

RADARJI V VOJAŠKIH LETALIH

PETER LEKŠE

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

V članku so predstavljeni osnovni koncepti delovanja radarjev. Razložena je radarska enačba in podrobno obravnavano usmerjanje signala z antenami. Na koncu je prikazano, kako radar izloči svojo tarčo iz zašumljenega signala z uporabo Dopplerjevega pojava ter obenem izmeri njeno razdaljo in hitrost.

RADAR SYSTEMS IN MILITARY AIRCRAFT

This article presents the basic concepts of radar operation. The radar equation is explained and the steering of signals with antennas is discussed in detail. Finally, it is shown how radar extracts its target from a noisy signal using the Doppler effect, while simultaneously measuring its distance and speed.

1. Uvod

Radar je naprava, ki z radijskimi valovi zaznava predmete. Ime izhaja iz angleške kratice *RA*dio *DE*tectio*N* And *R*ang*ing*, kar pomeni zaznavanje in določanje razdalje z radijskimi valovi, poleg tega pa omogoča tudi merjenje smeri in hitrosti predmetov.

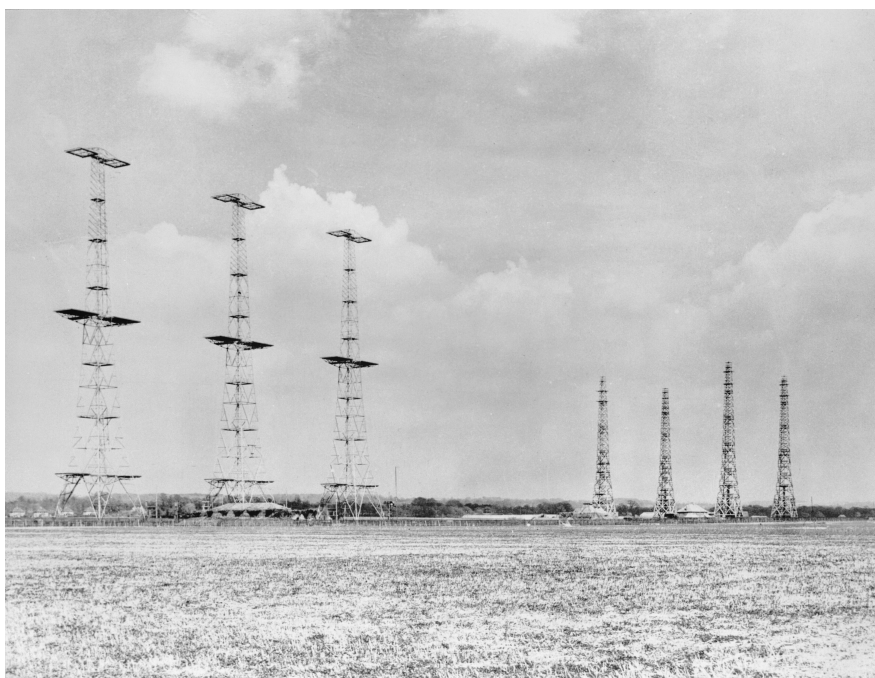
Začetki razvoja radarjev segajo v leto 1886, ko je Heinrich Hertz odkril, da se radijski valovi odbijajo od kovin, prevodnikov in dielektrikov, podobno kot vidna svetloba. Leta 1895 je Alexander Popov skonstruiral napravo za zaznavanje oddaljenih strel. Z oddajnikom, ki je temeljil na iskrišču, jo je nameraval uporabiti za komunikacijo med ladjami, pri tem pa ugotovil, da lahko z njo zazna tudi prisotnost drugih plovil. V naslednjih desetletjih so države, kot so Nemčija, Združeno kraljestvo, Združene države Amerike, Sovjetska zveza, Francija idr., razvile lastne radarske sisteme za zaznavanje ladij in pozneje letal [1, 2].

Sredi tridesetih let 20. stoletja so v Združenem kraljestvu razvili prvi radarski sistem za zgodnje opozarjanje na zračne napade *Chain Home*. Bil je ključen pri obrambi pred nemškimi zračnimi napadi v drugi svetovni vojni [3]. Na sliki 1 vidimo velike antene, ki so bile potrebne za delovanje sistema.

Najpomembnejši izum v razvoju radarjev je bil magnetron. Razvili so ga v Združenem kraljestvu leta 1940 in tehnologijo delili z ZDA. Magnetron je močan izvor mikrovalov, torej elektromagnetnega valovanja z valovno dolžino v območju centimetrov. To je veliko manj kot sto do nekaj deset centimetrov, kar so dosegali prej. Manjša valovna dolžina omogoča boljšo ločljivost, poleg tega pa zahteva manjšo anteno. Zaradi kombinacije kompaktnosti in velike moči je magnetron omogočil izdelavo radarjev, ki so jih lahko vgradili tudi v letala [5]. Na sliki 2 je njegov prerez.

Po drugi svetovni vojni so tehnologijo začeli uporabljati tudi v civilne namene, kot so civilno letalstvo, meteorologija, kartografranje terena, astronomija, idr., magnetron pa je še danes jedro mikrovalovk. Razvoj v vojaške namene se je zaradi novih napetosti med vzhodom in zahodom nadaljeval. Izboljševali so predvsem moč radarja, načine zaznave in obdelave signalov ter dodajali nove funkcionalnosti, na primer vodenje radarskih raket in kasneje sledenje pilotovemu pogledu.

Ena največjih izboljšav današnjih radarjev je uporaba antenskih skupin (angl. *phased-array*). Namesto ene velike antene uporabimo mrežo manjših, med katerimi nastavljamo fazo. Tako lahko z uporabo interference usmerjamo anteno brez mehanskih premikov. Omogoča hitrejšo preiskovanje območja, večjo natančnost in opravljanje več nalog hkrati, na primer sledenje več tarčam naenkrat.



Slika 1. Radarske antene sistema Chain Home. Na levi so tri oddajne antene (višina 110 m) z oddajno zgradbo, na desni pa štiri sprejemne antene (višina 73 m) v rombski postavitvi s svojo zgradbo. Vir: [4].



Slika 2. Prerez magnetrona, na vrh sodi še en magnet. Na sredini je katoda, okrog pa votline, ki delujejo kot induktivno-kapacitivni členi. Na eno od sten je priključena antena, ki zaradi sklopitve votlin prejme celotno moč. Vir: [6].

Današnji razvoj radarjev tekmuje z razvojem tehnologij prikrivanja (angl. *stealth*), ki poskušajo zmanjšati verjetnost zaznave s čim večjo absorpcijo in razpršitvijo vpadnega signala. Znanstveniki razvijajo tudi metamateriale z negativnim lomnim količnikom, ki bi lahko pri določenih frekvencah usmerjali elektromagnetno valovanje okoli tarče in jo tako naredili praktično "nevidno".

Po drugi strani se v razvoj radarjev vključujejo nove tehnologije, kot je umetna inteligenca (AI) za izboljšano prepoznavanje tarč, ter širokopasovni radarji z naprednimi algoritmi za obdelavo signalov, ki povečujejo natančnost in razločevanje tarč. Za fizike morda najzanimivejša tehnologija v razvoju pa je kvantni radar, ki uporablja kvantno prepletenost za večjo natančnost in zmanjšanje šuma.

V nadaljevanju si bomo podrobneje ogledali delovanje radarja, radarsko enačbo, določanje smeri in razdalje.

2. Osnove delovanja radarja

Radar deluje tako, da najprej izseva elektromagnetno valovanje. To se od tarče odbije nazaj k radarju, ki ga zazna. To je močno poenostavljen opis, zato bomo v nadaljevanju obravnavali, kako modeliramo prejeti signal. Shema na sliki 3 ponazarja naše razmišljanje.

2.1 Izsevani signal

Zamislimo si anteno, ki izotropno oddaja signal z močjo P_i . Signal se širi v obliki sfere, zato je gostota izsevane moči j_i na oddaljenosti R enaka

$$j_i = \frac{P_i}{4\pi R^2}. \quad (1)$$

Skoraj vse antene pa signal oddajajo usmerjeno, kar pomeni, da je izsevana moč zgoščena v določen prostorski kot. Razmerje med močjo brezizgubne usmerjene antene in močjo izotropne antene v neki smeri imenujemo smernost. Toda realne antene imajo med vhodno in izsevano močjo izgube, zato dejansko izsevano moč v določen prostorski kot opiše parameter ojačitve (angl. *gain*) G . Ime je nekoliko zavajajoče, saj antena oddane moči ne poveča, temveč jo le usmeri. Podrobneje ga bomo obravnavali kasneje. Če upoštevamo ojačitev oddajne antene G_i , je gostota moči na razdalji R enaka

$$j_i = \frac{P_i G_i}{4\pi R^2}. \quad (2)$$

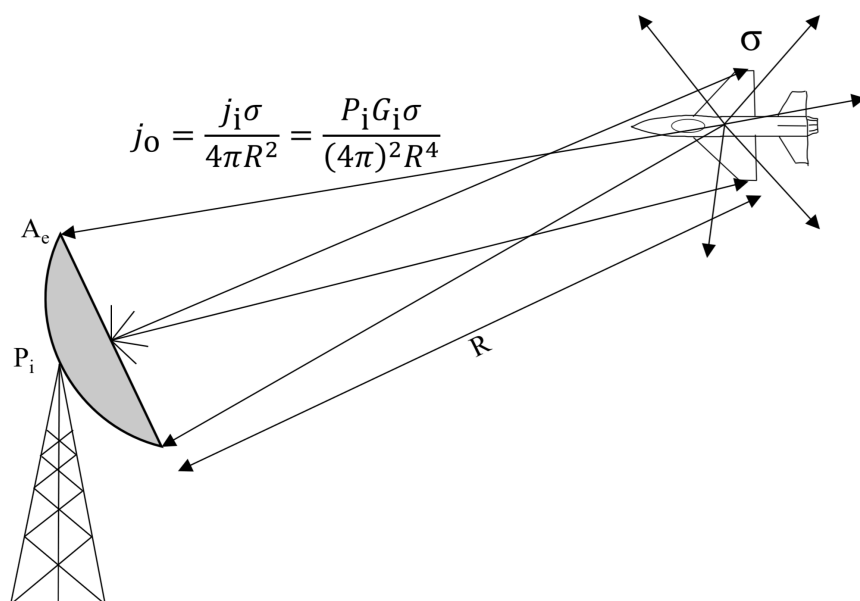
2.2 Prejeti signal

Ko signal doseže tarčo, se zaradi razlike v dielektrični konstanti sredstev del valovanja odbije. Glede na hrapavost površine se odbiti del razprši v različne smeri. Če je tarča iz prevodnega materiala, se odbije skoraj vsa vpadna moč, če je iz dielektrika, pa se del moči absorbira ali prepusti. Moč P_o , ki se odbije nazaj proti radarju, izračunamo tako, da vpadno gostoto moči pomnožimo z radarskim presekom (angl. *radar cross section*, RCS) σ . Ta ima enote površine in je odvisen od velikosti, geometrije, materialov in drugih lastnosti tarče. Odvisen je lahko tudi od njene orientacije, a za izračune običajno uporabimo povprečno vrednost. Sledi

$$P_o = j_i \sigma = \frac{P_i G_i \sigma}{4\pi R^2}. \quad (3)$$

Odbito valovanje ponovno prepotuje razdaljo R do radarja, zato je tam gostota odbite moči enaka

$$j_o = \frac{P_o}{4\pi R^2} = \frac{P_i G_i \sigma}{(4\pi)^2 R^4}. \quad (4)$$



Slika 3. Shema delovanja radarja.

Omeniti velja, da formalna definicija radarskega preseka σ upošteva neizotropnost odbite moči. Predstavlja efektivno površino tarče, ki bi pri izotropnem odbijanju signala povzročila enako gostoto odbite moči pri radarju kot dejanska tarča. Zato lahko odbito moč porazdelimo po površini sfere $4\pi R^2$.

Moč signala P_p , ki jo radar zazna, je enaka gostoti odbite moči, pomnoženi z efektivno površino antene A_e :

$$P_p = j_o A_e = \frac{P_i G_i \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4}. \quad (5)$$

Efektivna površina antene je povezana z ojačitvijo sprejemne antene G_p prek enačbe

$$G_p = \frac{4\pi \eta_e A}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}, \quad (6)$$

kjer je η_e učinkovitost antene, A njena površina in λ valovna dolžina elektromagnetnega valovanja, pri kateri radar deluje. Sorazmernost G_p in A_e izhaja iz recipročnega izreka, ki pravi, da sta oddajni in sprejemni vzorec antene enaka [7]. Vzorec je normirana smerna odvisnost moči oddanega signala oziroma odziva antene. Sorazmernostni koeficient $\lambda^2/4\pi$ izhaja iz konstantnega razmerja med povprečnima in posledično tudi smerno odvisnima A_e in G_p [8].

Iz enačbe (6) lahko izrazimo A_e in jo vstavimo v enačbo (5), s čimer dobimo

$$P_p = \frac{P_i G_i G_p \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (7)$$

Ker imajo letala le po eno anteno, sta ojačitvi oddajne in sprejemne antene enaki, torej $G_i = G_p = G$. Končna enačba za prejeto moč je tako

$$P_p = \frac{P_i G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (8)$$

Ta se imenuje **radarska enačba** [9, 10, 11].

2.3 Razmerje signal-šum (SNR)

Realni radar ne sprejema zgolj zelenega signala ene tarče, temveč tudi sevanje iz okolice (predvsem od Sonca), odbite signale drugih predmetov in lasten termični šum. Zato je ključno razmerje signal-šum (angl. *signal-to-noise ratio*, SNR), ki pove, kolikšen delež moči prejmemo od tarče v primerjavi s šumom. To mora biti dovolj veliko, da lahko tarčo zanesljivo zaznamo in ji sledimo.

Predpostavimo, da prevladuje termični šum. Modeliramo ga z belim šumom, kar pomeni, da je njegova spektralna gostota moči konstantna. Moč šuma P_n izrazimo z [9]

$$P_n = k_B T B, \quad (9)$$

kjer je k_B Boltzmannova konstanta, T temperatura sistema in B pasovna širina sprejemnika.

Razmerje signal-šum je tako enako

$$(S/N) = \frac{P_p}{P_n} = \frac{P_i G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 k_B T B}. \quad (10)$$

Če poznamo najmanjše razmerje signal-šum $(S/N)_{\min}$, pri katerem lahko tarčo zanesljivo zaznamo, lahko iz enačbe (10) izrazimo oceno največje razdalje zaznavanja $R_{\max}$

$$R_{\max} = \left(\frac{P_i G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k_B T B (S/N)_{\min}} \right)^{1/4} = \left(\frac{P_i G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\min}} \right)^{1/4}, \quad (11)$$

kjer je $P_{\min} = k_B T B (S/N)_{\min}$ minimalna za zaznavo potrebna prejeta moč. Odvisnost od četrtega korena moči sicer močno omejuje povečanje dosega, saj za podvojitev dosega potrebujemo 16-kratnik moči. Vendar odvisnost od četrtega korena radarskega preseka hkrati koristi, saj se pri 10.000-kratnem zmanjšanju radarskega preseka tarče največja razdalja zaznavanja zmanjša le za faktor 10 [11].

3. Usmerjanje signala

Smer zaznane tarče določimo glede na usmerjenost radarske antene. To se na prvi pogled zdi samoumevno, vendar če ponovno pomislimo na izotropno anteno, hitro ugotovimo, da je ne moremo "obračati", saj enako sprejema signale iz vseh smeri. Zato je ključna smernost antene. Običajno želimo, da ima antena en glavni snop z veliko smernostjo in čim manjše stranske snope. Tako lahko "smer" antene definiramo kot smer glavnega snopa, saj pričakujemo, da bo signal iz te smeri bistveno močnejši od stranskih.

Kotna ločljivost radarja je odvisna od širine glavnega snopa. Za natančno določanje smeri želimo čim ožji snop, medtem ko nam pri prečesavanju širšega območja bolj ustreza širši snop.

Vojaška letala so že od začetka uporabljala parabolične odsevne antene, saj te zagotavljajo veliko ojačitev v ozkem snopu ter so preproste in cenovno dostopne. Vendar so jih v osemdesetih in devetdesetih letih v bojnih letalih nadomestile antenske skupine (angl. *phased-array*), ki z elektronskim krmiljenjem glavnega snopa omogočajo hitrejšo in natančnejšo usmerjanje. Tako lahko sledijo tarčam z visoko kotno hitrostjo ali celo več tarčam hkrati. Obstajata dve izvedbi radarjev z antenskimi skupinami. Prva je pasivno elektronsko krmiljen radar (angl. *passive electronically scanned array*, PESA, sliki 4(a) in 5(a)), pri katerem so vse antene povezane z enim oddajnikom oziroma sprejemnikom, med posameznimi antenami pa lahko nastavimo fazni zamik. Druga, najsodobnejša, je aktivno elektronsko krmiljen radar (angl. *active electronically scanned array*, AESA, sliki 4(b) in 5(b)), pri katerem ima vsaka antena svoj oddajno-sprejemni modul. To omogoča hkratno ustvarjanje različnih snopov pri različnih frekvencah.

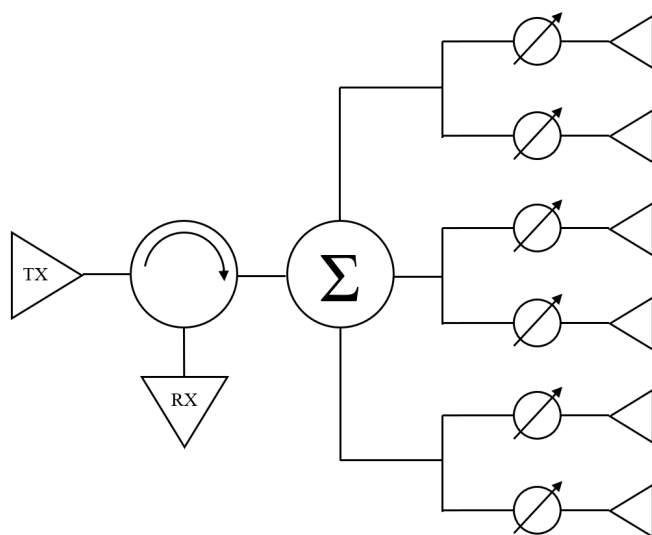


(a) PESA radar v nosu letala MiG-31. Vir: [13].

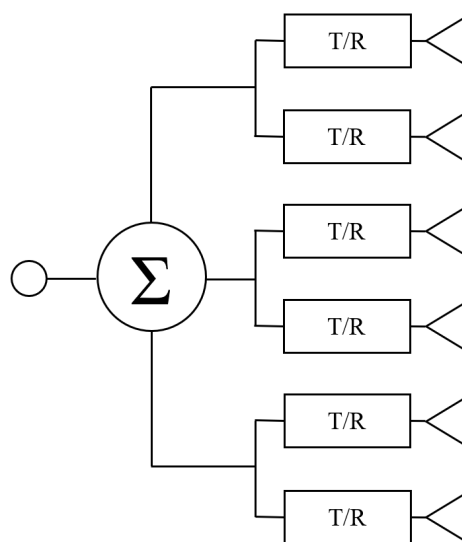


(b) AESA radar, razvit za letalo F-22 Raptor. Vir: [14].

Slika 4. Primera radarjev z antenskimi skupinami.

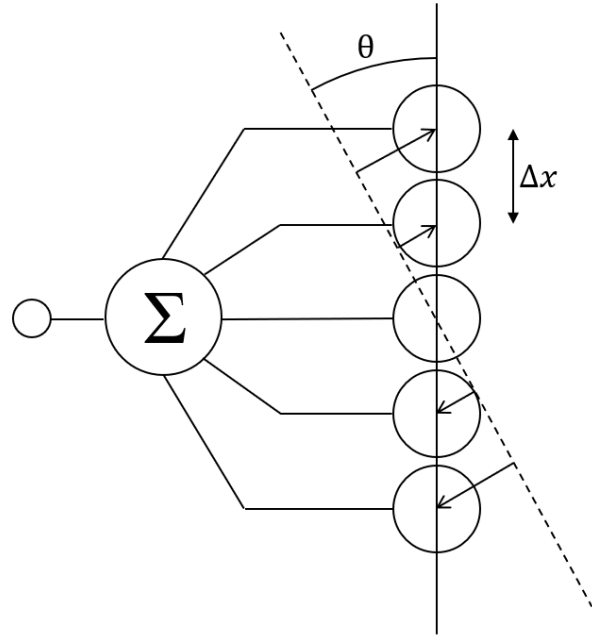


(a) Skica pasivne antenske skupine (PESA). Poganja jo le ena oddajno-sprejemna enota, označena s TX/RX, posameznim antenam pa lahko nastavljamo fazni zamik z enotami, ki so predstavljene kot krogi s puščicami.



(b) Skica aktivne antenske skupine (AESA). Vsaka antena ima svojo oddajno-sprejemno enoto, označeno s T/R, kar omogoča izvajanje naprednih nalog.

Slika 5. Skici dveh najpomembnejših arhitektur antenskih skupin.



Slika 6. Skica enodimenzionalne antenske skupine, na katero vpada ravni val pod kotom θ .

3.1 Antenske skupine

V nadaljevanju bomo obravnavali, kako antenske skupine usmerjajo signal z uporabo faznih zamikov med posameznimi antenami in interference. Predpostavimo, da so vpadni valovi ravni, izsevane pa obravnavamo daleč od antene v primerjavi z njenimi razsežnostmi, da jih lahko v približku obravnavamo kot ravne. Navadno privzamemo, da velja $R > 2D^2/\lambda$, kjer je D premer antene. Izbira meje je arbitrarna, a splošno sprejeta. Izhaja iz dogovora, da lahko valovanje obravnavamo kot ravno, če je njena ukrivljenost preko odprtine dimenzije D manjša od $\lambda/16$ [9].

Začnemo z enodimenzionalno antensko skupino in predpostavimo, da so antene izotropne. Na premici v enakomernih razmikih Δx leži N anten, kot je prikazano na sliki 6. Odzive anten seštevamo koherentno, kar pomeni, da upoštevamo fazo. Ko na antene pod kotom θ vpada ravni val z valovno dolžino λ , mora do naslednjega elementa prepotovati dodatno pot $\Delta x \sin \theta$. Fazni zamik med sosednjima antenama je torej $-(2\pi/\lambda)\Delta x \sin \theta$. Celoten odziv skupine, normiran na N elementov, podaja **skupinski faktor** (angl. *array factor*) [9, 12]

$$SF(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left(-i \left(\frac{2\pi}{\lambda} n \Delta x \sin \theta - \phi_n \right) \right), \quad (12)$$

kjer je ϕ_n dodatni fazni zamik n -te antene.

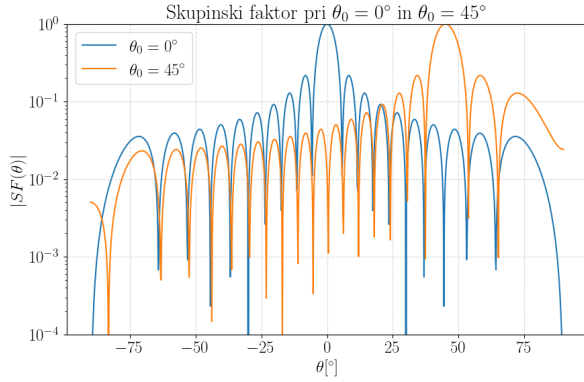
Če želimo sprejemati signal iz smeri θ_0 , moramo fazne zamike ϕ_n nastaviti tako, da se ravni valovi iz te smeri seštevajo konstruktivno. Sledi, da mora za n -ti element veljati

$$\phi_n = \frac{2\pi}{\lambda} n \Delta x \sin \theta_0. \quad (13)$$

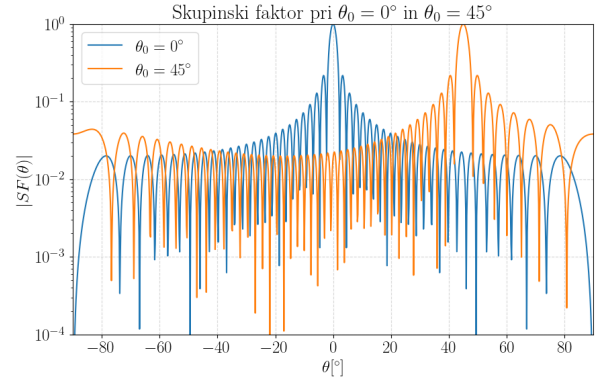
Če rezultat iz enačbe (13) vstavimo v enačbo (12), dobimo

$$SF(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} n \Delta x (\sin \theta - \sin \theta_0) \right). \quad (14)$$

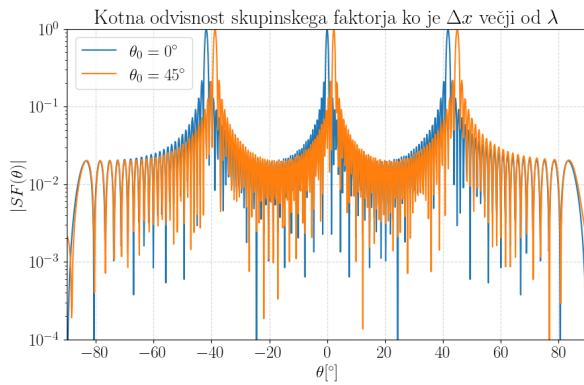
Skupinski faktor je sorazmeren smernosti antene, zato je zanimivo preučiti njegovo kotno odvisnost in to, kako se spreminja s θ_0 . Na slikah 7(a) in 7(b) sta prikazani odvisnosti za $\theta_0 = 0^\circ$



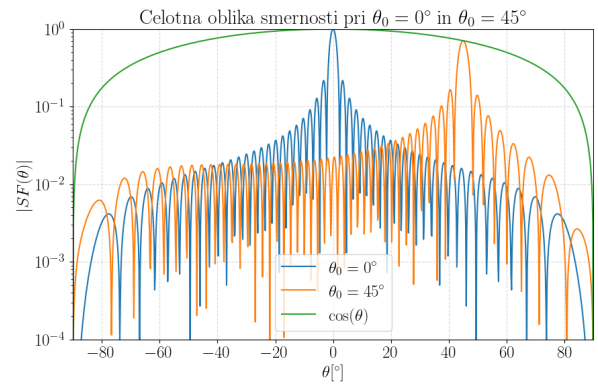
(a) Kotna odvisnost skupinskega faktorja enodimenzionalne antenske skupine z $N = 50$ antenami in razmerjem $\Delta x/\lambda = 1/5$.



(b) Kotna odvisnost skupinskega faktorja enodimenzionalne antenske skupine z $N = 50$ antenami in razmerjem $\Delta x/\lambda = 1/2$.



(c) Kotna odvisnost skupinskega faktorja enodimenzionalne antenske skupine z $N = 50$ antenami in razmerjem $\Delta x/\lambda = 3/2$ pri $\theta_0 = 45^\circ$. Zaradi prevelike razdalje med sosednjimi elementi se pojavijo ojačani stranski snopi.



(d) Celotna kotna oblika smernosti enodimenzionalne antenske skupine z $N = 50$ antenami in razmerjem $\Delta x/\lambda = 1/2$. Z zeleno je prikazana smerna karakteristika posameznega elementa $E_e(\theta)$.

Slika 7. Kotna odvisnost skupinskega faktorja in smernosti enodimenzionalne antenske skupine.

in $\theta_0 = 45^\circ$ pri različnih valovnih dolžinah. Vidimo, da je pri večjem razmerju $\Delta x/\lambda$ glavni snop ožji, zato je smer radarja boljše določena. Toda opazimo tudi, da se pri premaknjeni anteni za 45° stranski snopi proti negativnim kotom spet povečujejo.

Pri načrtovanju radarja moramo zagotoviti, da je razdalja med sosednjimi elementi dovolj majhna glede na valovno dolžino, saj se sicer pojavijo ojačani stranski snopi, kot je razvidno na sliki 7(c). Tega ne želimo, saj bi smer antene postala slabo določena. Običajno izberemo razdaljo med antenami manjšo od polovice valovne dolžine, torej da velja $\Delta x < \lambda/2$, da preprečimo ta pojav tudi pri usmerjanju antene proti skrajnim kotom.

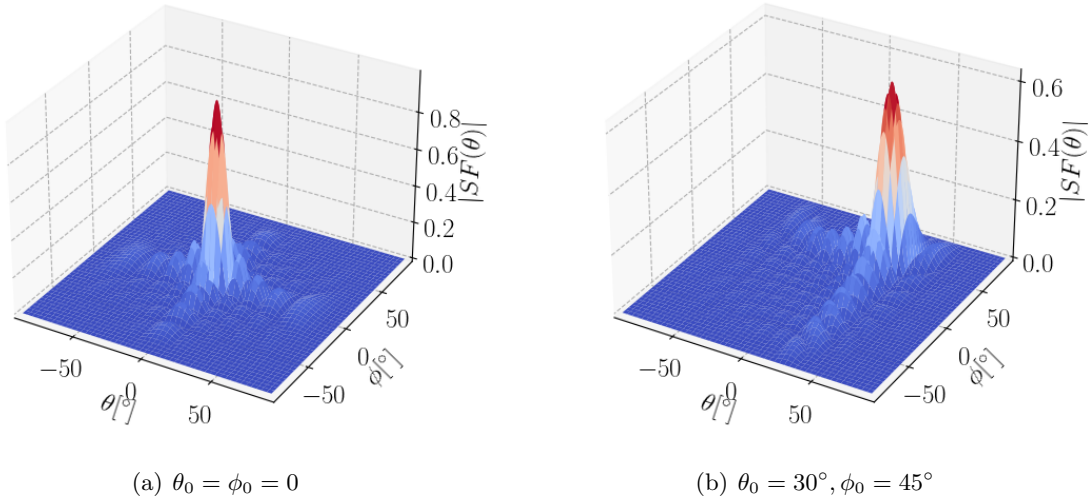
Pri celotni smernosti antenske skupine $E(\theta)$ moramo poleg skupinskega faktorja upoštevati tudi smerno karakteristiko posameznega elementa $E_e(\theta)$. Velja

$$E(\theta) = E_e(\theta)SF(\theta). \quad (15)$$

Če smerno karakteristiko ocenimo z $E_e(\theta) = \cos \theta$, dobimo smerno odvisnost, prikazano na sliki 7(d).

Enodimenzionalna antenska skupina omogoča usmerjanje signala le okoli ene osi. Če M takih skupin razporedimo vzporedno v razmikih Δy , dobimo dvodimenzionalno antensko skupino, ki jo lahko krmilimo okoli dveh osi in v boljše definiran prostorski kot. Njeno orientacijo določata kota θ_0 in ϕ_0 v sferičnih koordinatah z glavno osjo y . Velja $\theta, \theta_0 \in [-90^\circ, 90^\circ]$ in $\phi, \phi_0 \in [-90^\circ, 90^\circ]$. Smer

Celotna smernost v 2D pri $\theta_0 = 0^\circ, \phi_0 = 0^\circ$ Celotna smernost v 2D pri $\theta_0 = 30^\circ, \phi_0 = 45^\circ$



Slika 8. Celotna oblika smernosti dvodimenzionalne antenske skupine z $N = 10$ antenami, razmerjem $\Delta x/\lambda = 1/2$ pri različnih kotih θ_0 in ϕ_0 .

$\theta = \phi = 0^\circ$ je normalna na ravnino antene, ki leži v ravnini xy . Če so vsi elementi enaki, skupinski faktor izračunamo kot produkt [10]

$$SF(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} n \Delta y (\sin \theta - \sin \theta_0) \right) \right\} \times \left\{ \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \exp \left(-i \frac{2\pi}{\lambda} n \Delta x (\sin \phi \cos \theta - \sin \phi_0 \cos \theta_0) \right) \right\}. \quad (16)$$

Pri bolj zapletenih geometrijah je izračun zahtevnejši. Na sliki 8 sta primera celotne smernosti za 2D antensko skupino pri različnih kotih θ_0 in ϕ_0 .

V tem poglavju smo na primeru enodimenzionalne antenske skupine izpeljali smernost dvodimenzionalne antenske skupine in raziskali, kako se spreminja s kotoma θ_0 in ϕ_0 . Ta načela uporabljajo tudi najmodnejši radarji v vojaških letalih.

4. Določanje razdalje in hitrosti

Poleg smeri tarče sta za vojaškega pilota najpomembnejša podatka njena oddaljenost in radialna hitrost. V tem poglavju bomo obravnavali dve najpogostejši metodi za določanje teh podatkov: pulzni radar in pulzni Dopplerjev radar.

4.1 Pulzni radar

Delovanje pulznega radarja je razmeroma preprosto. Radar najprej izseva kratek, močan sunek elektromagnetnega valovanja, nato preklopi v sprejemni način in meri čas do povratnih sunkov. Iz znane hitrosti svetlobe v zraku c in časovnega zamika T določimo razdaljo do tarče

$$R = \frac{cT}{2}. \quad (17)$$

Signal mora prepotovati razdaljo do tarče in nazaj, zato čas delimo z 2. Če sta v snopu radarja dve tarči, ju razločimo, če se razdalji do njiju razlikujeta za več, kot ustreza širini pulza τ . Medsebojno

razdaljo tarč ΔR imenujemo **radialna ločljivost radarja** in velja

$$\Delta R \geq \frac{c\tau}{2} . \quad (18)$$

Prvi vojaški reaktivni lovci so uporabljali takšne radarje. Njihova naloga je bila iskanje in sledenje nasprotnikovim letalom ter kmalu tudi vodenje raket. Toda hitro se je pokazalo več pomanjkljivosti tako preprostega radarja, ki jih je nasprotnik lahko izkoristil. Če letalo leti dovolj nizko, radar zazna tudi odboje od okoliškega terena, ki povsem preglasijo signal tarče, zaradi česar radar postane skoraj neuporaben. Poleg tega so se razvili protiukrepi (angl. *countermeasures*), kot so t.i. pleve (angl. *chaff*). To so majhni kovinski ali plastični lističi, ki jih letalo izstreli za sabo. Lističi se razpršijo in odbijajo radarske signale, zaradi česar radar zazna lažno veliko tarčo, kar povzroči izgubo sledi prave tarče. Enak učinek imajo pleve tudi na zgodnje radarsko vodene rakete, ki takšnih signalov ne znajo filtrirati.

Pomanjkljivosti pulznega radarja je v veliki meri odpravil pulzni Dopplerjev radar. Ločimo dve vrsti radarjev, ki izkoriščata Dopplerjev pojav. Prva je radar z dušenjem mirujočih ciljev (angl. *moving target indication*, MTI), ki s filtrom odstrani signale mirujočih tarč, preostale signale pa obdela podobno kot pulzni radar. Druga vrsta je pulzni Dopplerjev radar, ki dejansko izmeri Dopplerjev frekvenčni premik $\Delta\nu$ in ga uporabi za določanje radialne hitrosti v_r tarče po formulah

$$\nu_p = \left(\frac{1 + v_r/c}{1 - v_r/c} \right) \nu \approx [1 + 2(v_r/c)] \nu, \quad (19)$$

$$\Delta\nu \approx \frac{2v_r}{c} \nu = \frac{2v_r}{\lambda}, \quad (20)$$

$$v_r \approx \frac{\lambda}{2} \Delta \nu, \quad (21)$$

Obe vrsti za merjenje Dopplerjevega premika uporabljata koherentno detekcijo, ki s primerjavo prejetega in referenčnega signala spremlja fazni zamik. Skica primera Dopplerjevega spektra je prikazana na sliki 9.

Pomembno je poudariti, da je v praksi Dopplerjev frekvenčni premik lahko več redov velikosti manjši od frekvenčne širine pulza ($1/\tau \gg \Delta\nu$), zato ga ne moremo zaznati z enim samim pulzom. Radarji zato analizirajo več zaporednih pulzov v časovnem obdobju $T_d \gg \tau$, kar omogoča razdelitev spektra pulzov na posamezne črte širine približno $1/T_d$ [9].

Pri pulzних Dopplerjevih radarjih se pojavi dilema pri izbiri frekvence oddajanja pulzov (angl. *pulse repetition frequency*, PRF) oz. njene obratne vrednosti, časa med posameznimi pulzi (angl. *pulse repetition interval*, PRI).

Po eni strani želimo čim večje razmike med pulzi, da zagotovimo nedvoumno merjenje razdalje. Tako se odmevi tarč vrnejo nazaj, še preden odpošljemo naslednji pulz. V nasprotnem primeru bi pri naslednjem pulzu zaznali tarčo, ki je v resnici dlje, kot se zdi. Da preprečimo dvoumnost razdalje, mora veljati

$$\text{PRI} \geq \Delta T_{\max} = \frac{2R_{\max}}{c} \quad \text{oz.} \quad R_{\max} \leq \frac{c \cdot \text{PRI}}{2} = \frac{c}{2\text{PRF}}. \quad (22)$$

Po drugi strani zmanjševanje frekvence pulzov omejuje obseg Dopplerjevih frekvenc, ki jih lahko zaznamo. To je posledica dejstva, da prek več pulzov izvajamo diskretno Fourierovo transformacijo, katere nedvoumni frekvenčni spekter je po Nyquistovem izreku omejen na polovico frekvence vzorčenja. Tako velja

$$\Delta\nu_{\max} = \pm\text{PRF}/2 \quad \text{oz.} \quad \text{PRF}_{\min} = 2\Delta\nu_{\max} = \frac{4v_{r_{\max}}}{\lambda}. \quad (23)$$

Med tema omejitvama moramo zato najti kompromis pri izbiri frekvence pulzov glede na specifične potrebe. Vojaška letala ponavadi uporabljajo srednji PRF režim, ki obsega približno 8–30 kHz. Tu je lahko razdalja še vedno nekoliko dvoumna, zato uporabljajo dodatne tehnike procesiranja, ki to odpravijo [9].

5. Zaključek

Radarji so izjemno zanimive naprave, ki so se od začetkov v drugi svetovni vojni razvili v zelo kompleksne sisteme. Uporabljajo se na številnih področjih, kot so vojaško letalstvo, navigacija, meteorologija, promet in astronomija. Zaradi svoje ključne vloge v vojaške namene se njihov razvoj še naprej nadaljuje, saj morajo slediti vse naprednejšim obrambnim strategijam nasprotnikov. V zadnjem času je pomemben izziv prikritost (angl. *stealth*), z razvojem nove generacije vojaških letal pa se radarjem obetajo novi izzivi in naloge.

LITERATURA

- [1] Wikipedia, *Radar*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>, dostopano: 27.2.2025.
- [2] Wikipedia, *History of radar*, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar, dostopano: 27.2.2025.
- [3] Wikipedia, *Chain Home*, https://en.wikipedia.org/wiki/Chain_Home, dostopano: 27.2.2025.
- [4] Wikimedia Commons, Chain Home radar installation, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chain_Home_radar_installation_at_Poling,_Sussex,_1945._CH15173.jpg, dostopano: 27.2.2025.
- [5] Wikipedia, *Cavity magnetron*, https://en.wikipedia.org/wiki/Cavity_magnetron, dostopano: 27.2.2025.
- [6] Wikimedia Commons, Magnetron, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetron_section_transverse_to_axis.JPG, dostopano: 27.2.2025.
- [7] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw-Hill, 1949.
- [8] J.C. Slater, *Microwave Transmission* (4th ed.), McGraw-Hill, 1942.
- [9] M.A. Richards, J.A. Scheer in W.A. Holm, *Principles of Modern Radar*, Clarendon Press, 1981.
- [10] M.I. Skolnik, *Radar Handbook* (3rd ed.), McGraw-Hill, 2008.
- [11] D. Kostevc, *Navigacijske naprave*, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2012.
- [12] R.J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook* (3rd ed.), Artech House, 2005.
- [13] Wikimedia Commons, MiG-31 radar, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DN-ST-92-02246.JPEG>, dostopano: 6.3.2025.
- [14] Wikimedia Commons, F-22 AESA radar, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AN-APG-77,_AESA,_Active_Electronically_Scanned_Array,_Northrop_Grumman,_2001_-_National_Electronics_Museum_-_DSC00388.jpg, dostopano: 6.3.2025.