdelane slike drugim udeležencem v boju.

Najpomembnejši prispevek radarju med hladno vojno pa je razvoj tehnologije za ločevanje ciljev, ki se gibljejo, pred nepremičnim ozadjem. Temu pravimo dopplerjev učinek. Primer: upoštevamo, da se opazovalec ne giblje glede na okolico in proti njemu z neko hitrostjo pelje vlak, ki piska, ta pisk opazovalec sliši z višjo frekvenco – višji ton, kot je dejanska ($f + f_1$), če pa se vlak oddaljuje, ga opazovalec sliši z nižjo frekvenco – nižji ton ($f - f_1$). Ta pojav velja za vsa valovanja, torej tudi za radijske valove. Tako lahko mirujoč radar s pomočjo tega načina zazna cilj, ki se giblje k njemu ali od njega, lahko tudi izračuna hitrost cilja. Taki radarji delujejo večinoma v pulznem načinu. Tako oddajo več sto pulzov velike moči v sekundi, visoko moč pa vzdržujejo le za čas pulza, ki je nekaj milisekund. Povprečna moč takega radarja je približno enaka zgodnjim radarjem, doseg pa neprimerno daljši. Kombinaciji obeh načinov pravimo pulzno dopplerski radar. Ta način omogoča izločanje ciljev, ki jih ne želimo spremljati. Sistem je namreč tako občutljiv, da zazna hitro vozeče avtomobile na avtocesti ali pa vlak. Tega seveda ne želimo spremljati, ker več ciljev odžira dragoceni procesorski čas, zato lahko omejimo radar na spremljanje tistih ciljev, ki se gibljejo z določeno hitrostjo ali več. Tej funkciji pravimo MTI–prikazovalnik gibljivih ciljev. Primer: Avtomobil pelje s hitrostjo 130 km/h, mi pa nastavimo mejno hitrost višje, na 180 km/h. Tako bomo zaznali le cilje, ki se gibljejo s to hitrostjo ali hitreje.

2.2.2 RADAR NA BOJNEM LETALU

Reaktivne lovce so v začetku 60-ih let prejšnjega stoletja začeli opremljati z radarji, kar jim je omogočalo boljše sposobnosti zaznavanja kot človeško oko in omogočilo uporabo polaktivno radarsko vodenih raket. Te rakete pa so omogočile spopade na daljših razdaljah, kot je nekaj sto metrov, kar je doseg topov. Posledično se je povečala tudi hitrost letal v spopadu, sedaj so letala v naletu izstrelila rakete, ne da bi jim bilo treba zmanjšati hitrost, kot je posledica v ostrih manevrih. Zgodnji lovci, kot je Mig 21, so uporabljali mehansko usmerjene vbočene antene. Tako imenovani krožnik je učinkovit način usmerjanja energije radarskega snopa kakor tudi zbiranja energije, odbite od cilja. Konkavne antene pa imajo svoje omejitve – predvsem mehanizem za usmerjanje krožnika je drag in zapleten ter posledično občutljiv za okvare. Hkrati pa take antene niso zelo selektivne pri oddajanju elektromagnetne energije in oddaja v širšem snopu, kar pomeni, da lahko nasprotnik zazna naš snop in z veliko verjetnostjo tudi smer, iz katere je prišel.

Slika 11: Radar z valovodno anteno APG-65 v letalu F/A-18A



Vir: internet: <http://kuku.sawf.org/Emerging+Technologies/2667.aspx>

V začetku so letala z radarjem opremljali izključno za boje v zraku proti lovcem, ko pa so se začeli pojavljati mali manevrirni izstrelki l. 1970, se je situacija drastično spremenila. Majhnost izstrelka ter posledično majhna radarska slika je omogočila izstrelku, da se prebije do tarč neopažen. Potrebovali so natančen, a tudi majhen radar, ki bi zaznal letečo bombo v letu nekaj deset metrov nad tlemi. Tukaj se je pokazala vrednost dopplerskega načina delovanja radarja. Tak radar je hitro zaznal gibajoč se cilj med šumi in odboji tik nad tlemi. Letalo je lahko letelo visoko, toda radar je cilj prikazal glede na relativno gibanje. Ko so ugotovili vrednost tega pojava, so se hkrati pojavile ideje o uporabi radarja na letalu, kot sredstvo za zgodnje opozarjanje.

Razvili so ravninsko rešetko. Te so ravno tako mehansko usmerjene kot parabolične, a so ravne in elektromagnetna energija se od njih odbije le pod enim kotom. Tak radar za zbiranje snopa uporablja fazni zamik med režami v anteni. Stranski snopi so sedaj veliko manjši in jih je posledično tudi težje motiti. Ravninska rešetka lahko pomeni celo prednost v določenih primerih. Če letali letita drugo proti drugemu, se radarski snop od ravninske rešetke odbije pod enim kotom, glede na smer leta. Zaradi kotnega zamika snopa na rešetki, ki je posledica seštevanja in odštevanja oddajnih snopov na valovodu antene, je smer glavnega snopa vedno usmerjena nekaj stopinj v levo. Temu pravimo škiljenje. Zaradi tega pojava moramo anteno nastaviti za oddajo pod kotom. Torej se sedaj nasprotnikov snop odbije od antene pod kotom in v drugo smer, dovolj v desno, da nasprotnik ne sprejme odboja.

En primer takega radarja je Zhuk-ME v letalu Mig 29 ali APG-65 v letalu F/A 18A (Slika 11). Ključ do izboljšave leži v elektronskem krmiljenju snopa, kar so prvič uporabili v protibalističnem sistemu radarjev leta 1970. Taki radarji uporabljajo več malih anten združenih v sklop, kjer je signal vsake antenice toliko fazno zamaknjen, da je skupni seštevnik snop, obrnjen v zeleno smer. V ostale smeri se signal zaduši oz. je matematično odštet. Elektronsko krmiljen snop ponuja veliko možnosti uporabe. Tak snop lahko spreminja oz. zavzame obliko v milisekundi in torej lahko deluje kot več radarjev. Primer uporabe bi bil način opazovanja in iskanja zemeljskih tarč, v istem času pa radar spremlja nebo in zračne tarče na njem.

Slika 12: Radar s pasivno fazno rešetko NIIP N-011M na letalu Suhoj Su-30MK



Vir: internet: <http://kuku.sawf.org/Emerging+Technologies/2667.aspx>

Tem vrstam radarjev pravimo radarji s pasivno rešetko. Z uporabo elektronskega usmerjanja snopa ohranjajo prikritost in zanesljivost – so namreč brez gibljivih delov. Imajo pa relativno velike izgube signala zaradi manjše občutljivosti.

Mig 31 je bil prvi operativni lovec z radarjem z rešetko s faznim zamikom. Njegov radar Zaslon – S800 je imel največji doseg do 200 km. Lahko je sledil 10 tarčam in od teh 4 napadel hkrati. Radar je bil povezan tudi z infrardečim sledilnikomIRST v izvlačljivem jamboru v nosu. Do štirje Migi 31 lahko komunicirajo po posebnem podatkovnem vodilu na razdalji 200 km drug od drugega in s tem pokrijejo veliko ozemlja. Z radarjem upravlja operater na zadnjem sedežu. Njegova kabina ima le dve odprtini, na vsaki strani trupa po eno. V kratkem naj bi lovci Mig 31 izvedenk M, D, Bs dobili nadgrajen radar Zaslon – M, ki naj bi imel podaljšan doseg do 400 km za boj proti ciljem tipa AWACS. Imel naj bi sposobnost napasti 6 ciljev hkrati, operater pa naj bi imel na voljo moderno opremo in zaslone. Primer takega radarja je še NIIP N -011M Bars, vgrajen v lovca Suhoj SU-30MK (Slika 12). Radar je sposoben slediti 15 tarčam hkrati, napade pa lahko 4 od njih hkrati. Na zahodu je podoben radar AN/APQ-164 na letalu B-1B.

Rešetka z aktivnim elektronskim krmiljenjem AESA (Slika 13) spremeni koncept antene še naprej. Namesto z zamikom faze v signalih, ki prihajajo iz enega oddajnika, smo sedaj dobili več sprejemno-oddajnih modulov v sami anteni. Vsak od teh oddaja svoj signal v okolico, sprejme njegov odboj in ga celo procesira. Vsi moduli v anteni lahko sodelujejo in ustvarijo močan radar, lahko pa opravljajo več nalog hkrati, kot npr. radar, opozorilnik sevanja in nekateri celo kot motilec. Tem modulom lahko dodelimo katerokoli vlogo, seveda z mislimi na odvisnost moči elementa od števila modulov.

Slika 13: Radar AESA v demonstratorju tehnologije JSF



Vir: internet: <http://kuku.sawf.org/Emerging+Technologies/2667.aspx>

Slika 14: Moderni radar AESA na letalu F/A-18E/F



Vir: internet: <http://kuku.sawf.org/Emerging+Technologies/2667.aspx>

AESA zagotavlja 10x – 30x večjo združeno zmogljivost, vključno z izboljšano ločljivostjo osnovnih podatkov, ki jih zagotavlja radar: razdalja, višina, smer, hitrost cilja. Je zanesljivejši in zahteva manj vzdrževanja, kar lahko prevedemo v nižje operativne stroške. To je tudi logično, saj je napetostni del končne stopnje ojačanja deljen med moduli, zato ni potrebe po enormnih številkah za dosego visoke stopnje ojačanja. Tako je okno med napakami na modulih do 100 x večje kot na pasivnih rešetkah. Ravno tako 10 odstotna odpoved modulov v AESA-rešetki ne pomeni izgube funkcije, le sposobnosti sistema se bodo zmanjšale.

Toda ta tehnologija ni bila poceni. Skozi leta raziskav in milijone dolarjev ter novih tehnologij so uspeli razviti tak radar za vojsko. Njegova funkcija naj bi bila opazovanje in sledenje zračnega prostora za potrebe ameriške balistične zaščite. Kasneje so se s projektom F-22 in JSF ustvarili pogoji za miniaturizacijo in vgradnjo radarja AESA še v letala.

Sama tehnologija je izredno draga, ker je vsak modul v osnovi neodvisen radar. Zato je tudi cena za en sam modul 2.000 dolarjev in samo celotna antena lahko stane 4 milijone dolarjev!

2.3 MODERNI RADARSKI SISTEMI

2.3.1 RADAR AN/SPY-1 V SISTEMU AEGIS

Ime sistema AEGIS je vzeto iz antične Grčije. Egida naj bi bil oklep boga Zeusa, ki je bil zaradi tega neranljiv, še več, z njim naj bi celo zaslepil sovražnike. Namenjen je prvenstveno za zaščito ladjevja pred letalskimi napadi. Po letu 1960 je ameriška mornarica spoznala, da reakcijski čas, ognjena moč in uporabnost v vseh okoljih njihovih oborožitvenih sistemov niso zadoščali za boj proti novi grožnji, protiladijski raketi. Rezultat tega so bile zahteve po naprednem sistemu za vodenje protiletalskih sistemov. Leta 1969 so razvojni program imenovali AEGIS – božji ščit. Sistem je sestavljen iz radarja AN/SPY-1 (Slika 15), raketnega sistema standarda SM-2 in sistema topov gatling za zaščito pred manevrirnimi raketami. Poudarek je na računalniškem programu vodenja sistema, ki ima pristojnosti avtomatskega sprejemanja odločitev. Ta vmesnik je sposoben izvajati več operacij hkrati proti grožnjam iz več okolij: iz zraka, vode in pod vodo. Sistem lahko deluje popolnoma avtomatsko in ima vgrajeno logiko za ločevanje stopnje ogrožanja, ki jo cilj predstavlja. V sedanjem času je bil sistem izboljššan do te mere, da lahko služi kot sistem balistične zaščite območja pred izstrelki srednjega in kratkega dosega. Ponavadi je AEGIS sistem vgrajen v ladji velikosti rušilca ali križarke, ki je posebej namenjena za boj proti zračnim ciljem. Prva ladja z operativnim sistemom AEGIS je bila križarka razreda Ticonderoga (Slika 16). Ladja ima poleg dveh topov 76 mm, še dva vertikalna lanserja raket SM-1/2, iz katerih lahko izstreljuje tudi rakete HARPOON in Tomahawk. Za bližnjo obrambo pa služi sistem CIWS z lastnim radarjem in 20 mm topom Gatling.

Leta 1991 pa je bil s sistemom AEGIS oborožen prvi od novih prikritih rušilcev tipa Arleigh Burke. Po letu 1992 so začeli sistem prilagajati za uporabo proti balističnim raketam. Srce sistema je radar AN/SPY-1, večfunkcijski radar s členi, ki lahko s faznim zamikom nadzorujejo gibanje snopa. Radar omogoča t. i. »pencil beam« – ozek snop, s katerim lahko zaradi visoke ločljivosti sledi oziroma izstreljuje orožje proti več ciljem hkrati, govora je o 100 ciljih hkrati. Radar ima maksimalno izstopno moč pulza 4 MW.

Prednosti sistema AN/SPY-1 so:

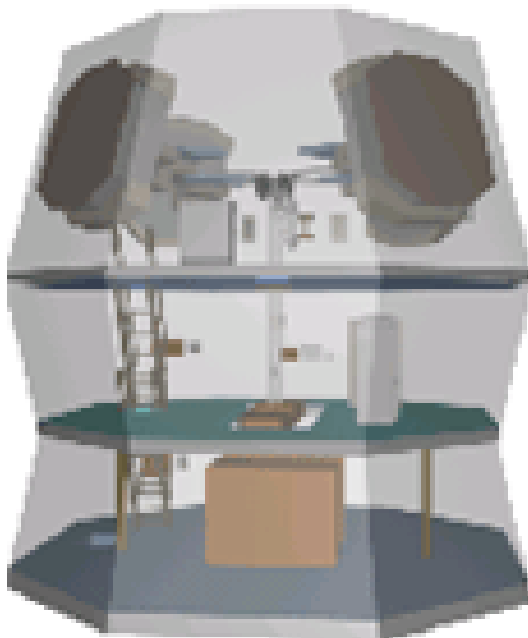
- opravlja več funkcij – opazovalni in namerilni radar,
- zelo hiter prehod iz tihega načina v polno oddajno moč ter do polne situacijske obveščeniosti,
- hitra reakcija bojnih sistemov, od zaznave rakete do delovanja obrambnih sistemov je manj od 10 s,
- lahko upravlja z več bojnimi sistemi hkrati,
- tarče osvetli in zelo hitro ukrepa avtomatsko ali pa preko ukaza kontrolorja oborožitve,
- radarju lahko zelo natančno določimo občutljivost, kar pomaga pri ciljnih z manjšo radarsko sliko in različnih taktičnih situacijah,

Slabost pa je posledica občutljivosti:

- sistem je zasnovan za delovanje v globokih vodah in za omejene obalne operacije. Za te operacije morajo sistem prilagoditi. Predvsem morajo nastaviti občutljivost pri skeniranju zračnega prostora nad kopnim. Sistem je namreč izredno občutljiv na

odboje od ovir na terenu, še preveč občutljiv. Nastavitve občutljivosti pa omejuje sposobnost zaznavanja majhnih in hitrih ciljev na nizkih višinah.

Slika 15: Prikaz vgradnje nepremičnih anten radarja AN/SPY-1



Vir: internet: <http://navysite.de/weapons/aegis.htm>

Slika 16: Antena SPY-1 na nadgradnji križarke AEGIS



Vir: internet: <http://navysite.de/weapons/aegis.htm>

2.4 PRIHODNOST

2.4.1 LIDAR

Svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj je tehnologija, ki določa razdaljo do cilja s pomočjo svetlobnih pulzov. Razdaljo do objekta izmerimo iz časa med oddajo pulza in časa, ko se svetloba, odbita od cilja, vrne v sprejemnik. Torej zelo podobno kot radar, še celo hitrost potovanja svetlobnega pulza je enaka. V kontekstu z vojaško uporabo se uporablja akronim LADAR, ki pomeni lasersko zaznavanje in določanje razdalj.

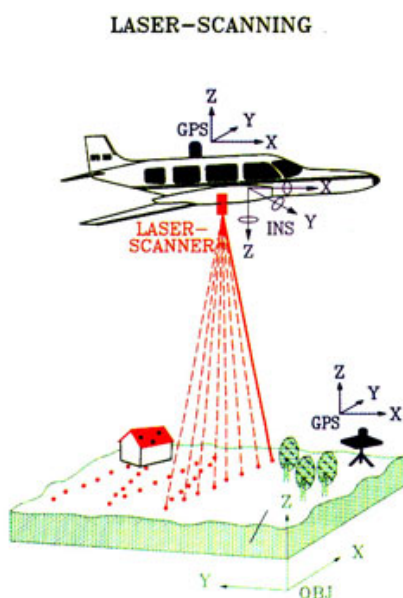
Glavna razlika med LIDAR-jenim radarjem je, da je valovna dolžina svetlobnega pulza veliko manjša kot valovna dolžina radarskega signala. Ponavadi uporabljajo ultravijolično, vidno ali infrardečo svetlobo. Ker je valovna dolžina tako kratka, to so mikro in nano metri, je LIDAR zelo občutljiv na delce v atmosferi in tudi na spremembe v njej. Zaradi tega je zelo uporaben v meteorologiji in raziskavah atmosferskih pojavov. Ker so valovne dolžine tako majhne ponuja LIDAR odlično ločljivost pri opazovanju. To gre celo tako daleč, da lahko z lidarjem zaznamo molekule različnih snovi v zraku.

Tipični laser ima zelo ozek snop, kar omogoča odličen posnetek površine objekta, ki je izpostavljen svetlobi. Do sedaj so lidar večinoma uporabljali v meteorologiji, zadnje čase pa se lidar uporablja za natančno kartografiranje zemeljskega površja (Slika 17, 18).

Tak lidar je nameščen na letalu ali na satelitu in iz orbite snema površje.

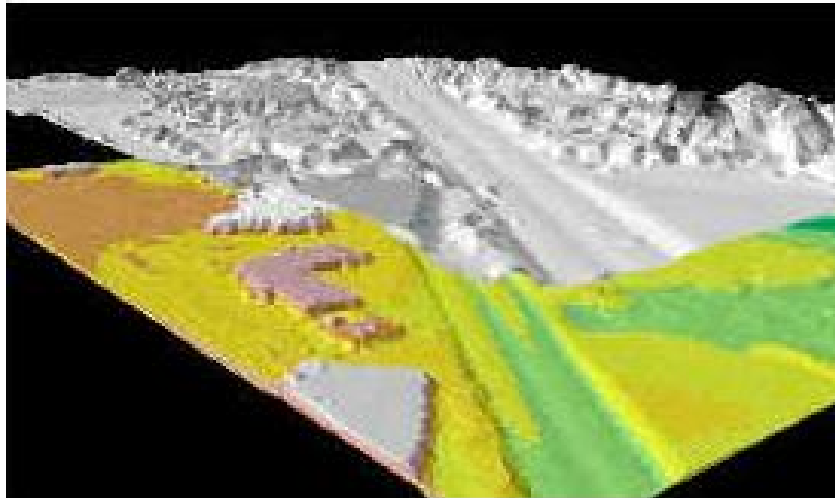
Lidar ravno tako uporabljajo v geologiji za merjenje ledenikov, gozdov. Že nekaj časa znanstveniki do milimetra natančno merijo premike lune v naši orbiti, naši policisti pa z njim merijo hitrost vozil.

Slika 17: Lasersko skeniranje z letala



Vir: internet: <http://www.sbgmaps.com/lidar.htm>

Slika 18: Topografska 3D slika terena posneta z LIDAR opremo



Vir: internet: <http://www.sbgmaps.com/lidar.htm>

Govoriti o vojaški uporabi LIDAR-ja je še prekmalu, vendar se raziskave premikajo v to področje. Plačane so raziskave za uporabo visoke ločljivost LIDAR-ja – LADAR-ja pri identifikaciji bojnih vozil – še posebno tankov in letal.

Laserski sistem kategoriziramo v skenirajoči in brez skeniranja. Prvi lahko premika snop v množici črt, lahko pa se premika tudi v drugih oblikah. V prihodnosti bodo pametni izstrelki poleg radarja imeli še lidar, ki bo uporabljen za identifikacijo cilja. Če cilj ne bo pravilen oz. če bo obravnavan kot prijateljski, se bo izstrelak samouničil. Prav tako je podoben sistem v pomoč pilotu letala, ki se že tako spopada z visoko hitrostjo, tako je lahko identifikacija cilja vprašljiva, z lidarjem pa bi cilj prepoznal v trenutku, ko bi pritisnil na sprožilec. Sistem ima lahko uporabo tudi v izvidništvu; s svetlobo določene valovne dolžine bi pregledovali področje in bi lahko hitro določili, ali so spodaj prikrite nasprotnikove enote.

3 ZAKLJUČEK

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. Nekako tako so napravili Angleži v bitki za Britanijo leta 1940, ko so izkoristili svoje vedenje o situaciji bitke v zraku in uporabili svoje manjše sile za boj tam, kjer je nasprotnika najbolj bolelo. Zaradi visokih izgub in neuspešnosti svojih sil, predvsem pa zaradi časovnih omejitev, se je nemška vojska umaknila in s tem zagrešila prvo v vrsti strateških napak – ni si pokorila Velike Britanije, ki je zato lahko šla v razvoju še naprej. Razvili so radar v 10 cm območju, ki je dejansko lastnim bombnikom spremenil noč v dan, omogočal je zaznavanje nemških podmornic, ko so prišle na površje na sredi Atlantika, in omogočil prvi zares uporaben večfunkcijski radar z zaslonskim prikazovalnikom. Nemški radarji tistega časa so še vedno uporabljali osciloskope za zaznavanje azimuta cilja in njegove oddaljenosti. Zaradi tega jih je bilo lažje motiti, vendar pa so bili zelo natančni pri določanju podatkov o cilju. Njihov prispevek sta modularnost sistema in mobilnost. K temu bi dodali še izredno dodelano vzdrževanje s sistemom za izločanje napak in že dobimo radar, ki je v osnovi podoben današnjim mobilnim sistemom, kot je radar TPS 70, katerega ima v lasti tudi Slovenska vojska. Radar je pomemben za razvoj zaradi svoje antene – ravninska rešetka in posledično zaradi neobčutljivosti na motnje. Radar je popolnoma samostojen sistem in kot takega ga tudi uporabljajo za nadzor zračnega prostora in zgodnje opozarjanje.

Tu je še pulzno doplerski način delovanja, ki pravzaprav omogoča videti premikajoči se cilj v množici odsevov iz ozdja. Zaradi tega je nadzor zračnega prostora veliko bolj učinkovit tudi v goratih državah, predvsem pa omogoča izločanje ciljev, ki nas ne zanimajo. V pomanjšani obliki so radarski sistemi prinesli v zračni boj novo dimenzijo in način bojevanja. Zaradi zaznavanja na večjo razdaljo so prišli v uporabo vodeni izstrelki zrak-zrak, od katerih imajo nekateri celo podoben radar, kot ga ima nosilno letalo. Ker imajo ti izstrelki samovodenje, se je spremenil tudi način bojevanja. Sedaj to ni več klasični boj letalo proti letalu, temveč nalet več letal, ki prožijo svoje izstrelke proti ciljem z velike oddaljenosti, se obrnejo in z visoko hitrostjo poskušajo ubežati izstrelkom, ki jih je za njimi poslal nasprotnik. Nato se preživeli obrnejo za še en nalet. In tako, dokler imajo izstrelke.

Vse skupaj je podobno spopadu vitezov na turnirju. Viteza večkrat zdirjata drug proti drugemu, dokler jima ne zmanjka kopij, nato se spopadeta iz neposredne bližine z meči. V našem primeru to pomeni na stari način s topovi in težkimi mitraljezi.

Miniaturizacija komponent je omogočila razvoj bližinskega vžigalnika, ki je v bistvu pomanjšan radar, to pa je omogočilo današnja moderna orožja. Od izstrelkov Tomahawk do atomske bombe. Že v osnovi pa je vplival na spremembo pehotnega bojevanja. Osebe je moralo biti bolj zaščiteno pred artilerijskim ognjem in vojske so začele najprej uporabljati oklepne transporterje za prevoz pehote na bojišče, kasneje pa specializirane oklepnike, kot sta M2 Bradley in Ruski BMP-3, ki sta nevarna celo glavnim bojnim tankom.

Kot v odgovor na vse večjo grožnjo atomskih orožij, posebno še balističnih raket, so razvili sisteme za boj proti tem. Seveda je osnovna komponenta teh sistemov zmogljiv radar, kajti izstrelki se gibljejo s hitrostjo nekaj km/s. Zaradi tega mora biti tak radar vrhunec tehnologije, ki pa se še vedno razvija. Kmalu lahko pričakujemo vse večji poudarek na razvoju svetlobnega radarja. LIDAR deluje na valovni dolžini svetlobe, torej omogoča enak način opazovanja kot naš organ, ki mu pravimo oko, in ki nam ga je narava podarila milijone let pred našim odkritjem radarja.

LITERATURA

INTERNET

1. <http://www.radarpages.co.uk>
2. <http://navysite.de/weapons/aegis.htm>
3. <http://www.sbgmaps.com/lidar.htm>
4. <http://kuku.sawf.org/Emerging+Technologies/2667.aspx>
5. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/equip/an-tps-75.htm>
6. <http://www.history.navy.mil/faqs/faq96-1.htm>
7. <http://www.doramusic.com/Radar.htm>
8. <http://www.vectorsite.net/ttradar2.html>
9. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/an-spy-1.htm>
10. <http://www.radarworld.org/germany.html>
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

VIRI

1. Zakon o avtorski in sorodnih pravicah UL RS, št. 21/95

SEZNAM TABEL IN SLIK

- Tabela 1: Tabela radiofrekvenčnih pasov (str. 6)
Slika 1: Sprejemni stolpi sistema CH (str. 9)
Slika 2: Oddajni stolpi sistema CH (str. 9)
Slika 3: Sprejemna soba sistema CH (str. 10)
Slika 4: Položaj radarskih postaj CH na vzhodni obali Anglije (str. 10)
Slika 5: Nemški radar Freya (str. 11)
Slika 6: Radar Wurzburg (str. 12)
Slika 7: Primer konusnega skeniranja (str. 14)
Slika 8: Radarska slika mesta Frankfurt. Radar H2S (str. 15)
Slika 9: Bližinski vžigalnik za 12,7 cm granato (str. 17)
Slika 10: Radarski sistem AN/TPS 75 (str. 18)
Slika 11: Radar z valovodno anteno APG-65 v letalu F/A-18A (str. 20)
Slika 12: Radar s pasivno fazno rešetko NIIP N-011M na letalu Suhoj Su-30MK (str. 21)
Slika 13: Radar AESA v demonstratorju tehnologije JSF (str. 22)
Slika 14: Moderni radar AESA na letalu F/A-18E/F (str. 23)
Slika 15: Prikaz vgradnje nepremičnih anten radarja AN/SPY-1 (str. 25)
Slika 16: Antena SPY-1 na nadgradnji AEGIS križarke (str. 25)
Slika 17: Lasersko skeniranje z letala (str. 26)
Slika 18: Topografska 3D slika terena, posneta z LIDAR opremo (str. 27)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

AN/SPY-1	Radar sistema AEGIS ameriške mornarice
AESA	Active Electronically Scanned Array (aktivna rešetka z elektronskim skeniranjem)
AWACS	Airborne Warning and Control System (sistem zračnega vodenja in opozarjanja)
C3I	Command, control, communication, intelligence (sistem vodenja, poveljevanja, komunikacij in obveščanja)
CH	Chain Home (Angleška mreža radarjev med 2. sv. vojno)
CIWS	Close-in weapon system (sistem bližnje obrambe)
H2S	Home Sweet Home (akronim za britanski radar na 10 cm področju)
IFF	Identification Friend or Foe (identifikacija prijatelj sovražnik)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Ojačanje svetlobe s pomočjo vzbujanja z sevanjem)
LADAR	Laser Detection And Ranging (Lasersko zaznavanje in določanje razdalj)
LIDAR	Light Detection And Ranging (Svetlobno zaznavanje in določanje razdalj)
MTI	Moving Target Indicator (prikazovalnik gibajočih se ciljev)
NATO	North Atlantic Treaty Organisation (severnoatlantska organizacija)
PRF	Pulse Repetition Frequency (frekvenca pulza)
RCS	Radar Cross-Section (Radarska površina)
RADAR	Radio Detection And Ranging (radijsko zaznavanje in merjenje razdalj)
SM-2	Standard Missile (mornariška raketa sistema AEGIS)
ULRS	Uradni list republike Slovenije
V-1	Vergeltungswaffe 1 (maščevalno orožje – letéča bomba)
ZDA	Združene države Amerike
VT	Variable Time (spremenljivo časovni)

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 Arber Kramar,

IZJAVLJAM,

da je strokovno delo z naslovom

RADARSKI SISTEMI

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.

Strokovno zaključno nalogo je lektorirala : Breda KRAMAR, prof. slovenščine.

vod. Arber KRAMAR, dipl. ing. strojništva

Datum: 09. februar 2006