

Fakulteta za elektrotehniko

Drago Kostevc

Navigacijske naprave in sistemi

Ljubljana, 2012

Predgovor

Zadnjih deset let sem na Fakulteti za elektrotehniko na Visokošolskem strokovnem programu na smeri Telekomunikacije predaval predmet Radarji in navigacijski sistemi. Predmet je bil izbiren, vendar se je prav dobro prijel in vsako leto je bilo vpisanih več kot trideset študentov. Za predmet sem napisal tudi skripta, Radarji in navigacijski sistemi.

Z bolonjsko reformo smo na Fakulteti za elektrotehniko prenovili študijske programe in del snovi Radarjev in navigacijskih sistemov se je znašel v novem predmetu Satelitske komunikacije in navigacija, ki ga bom predaval skupaj s kolegom Boštjanom Batageljom. Moj del bo navigacija. Znano je, da je študij lažji, če ima študent na razpolago študijsko gradivo, zato sem se odločil, da bom za svoj del predmeta Satelitska komunikacija in navigacija izdal skripta.

Velik del tvarine je res že v učbeniku Radarji in navigacijski sistemi, toda od izdaje Radarjev in navigacijskih sistemov je minilo že več kot pet let in v tem času sem v knjigi našel kar precej takšnega, kar bi danes, iz različnih razlogov, napisal drugače. Knjiga je torej zaslužila prenovo.

Obenem je v novem programu za vso snov navigacije na razpolago veliko manj časa, kot ga je bilo v starem programu, obenem pa so v novem programu tudi področja, ki jih v starem ni bilo. Skripta bi bilo treba torej po eni strani skržiti in po drugi razširiti. Ker je ugasnil tudi predmet, kateremu so bila skripta namenjena, sem se raje odločil za novo knjigo, Navigacijske naprave in sistemi.

Knjiga je torej naslednica knjige Radarji in navigacijski sistemi, poglavja, ki so ostala, so povečini predelana, ali skržena, ali razširjena, dodana so tudi nova poglavja, slike in zgledi.

Predmet Satelitske komunikacije in navigacija sicer ni izbiren, tako kot je bil Radarji in navigacijski sistemi, je pa sestavni del enega izmed izbirnih modulov. Upam, da se bosta predmet in skripta prijela prav tako, kot so se je prijeli Radarji in navigacijski sistemi, in pripomogla, da bo zaživel modul, katerega sestavni del sta.

Učbenik je dopolnilo predavanjem in ne pripomoček za samoučenje. Kot je vedel že Sokrat, knjiga ne more in najbrž nikoli ne bo mogla nadomestiti učitelja, kajti 'knjiga je mrtva črka na papirju in na vsako vprašanje odgovori z istimi besedami!'. Seveda pa je na predavanjih škoda ves čas nameniti pisanju namesto poslušanju. Vendar pa knjiga tudi zapiskov ne more povsem nadomestiti, kajti šele pisanje zapiskov prislili študenta k pozornemu poslušanju. Študentu, ki na predavanjih ne piše zapiskov, misli kmalu odtavajo bogve kam in početje se kmalu konča z dremežem. Očitno je, da koristno vlogo lahko igrajo le lastni zapiski. Upam, da bo knjiga koristno služila študentom kot dopolnilo predavanjem in lastnim zapiskom.

Za skrben pregled in koristne pripombe in nasvete se lepo zahvaljujem recenzentoma prof. dr. Matjažu Vidmarju in viš. pred. dr. Boštjanu Batagelju.

Trzin, v septembru leta 2011

Vsebina

Seznam zgledov	iv
Seznam slik	v
1. Uvod.....	1
2. Besednjak.....	5
2.1 Osnovni pojmi	5
2.2 Geometrični pojmi pri določanju položaja	5
2.3 Natančnost določanja položaja	6
2.4 Doseg	6
2.5 Literatura.....	6
3. Nekatere posebnosti razširjanja radijskih valov	7
3.1 Val nad ravno površino Zemlje	7
3.2 Radijski horizont in razširjanje valov v troposferi.....	10
3.3 Površinski valovi	11
3.4 Vpliv ionosfere.....	11
3.5 Odmevna površina	12
3.6 Literatura.....	14
4. Postopki za določanje položaja.....	15
4.1 Uvod.....	15
4.2 S pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta).....	15
4.3 S pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho).....	16
4.4 S pomočjo oddaljenosti in azimuta (sistemi rho-theta).....	17
4.5 S pomočjo razlik oddaljenosti do treh svetilnikov (hiperbolični sistemi)	18
4.6 Literatura.....	20

5.	Radarji	21
5.1	Uvod	21
5.1.1	Prednosti in pomanjkljivosti radarjev	21
5.1.2	Uporaba radarja	22
5.1.3	Zgodovina razvoja radarja	22
5.2	Dopplerjev radar s kontinuiranim signalom (CW)	27
5.3	Frekvenčno moduliran radar s kontinuiranim signalom (FM-CW)	29
5.4	Pulzni radar	32
5.4.1	Zasnova pulznega radarja	32
5.4.2	Pulzni Dopplerjev radar	34
5.5	Primerjava pulznega in frekvenčno moduliranega radarja	35
5.6	Radar s sintetično odprtino	36
5.7	Sekundarni radar	37
5.8	Literatura	39
6.	Naprave in sistemi za določanje smeri	40
6.1	Uvod	40
6.2	Neusmerjeni svetilnik (NDB)	40
6.3	Okvirna antena	41
6.4	Križna antena z goniometrom, radijski kompas	44
6.5	Dopplerjev goniometer	46
6.6	Vrtilni svetilnik (VOR)	47
6.7	Sprejemnik za VOR	51
6.8	Dopplerjev vrtilni svetilnik (DVOR)	53
6.9	Literatura	56
7.	Sistemi za določanje oddaljenosti	57
7.1	Uvod	57
7.2	Sistem DME	58

7.3	Sistem DME/P.....	64
7.4	Primerjava sekundarnega radarja in sistema DME.....	64
7.5	Literatura.....	65
8.	Hiperbolični sistemi	66
8.1	Uvod.....	66
8.2	Pomorski sistemi (LORAN).....	66
8.3	Satelitski sistemi	70
8.3.1	Uvod (sistema Transit in Cikada)	70
8.3.2	Sistem NAVSTAR-GPS.....	71
8.3.3	Sistem GLONASS.....	76
8.3.4	Sistem GALILEO.....	77
8.4	Literatura.....	77
9.	Pristajalni sistemi.....	78
9.1	Sistem ILS	78
9.2	Mikrovalovni pristajalni sistem MLS	84
9.3	Literatura.....	84
10.	Določanje položaja s sistemi mobilne telefonije	86
10.1	Določanje položaja	86
10.2	Literatura.....	86
11.	Sklep	87
12.	Seznam virov fotografij.....	88
13.	Priporočljivo branje	89

Seznam zgledov

Zgled 1 Polje nad ravno površino Zemlje	8
Zgled 2 Višina antene oddajnika ILS za določanje drsnega kota	9
Zgled 3 Radijski horizont	11
Zgled 4 Določitev položaja izletnika s pomočjo kompasa in zemljevida	15
Zgled 5 Pogrešek določanja položaja z dvema azimutoma	15
Zgled 6 Pogrešek določanja položaja z dvema oddaljenostima	17
Zgled 7 Pogrešek določanja položaja z oddaljenostjo in azimutom	18
Zgled 8 Dopplerjeva frekvenca	28
Zgled 9 Razdalja, na kateri radar odkrije 'nevidno' letalo.....	33
Zgled 10 Določi frekvenčni razmah signala Dopplerjevega goniometra.....	47
Zgled 11 Višina letala in doseg sistema VOR.....	51
Zgled 12 Pogrešek sistema VOR zaradi odbitega vala	52
Zgled 13 Polmer antene svetilnika DVOR.....	55
Zgled 14 Pogrešek merjenja oddaljenosti zaradi netočne ure	57
Zgled 15 Število letal, ki jim lahko hkrati streže sistem DME	63

Seznam slik

Sl. 1.1 Harrisonov kronometer H 5	3
Sl. 3.1 Val nad ravno površino Zemlje	7
Sl. 3.2 Geometrijski horizont	10
Sl. 3.3 Ilustracija k odmevni površini	13
Sl. 3.4 Odmevna površina letala v odvisnosti od kota vpadnega vala	13
Sl. 4.1 Določanje položaja z dvema azimutoma,	15
Sl. 4.2 Določanje položaja s pomočjo dveh oddaljenosti	16
Sl. 4.3 Določanje položaja s tremi krožnicami	16
Sl. 4.4 Določanje položaja z oddaljenostjo in azimutom.....	17
Sl. 4.5 Določanje položaja z razlikami oddaljenosti do treh svetilnikov	18
Sl. 5.1 Hülsmejerjev patentni spis iz leta 1904	23
Sl. 5.2 Nemoduliran Dopplerjev radar	27
Sl. 5.3 Frekvenčno moduliran radar	29
Sl. 5.4 Frekvenca oddajanega in sprejemanega signala FM radarja	29
Sl. 5.5. Blokovna shema konvencionalnega pulznega radarja	32
Sl. 5.6 Tipična radarska antena	34
Sl. 5.7 Delovanje radarja s sintetično odprtino	37
Sl. 6.1 Okvirna antena.....	41
Sl. 6.2 Smerni diagram okvirne antene	42
Sl. 6.3 Določanje smeri z okvirno anteno s pomočjo vsesmerne antene	42
Sl. 6.4 Prikazovalnik radijskega kompasa pri dveh različnih smereh letenja	45
Sl. 6.5 Prikazovalnik radijskega kompasa.....	46
Sl. 6.6 Krožeča antenna Dopplerjevega goniometra.....	46
Sl. 6.7 Generiranje azimutnega signala z vrtečo anteno	48
Sl. 6.8 Spekter signala vrtilnega svetilnika	49
Sl. 6.9 Smerna diagrama dveh prekrizanih anten.....	50
Sl. 6.10 Blokovna shema sprejemnika VOR.....	51
Sl. 6.11 Razmere pri motnji signala VOR.....	52

Sl. 6.12 Oddajnik Dopplerjevega vrtilnega svetilnika (DVOR).....	53
Sl. 6.13 Oddajna antena sistema DVOR brniškega letališča pri Šenčurju	56
Sl. 7.1 Dvojni pulz sistema DME	59
Sl. 7.2 Blokovna shema odzivnika sistema DME.....	60
Sl. 7.3 Blokovna shema povpraševalnika sistema DME	61
Sl. 8.1 Glavni in stranski svetilnik verige LORAN	67
Sl. 8.2 Navigacijska karta sistema LORAN-A	67
Sl. 8.3 Oblika impulza sistema LORAN-C.....	68
Sl. 8.4 Zaporedje skupin pulzov verige svetilnikov sistema LORAN-C.....	69
Sl. 8.5 Fazna modulacija posameznih pulzov v skupini	69
Sl. 8.6 Satelit Transit	71
Sl. 8.7 Satelit sistema GPS	74
Sl. 9.1 Smerni diagram anten za definiranje ravnine pristajalnega kurza.	79
Sl. 9.2 Antene oddajnika za določanje pristajalnega kurza na brniškem letališču.	80
Sl. 9.3 Smerni diagram anten za definiranje ravnine drsnega kota ψ	81
Sl. 9.4 Oddajna antena ravnine drsnega kota.....	82
Sl. 9.5 Označevalnik sistema ILS letališča Brnik.....	83
Sl. 9.6 Prikazovalnik sprejemnika ILS	83

1. Uvod

S pojavom trgovine (če štejemo tudi roparske pohode Vikingov za nekakšno samopostrežno trgovino) se je v zgodovini pojavil problem, kako sistematično priti z enega kraja v drugega in spet nazaj. Po razgibani kopni zemlji, po reki ali ob morski obali ni težko priti na podlagi opisa ali izkušenj iz enega v drug kraj in opisi takšnih poti segajo daleč v zgodovino. Mnogo težje pa je priti na določeno mesto po odprtem morju ali pri prečkanju prostranih enoličnih predelov, denimo puščav. Navigacija je znanost o tem, kako priti iz enega kraja v drugega, ali, bolj učeno, od enega do drugega položaja. Pri tem je običajno najvažnejši in najtežavnejši del postopka določanje trenutnega položaja na poti. Zato je pojem navigacija počasi prenesel svoj pomen na določanje položaja, znanosti o tem, kako iz enega položaja priti na drug položaj, pa rečemo vodenje. Mi bomo v teh skriptah pojem navigacija uporabljali v pomenu določanja položaja, hitrosti in lege, vodenje pa bomo prepustili kapitanom in pilotom.

V začetku so smer, v katero mora pluti ladja, določali s pomočjo poznavanja obale, kar pravzaprav ni bila navigacija današnjem pomenu besede. Pri plovbi blizu obale so jim bili v pomoč svetilniki (svetilnik na Rodosu je bil eno izmed sedmerih čudes starega sveta), in tudi grezilo, s katerim so določali globino morja in tudi sestavo tal. Vikingi so vzdrževali stalno zvezo s svojo kolonijo v Zeleni deželi in ohranil se je opis, kako priti do tja. Na odprtem morju je pomagalo določiti položaj in smer plovbe opazovanje Sonca in zvezd, denimo Severnice, kasneje pa tudi kompas, ki je v zgodovini najprej služil Kitajcem pri kopenski navigaciji. Globina vode vpliva na hitrost razširjanja valov in sicer tako, da povzroči disperzijo. Zato je oblika valov v bližini otokov drugačna kot na odprtem morju, to pa spretnim Polinezijcem pomaga pri orientaciji na odprtem morju.

Zemljepisno širino so kasneje določali s pomočjo tablic, Sonca in sekstanta. S pomočjo sekstanta so najprej določili kot med horizontom in Soncem, ko je bilo najvišje (v zenitu). V tablicah so nato poiskali, na kateri zemljepisni širini se tistega dne Sonce v zenitu vidi pod takšnim kotom. V načelu je stvar enostavna, v podrobnostih pa ne čisto. Gledati v Sonce opoldne ni prav prijetno opravilo, zato je veljalo, da je prenekateri kapitan na eno oko slep. Prav tako je težko pri tem opravilu sekstant držati vodoravno, medtem ko se ladja guga na valovih. Napredek sekstanta se je kazal v tem, da sčasoma kapitanu ni bilo treba gledati naravnost v Sonce in tudi natančnost je bila vedno večja. Napaka 1 stopinje je pomenila za 110 km napačno določen položaj. Toda kljub temu je bilo določanje zemljepisne širine razmeroma zanesljiv in natančen postopek.

Zemljepisna dolžina pa je bila za neposredno določanje mnogo trši oreh. V začetku so uporabljali za določanje položaja log (kos lesa na vrvi z vozli so vrgli v morje, les je v vodi obmiroval, ladja je plula naprej in število vozlov, ki je v enem ciklu peščene ure steklo skozi dlan merilca hitrosti je bila hitrost ladje - še vedno se meri v vozlih!), s katerim so določili hitrost ladje, s pomočjo kompasa pa smer. S

pomočjo tega podatka so lahko ocenili opravljeno pot (denimo v enem dnevu) in iz tega tudi položaj ladje in torej tudi zemljepisno dolžino. Metoda je bila zelo nenatančna in je vodila do številnih nesreč.

V bistvu enaka metoda se še vedno uporablja, imenuje se inercialna navigacija, in je seveda bistveno bolj natančna od nekdanje z logom in peščeno uro. Izhodiščni podatek ni vektor hitrosti, temveč vektor pospeška, ki ga merijo s pospeškometri. Od tod naprej je enostavno: s prvo integracijo dobijo vektor hitrosti, z drugo vektor spremembe položaja. Čeprav je metoda razmeroma natančna, se pogrešek akumulira in je treba sistem občasno umeriti z določitvijo položaja po kateri izmed drugih metod. Svoj trenutek zmagoslavja je metoda doživela pri uspešni plovbi ameriške jedrske podmornice Nautilus pod Severnim tečajem leta 1958.

Natančno pa lahko določimo zemljepisno dolžino, če poznamo lokalni čas in čas izhodiščnega poldnevnika (npr. Greenwiškega). Razlika med lokalnim časom in časom izhodiščnega meridiana je namreč sorazmerna zemljepisni dolžini, in sicer 1 ura na 15 stopinj (24 ur na 360 stopinj). Razmeroma enostavno je določiti lokalni čas, kajti ko je Sonce v zenitu, je ura poldne. To je sicer čisto točno le ob enakonočju, za druge dni pa si spet pomagamo s tablicami. Za določanje točnega časa izhodiščnega poldnevnika pa potrebujemo pripravo, ki kaže ta čas, torej natančno uro. Natančnih ur včasih ljudje niso znali izdelovati, k sreči jih je veliko na nebu. Gibanje planetov in satelitov je periodično in zato lahko služi za natančno uro. Zgled so recimo Jupitrove lune, za katere so bile izdelane tablice za pariški čas. Tako je bilo možno iz položaja Jupitrovih lun določiti natančen pariški čas in nato zemljepisno dolžino glede na pariški poldnevnik. Pri tem opravilu se je zelo izkazal Giovanni Cassini, dvorni zvezdogled Sončnega kralja. Kot prvi je natančno izmeril velikost Francije in si s tem prislužil jezo svojega kralja, znan je njegov vzklík: »po zaslugi kraljevih astronomov je Francija izgubila več ozemlja kot v vseh vojnah doslej!«

Vendar je bilo tovrstno merjenje prikladno za geode, morjeplovcem pa je bilo nemogoče na gugajoči ladji skozi daljnogled opazovati položaj Jupitrovih lun! Kasneje so izračunali tablice medsebojnega položaja posameznih zvezd in Lune. Kdaj se posamezna zvezda na določen dan dotakne Lune je bilo izračunano za čas v Greenwichu, torej so bile tablice skupaj z Luno in zvezdami nekakšna ura za čas v Greenwichu. Odtistihmal zato vsi merijo zemljepisno dolžino od Greenwiškega poldnevnika, ki je tako postal izhodiščni poldnevnik! Vendar je bilo tudi določanje dolžine s pomočjo tablic zamudno in neprikladno.

Dokončno je problem določanja položaja na morju rešil šele izum kronometra, to je natančne ure na vzmet. Takšno uro je kot prvi izdelal angleški urar John Harrison, ki je bil sicer izučen tesar, urarstvo pa je bilo njegov konjiček. Ena njegovih prvih ur, stolpna ura iz začetka osemnajstega stoletja, je izdelana zgolj iz lesa in teče še danes, le enkrat so jo vmes razstavili in očistili! Kronometer, natančno pomorsko

uro, je izpopolnjeval skoraj pol stoletja in jo sredi osemnajstega stoletja razvil do popolnosti. V dveh mesecih je zgrešila le za dve minuti, pred četr tisočletja! Osupljiv dosežek!



Sl. 1.1 Harrisonov kronometer H 5

Od takrat naprej so kapitani naravnali uro v Greenwichu in jo nato vozili s sabo po oceanih in pazili nanjo kot na punčico svojega očesa. Veliki James Cook je imel štiri in jih je imenoval »svoje najboljše prijatelje«, na ladji njegovega veličanstva Beagle, ki je na petletnem potovanju pod vodstvom 25 letnega kapitana Roberta FitzRoya od leta 1831 do 1836 kartografirala južnoameriško obalo, so jih imeli 23! Ta plovba je sicer bolj poznana iz neke druge zgodbe¹, manj znano pa je, da so zemljevidi južnoameriške obale, ki jih je na tej plovbi izrisal FitzRoy, obveljali več ko sto let, daleč v dvajseto stoletje!

Na tiste čase še vedno spominja ceremonija v zvezdarni v Greenwichu, ko vsak dan ob 13h padec krogle in udarec na gong označi natančen lokalni čas! In zakaj ne opoldne? Ker imajo opoldne kapitani polne roke dela z opazovanjem Sonca! Seveda pa se tudi takrat kapitani na dolgi plovbi niso zanašali le na čas, ki so ga v Greenwichu shranili v kronometru, temveč so ob vsaki priložnosti v mirnem pristanu na kraju z natančno poznano zemljepisno dolžino naravnali svoje ure po nebesni uri. V začetku so bili kronometri tudi zelo dragi (kapitani so jih kupovali za svoj denar!), zato so se še dolgo uporabljale tudi precej cenejše 'lunarne tablice'. Vsekakor pa je iz povedanega razvidno, da je bilo določiti položaj ladje na odprtem morje še nedolgo tega zelo zahtevna naloga, ki je za rešitev zahtevala bistrega in šolanega človeka.

¹ Kapitanov družabnik na tej poti je bil pravkar diplomirani 23 letni teolog in ljubiteljski naravoslovec Charles Darwin.

Danes poznamo in uporabljamo mnogo različnih postopkov, naprav in sistemov za določanje položaja, običajni ljudje so pri tem donedavna večinoma uporabljali kažipote, markacije in krajevne napise, zadnje čase pa tudi naprave GPS. Veliko postopkov določanja položaja deluje brez uporabe elektrike, je pa tudi mnogo sistemov, ki so zgled kompleksne visokofrekvenčne tehnike. Vse te naprave uporabljajo visokofrekvenčne radijske svetilnike, bodisi posamične, bodisi povezane v sistem. Sprejemna naprava s procesiranjem signalov iz teh svetilnikov in ob poznavanja njihovega položaja bolj ali manj natančno določi svoj položaj. Sprejemno napravo ima lahko v roki popotnik, lahko pa je vgrajena v avto, v letalo ali na ladjo.

Pri navigaciji poznamo navigacijo 'na dolge proge' ali daljinsko navigacijo, ki denimo pomaga kapitanu voditi letalo od Brnika do Aten. Pri tej navigaciji nekaj sto metrov sem ali tja ni prav zelo pomembnih. Pri navigaciji 'na kratke proge' ali pristajalnih sistemih, kjer sistem pomaga kapitanu pristati v Londonu v razmerah zmanjšane vidljivosti, je pa čisto druga pesem, pri pristanku je pač treba zadeti pristajalno stezo na nekaj metrov natančno. Sistemi daljinske navigacije so zato v osnovi različni od pristajalnih sistemov.

V teh skriptah bomo spoznali naprave in sisteme za določanje lastnega položaja s pomočjo radijskih valov, mnoge delujoče in tudi nekaj takih, ki se ne uporabljajo več. Zato knjiga ni nič manj aktualna, nekatere stvari je mnogo lažje razložiti in razumeti, če je poznana nit razvoja. Seveda pa je knjiga učbenik za inženirje elektrotehnike in ne za pilote in navigatorje. Mnogi sistemi so zanimivi s tehničnega stališča, čeprav so jih morda nadomestili novejši sistemi, ki samo zato ker so novejši, niso vedno tudi »naprednejši«, karkoli že ta beseda pomeni.

2. Besednjak

2.1 Osnovni pojmi

Pojem **določanje položaja** (denimo ladje ali popotnika) bomo uporabljali pri določanju položaja s pomočjo radijskih valov.

Določanje tujega položaja ali **radiolokacija** je določanje položaja cilja, oddaljenega od poznanega mesta opazovanja in določanja. Pojem se običajno uporablja v zvezi z delovanjem radarskih naprav, s katerimi določamo položaj oddaljenega cilja.

Določanje lastnega položaja ali **radionavigacija** je določanje položaja samega sebe. Določanje lastnega položaja je pomemben del postopka, imenovanega navigacija. Navigacija je znanost, kako priti iz enega na drug položaj, torej določanje trenutne potrebne smeri gibanja (kurza). V začetku je pojem pomenil zgolj ladijsko navigacijo, sedaj se uporablja tudi za vodenje letal in navsezadnje tudi za vodenje avtomobilov in pešcev. Najpomembnejša in najtežja naloga pri navigaciji je določanje lastnega položaja, zato običajno sisteme za določanje lastnega položaja imenujemo kar navigacijski sistemi.

Ker je pri vodenju najbolj pomembno vedeti, v katero smer se moramo premikati, da bomo prišli do cilja, je pri navigaciji pomembno določanje **vektorja hitrosti**.

Pri letenju je pomembna tudi **lega** (attitude) letala, ki jo kaže kompas in ni vedno enaka smeri letenja (recimo pri bočnem vetru!).

2.2 Geometrični pojmi pri določanju položaja

Referenčna točka ali izhodišče je točka, na katero se nanašajo parametri pri določanju položaja.

Položajna ploskev je ploskev, na kateri je ena izmed geometričnih veličin (denimo kot, oddaljenost ali ena izmed kartezičnih koordinat) konstantna. Če poznamo denimo oddaljenost R letala, potem je položajna ploskev kroglja s polmerom R . Določena je z enim parametrom.

Položajna krivulja je presečišče dveh položajnih ploskev, določena je torej z dvema parametroma.

Položaj je presečišče treh položajnih ploskev, določen je s tremi parametri.

Položaj na zemeljski površini je presečišče dveh položajnih ploskev z zemeljsko površino. Ta položaj je določen z dvema koordinatama. Položaj je mnogokrat popolnoma določen s položajem na zemeljski površini. Nedvomno velja to za pešce, ladje in avtomobile, pogosto pa velja tudi za določanje položaja letala z radarjem, saj višino letala običajno merimo in podajamo posebej.

Podajanje položaja z geografskimi koordinatami. Položaj na zemeljski površini lahko podamo z zemljepisno širino in dolžino. Širina se podaja glede na ekvator, severna je od 0 do $+90^\circ$ in južna od 0

do -90° . Dolžina se podaja glede na izhodiščni poldnevnik v Greenwichu, vzhodna od 0 do 180° in zahodna od 0 do -180° . Referenčna točka za geografske koordinate je torej presečišče ekvatorja z izhodiščnim poldnevnikom.

Podajanje položaja z radijskimi koordinatami. Položaj lahko podamo tudi s koordinatami, ki so lastne določenemu tehničnemu sistemu za določanje položaja, denimo družine hiperbol pri sistemu Loran.

Podajanje položaja z azimutom, elevacijo in oddaljenostjo. Azimut je kot med smerjo proti severu in smerjo opazovanega predmeta (v smeri urinih kazalcev, torej v negativni matematični smeri!), elevacija pa je kot med vodoravno ravnino in opazovanim predmetom.

2.3 Natančnost določanja položaja

Pogrešek položajne krivulje je skalarna oddaljenost izmerjene položajne krivulje od dejanske položajne krivulje.

Pogrešek položaja je vektorska razlika med izmerjenim in pravim položajem. V praksi pogosto podajamo zgolj skalarni pogrešek, torej absolutno vrednost pogreška.

Pogreškovna elipsa je karakteristična veličina podajanja vektorskega pogreška pri podajanju položaja z dvema koordinatama. Obe osi sta podani s pogreškoma dveh med seboj pravokotnih položajnih krivulj, središče pa s pravim položajem. Izmerjeni položaj leži z določeno verjetnostjo znotraj pogreškovne elipse. Ker pravega položaja seveda ne poznamo, sicer ga ne bi bilo treba določati, bomo zadevo pogosto obrnili in rekli, da pravi položaj leži z določeno verjetnostjo znotraj pogreškovne elipse s središčem v izmerjenem položaju.

2.4 Doseg

Doseg določanja položaja je doseg, do katerega s podano verjetnostjo velja, da pogrešek položaja ne bo prekoračil vnaprej podane številčne vrednosti.

Radijski doseg je največja razdalja od oddajnika, do katere pri normalnih pogojih razširjanja radijskih valov sprejemnik še daje rezultate, ki jih je možno enoveljavno ovrednotiti.

2.5 Literatura

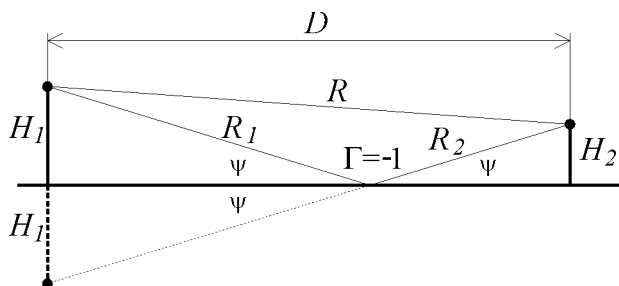
[1] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994

3. Nekatere posebnosti razširjanja radijskih valov

Ključno vlogo pri delovanju navigacijskih naprav ima razširjanje radijskih valov. Doslej so se študentje srečali le z razširjanjem radijskih valov v neomejenem prostoru. Takih okoliščin pa seveda realno radijsko valovanje ni nikoli deležno, razen pri satelitskih zvezah. Navigacijski sistemi delujejo v bližini Zemlje, v bližini hribov in morij. Zato si bomo v tem poglavju ogledali nekatere posebnosti pri razširjanju radijskih valov v realnih okoliščinah, ki so pomembne za razumevanje navigacijskih naprav in sistemov.

3.1 Val nad ravno površino Zemlje

Zemlja je razmeroma dober prevodnik, zato za radijske valove predstavlja zrcalo. V tem poglavju si bomo ogledali, kako to dejstvo vpliva na polje na sprejemnem mestu. Polje na sprejemnem mestu interpretiramo kot interferenco med 'neposrednim' in odbitim valom (Sl. 3.1).



Sl. 3.1 Val nad ravno površino Zemlje

Da bo računanje lažje, vzemimo da je površina Zemlje ravna, kar je približno res. Oddajna antena naj bo na višini H_1 , sprejemna pa na višini H_2 , anteni naj bosta na medsebojni razdalji D . Posredni val se bo od Zemlje odbil pod kotom ψ . Pri radijskih zvezah v splošnem velja, da je višina anten mnogo manjša od medsebojne razdalje anten, kot ψ bo torej zelo majhen (reda 1°). Oba vala bosta torej za večino oddajnih anten v glavnem snopu. Za tako majhne kote pa velja tudi naslednje:

1. Zemlja je gladka in deluje kot zrcalo. (Neravnost, pri kateri površina še deluje kot zrcalo, opredeljuje Rayleighov kriterij $h < \frac{\lambda}{8 \sin(\psi)}$. Za valovno dolžino 1 m in vpadni kot 1° velja denimo $h < 7$ m.)
2. Odbojnosti za vertikalno in horizontalno polariziran vpadni val Γ_V in Γ_H sta približno enaki -1 .
3. Poti neposrednega in odbitega vala sta približno enako dolgi, zato vplivata le na fazi, na amplitudi pa ne.

Iz tega sledi, da je odbiti val enako polariziran kot vpadni val, ima (skoraj) enako amplitudo in tudi leži (takorekoč) v isti ravnini kot vpadni val. Odbiti val se torej od neposrednega razlikuje le po fazi (zaradi daljše poti in zaradi spremembe faze pri odboju), zato ju je sicer treba seštevati kot kompleksorja, ni pa treba upoštevati, da sta vektorja, kar zelo poveča preglednost računa.

Označimo kompleksno amplitudo neposrednega vala na sprejemnem mestu z E_0 , pa lahko napišemo

$$E = E_0 e^{-j\beta R} - E_0^{-j\beta(R_1+R_2)} = E_0 e^{-j\beta R} (1 - e^{-j\beta\Delta R})$$

$$E = E_0 e^{-j\beta R} e^{-\frac{j\beta\Delta R}{2}} \left(e^{\frac{j\beta\Delta R}{2}} - e^{-\frac{j\beta\Delta R}{2}} \right) = E_0 e^{-j\beta R} e^{-\frac{j\beta\Delta R}{2}} 2j \sin\left(\frac{\beta\Delta R}{2}\right)$$

$$|E| = 2|E_0| \left| \sin\left(\frac{\beta\Delta R}{2}\right) \right|$$

$$\Delta R = R_1 + R_2 - R = \sqrt{D^2 + (H_1 + H_2)^2} - \sqrt{D^2 + (H_1 - H_2)^2}$$

$$\Delta R \doteq \frac{2H_1 H_2}{D}$$

$$|E| = 2|E_0| \left| \sin\left(\frac{\beta H_1 H_2}{D}\right) \right| \quad (3.1)$$

Polje na sprejemni strani lahko opazujemo na dva načina. Opazujemo najprej polje na sprejemni strani v odvisnosti od višine sprejemne antene, drugi parametri naj se ne spreminjajo. Napišimo enačbo (3.1) malo drugače:

$$|E| = |E_{\max}| \left| \sin\left(\frac{\beta H_1 H_2}{D}\right) \right| = |E_{\max}| \left| \sin(kH_2) \right| \quad (3.2)$$

Očitno se vrednost polja spreminja po sinusu, pri tleh je enaka nič. To je razumljivo, pri tleh imata oba vala enako dolgo pot, odbitemu pa se obrne faza, interferenca je zato uničujoča. Prvi maksimum je:

$$\frac{\beta H_1 H_2}{D} = \frac{2\pi H_1 H_2}{\lambda D} = \frac{\pi}{2}$$

$$H_{2\max} = \frac{\lambda D}{4H_1}$$

Zgled 1 Polje nad ravno površino Zemlje

Določi višino, na kateri je prvi maksimum polja na sprejemnem mestu, ki je od oddajne antene na višini 300 m oddaljeno 20 km. Valovna dolžina valovanja je 1 m.

$$H_{2\max} = \frac{\lambda D}{4H_1} = 17 \text{ m}$$

Prvi maksimum je na višini 17 m, sledi mu minimum na višini 34 m (tega naj bralec določi sam!).

Pojav je najbolj izrazit blizu tal, z večanjem višine ima odbiti val vedno daljšo pot in je zato njegova amplituda v primerjavi z amplitudo neposrednega vala vedno manjša.

Iz izvajanja v tem poglavju smo videli, da sprejemna antena ne sme biti čisto blizu tal in da ima pojav optimalno višino, torej višja antena ne pomeni vedno boljši sprejem. Iz številke se tudi vidi, da je pojav treba upoštevati pri metrskih valovih, za centimetrške valove pa zemeljska površina ni več ravna.

Za navigacijske sisteme pa je zanimiv še malo drugačen pogled na dogajanje. Poglejmo, kako se spreminja polje, če ga opazujemo v odvisnosti od kota α , pod katerim 'vidi' sprejemna antena vznožje oddajne antene. Iz slike (Sl. 3.1) je razvidno, da je za majhne kote ta kot enak

$$\alpha \doteq \frac{H_2}{D}$$

Preoblikujmo sedaj enačbo (3.1) tako, da bo funkcija argumenta α

$$|E| = 2|E_0| \left| \sin\left(\frac{\beta H_1 H_2}{D}\right) \right| = E_{\max} |\sin(\beta H_1 \alpha)|$$

Vidimo, da ima polje pri določenih kotih α minimum in pri določenih kotih maksimum in da lego minimumov in maksimumov določa višina antene 1 in valovna dolžina valovanja.

Ta pojav izkorišča pristajalni sistem ILS, ki ga bomo spoznali v poglavju 9.1. Tukaj pa si oglejmo zgled.

Zgled 2 Višina antene oddajnika ILS za določanje drsnega kota

Določimo, na kateri višini mora biti oddajna antena, da bo prvi minimum polja pod kotom 3 stopinje. Frekvenca signala je 335 MHz.

Pogoj za prvi minimum je¹:

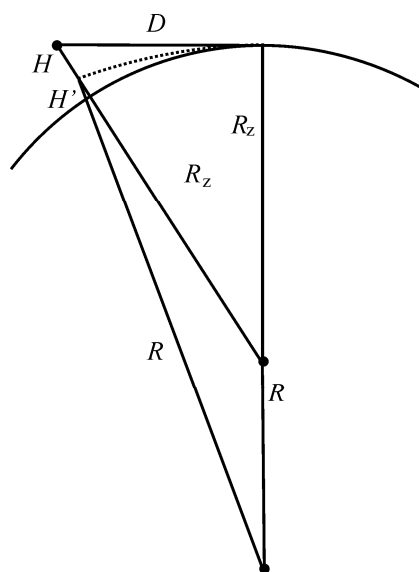
$$\begin{aligned} \beta H_1 \alpha &= \pi \\ H_1 &= \frac{\pi}{\beta \alpha} = \frac{\pi \lambda}{2\pi \alpha} = \frac{\lambda}{2\alpha} = 8,55 \text{ m} \end{aligned}$$

Oddajna antena mora biti na višini 8,55 m.

¹Prvi minimum je pravzaprav pri kotu $=0$, toda na tega ne vplivata ne višina oddajne ne sprejemne antene.

3.2 Radijski horizont in razširjanje valov v troposferi

Upoštevajmo, da je Zemlja okrogla in da se na njej (razen najdaljših, zelo nizkofrekvenčnih) radijski valovi ne uklanjajo. Zemlja zato predstavlja radijskim valovom oviro pri širjenju, kako daleč 'dosežejo' valovi, označimo z besedo radijski horizont. Pojem je znan iz vsakdanjega življenja, morda ga le večkrat uporabljamo v prenesenem kot v prvotnem pomenu. Spomnimo pa se gotovo vsi, da je eden izmed dokazov za to, da je Zemlja okrogla, da se na morju na horizontu najprej pojavi zastava na vrhu jambora! Namesto jambora imamo antenski stolp, razmere prikazuje naslednja slika (Sl. 3.2).



Sl. 3.2 Geometrijski horizont

Enačbe, ki popisujejo zvezo med višino antene in geometrijskim horizontom, so

$$R_z^2 + D^2 = (R_z + H)^2 = R_z^2 + 2R_zH + H^2 \cong R_z^2 + 2R_zH$$

$$D \cong \sqrt{2R_zH} \quad (3.3)$$

Tako, določili smo geometrijski horizont. Če velja geometrijska optika, na kar se glede velikosti Zemlje lahko zanesemo, velja tako določen horizont tudi za optično vidljivost in tudi za kratke valove.

Ker pa se lomni količnik troposfere z višino spreminja, valovni žarki niso ravni, temveč ukrivljeni. Standardna troposfera učinkuje na pot žarkov tako, da se lomijo proti Zemlji, torej 'gledajo okrog Zemlje', na sliki je ta ukrivljena pot s krivinskim polmerom R narisana s črtkano črto. Zato je radijski horizont večji od geometrijskega, ali povedano z drugimi besedami in kot je razvidno s slike, za enak horizont je potrebna manjša višina antene (H'). To v enačbi za horizont upoštevamo tako, da namesto resničnega polmera Zemlje (~ 6370 km) računamo z ekvivalentnim polmerom Zemlje, ki za standardno troposfero (krivinski polmer žarkov $R \approx 25000$ km) znaša ~ 8500 km. Vendar pri radijskih zvezah ne gre računati na ta pojav, ker troposfera ni vedno standardna. Lomni količnik je najbolj odvisen od vsebnosti

vlage, včasih se zgodi tudi, da je ekvivalentni polmer Zemlje celo manjši od dejanskega. Zato je za prvo oceno radijskega horizonta smiselna uporaba enačbe (3.3).

Zgled 3 Radijski horizont

Določi radijski horizont za anteno na višini 2 km.

$$D = \sqrt{2R_{\oplus}H} = 160 \text{ km}$$

Celo Slovenijo torej vidimo (ali pokrijemo z radijskim signalom) z vrha Triglava. Zastavo na vrhu 20 m visokega jamborja pa vidimo iz čolna 16 km, iz košare na vrhu 20 m visokega jamborja pa 32 km daleč!

3.3 Površinski valovi

Ena izmed lastnosti valovanj je, da se na ovirah uklanja, pogoj je, da je velikost ovire primerljiva z valovno dolžino vala. Okrogla Zemlja predstavlja torej oviro za širjenje kratkih valov, radijski horizont smo določili v poglavju 3.2. Izkaže pa se, da se dolgi valovi z valovnimi dolžinami nekaj km nekoliko uklanjajo okrog Zemlje. Velja tudi, da se pri nizkih frekvencah Zemlja obnaša kakor dober prevodnik, pri višjih pa kot dielektrik z izgubami. Mejna frekvenca, pri kateri sta poljski in konduktivni tok zemeljske površine enaka, je v razredu nekaj megahertzov. Del energije nizkofrekvenčnega vala zato odteka v prevodno zemljo in smer širjenja vala se obrne proti Zemlji. Tako pride do 'krivljenja' vala proti Zemlji in torej tudi 'okrog' nje. Z dolgimi valovi, ki se širijo nad površino Zemlje, so zato možne zveze, ki segajo preko radijskega horizonta do razdalj reda tisoč kilometrov. Tem valovom rečemo **površinski ali talni valovi** in se uporabljajo pri nekaterih sistemih radijske navigacije. Značilno za njih je še, da ima vertikalno polarizirana komponenta vala (pri kateri je vektor električne poljske jakosti pravokoten na prevodno površino Zemlje) bistveno manjše slabljenje od horizontalno polarizirane komponente. Tudi če je val pri oddajanju eliptično polariziran, bo prej ali slej horizontalno polarizirana komponenta povsem izginila in ostala bo le vertikalno polarizirana komponenta. Za komunikacije in navigacijske sisteme s površinskimi valovi uporabljamo torej vertikalno polarizirane valove. Zgled za uporabo talnih valov je sistem Loran C, ki deluje na frekvenci 100 kHz (in valovni dolžini 3 km).

3.4 Vpliv ionosfere

Zemljo obdaja na višini od 60 pa do nekaj 100 km ionosfera. To je področje, ki je razdeljeno še v več slojev, v katerih se pod vplivom visokoenergijskega sevanja Sonca atomi plinov ionizirajo, kar pomeni, da jim energija sevanja odtrga elektron(e) iz zunanje lupine. Tako nastane plast prostih elektronov – plazma. Ta plazma se za elektromagnetni val obnaša kakor anizotropen¹ dielektrik,

¹ Anizotropnost plazme je posledica tega, da je v Zemljinem magnetnem polju.

katerega dielektričnost je odvisna od višine, frekvence in polarizacije. S frekvenco se spreminja tako, da ima na nizkih frekvencah velik vpliv, na visoke frekvence pa skoraj ne vpliva. Motnje zaradi vpliva ionosfere naraščajo obratnosorazmerno s kvadratom frekvence.

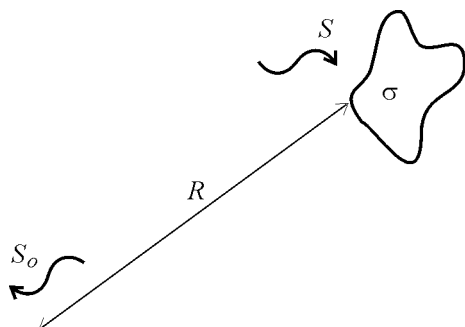
Pri nižjih frekvencah se lomni količnik spreminja z višino podobno, kot se spreminja z višino lomni količnik standardne troposfere. Iz poglavja o radijskem horizontu že vemo, da takšen potek lomnega količnika pomeni krivljenje žarka proti Zemlji. Ionosfera zato valove, ki vpadajo nanjo pod primernim kotom, ukrivi nazaj proti Zemlji in torej deluje kot zrcalo, zato včasih slišimo o odboju od ionosfere, čeprav gre v resnici za lom. Tudi ta mehanizem omogoča zveze na zelo velikih razdaljah, saj ionosfera skupaj z Zemljinim površjem deluje kot nakakšen 'konsferični' valovod. Za razliko od dolgovalovnih površinskih valov so ti **prostorski valovi**, kakor jim rečemo včasih, mogoči tudi na kratkih valovih. Uporabljajo se za radijske zveze in tudi za prekohorizontne kratkovalovne radarje. Ker pa je stanje ionosfere nestabilno in napovedljivo le statistično, se ti valovi za radijsko navigacijo ne uporabljajo.

Za radijsko navigacijo so prostorski valovi pomembni zato, ker predstavljajo motilni pojav. Kljub temu, da dela sistem satelitske navigacije GPS na visokih frekvencah (med 1 in 2 GHz) in je zato vpliv ionosfere relativno majhen, pa k pogreškom določanja višine položaja v sistemu GPS največ prispeva ravno vpliv ionosfere.

3.5 Odmevna površina

Če polje elektromagnetnega valovanja zmotimo s kakršnimkoli predmetom, bo ta v splošnem povzročil sipanje elektromagnetnega vala v vseh smereh. Pojav je človeški izkušnji dobro znan iz razširjanja svetlobe, na njem temelji čutilo vida. Na istem pojavu temelji tudi delovanje radarja, le na drugih frekvencah. V tem poglavju bomo spoznali veličino, s katero kvantitativno za namene radarjev opišemo to lastnost predmetov.

Naj bo torej predmet, ki mu želimo popisati lastnosti sipanja polja elektromagnetnega vala, v polju TEM vala z gostoto moči S . Gostota sipanega polja S_o bo padala s kvadratom oddaljenosti R od predmeta, sorazmerna bo z gostoto moči vpadnega vala S in s konstanto, ki bo odvisna od mnogih lastnosti predmeta in tudi od smeri sipanja in jo označimo s σ .

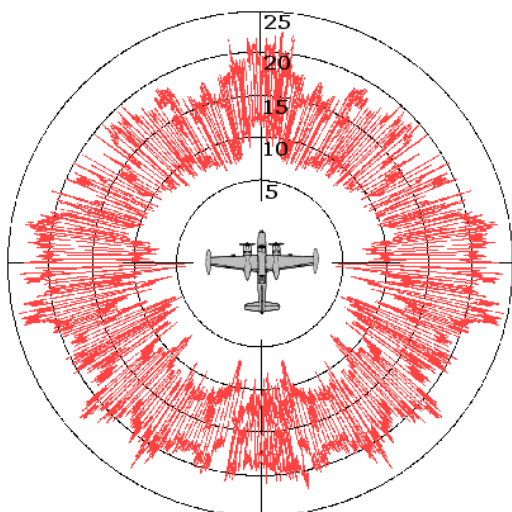


Sl. 3.3 Ilustracija k odmevni površini

Definirajmo:

$$S_o = S \frac{\sigma(\vartheta, \varphi)}{4\pi R^2} \quad (3.4)$$

Sorazmerno konstanto smo označili s $\sigma(\vartheta, \varphi)$. Očitno mora imeti dimenzijo m^2 , imenujemo jo **odmevna površina**. Koordinatni sistem ϑ, φ s katerim podamo smer sipanega vala se pokriva z nasprotno smerjo širjenja vpadnega vala. Sipani val v smeri $(\vartheta, \varphi) = (0, 0)$ je torej val v nasprotni smeri širjenja vpadnega vala, lahko bi mu rekli tudi odbiti val. Pri večini radarjev sta oddajnik in sprejemnik na istem mestu in zanje je pomemben le ta odbiti val. Običajno je torej pomembna le odmevna površina $\sigma(0, 0)$, zato to odmevno površino označujemo preprosto kar s σ , torej $\sigma(0, 0) = \sigma$. Vendar pa pri tem ne smemo pozabiti, da je tudi odmevna površina v nasprotni smeri širjenja vpadnega vala pri večini tarč pomembno odvisna od tega, kako je tarča obrnjena, torej od smeri, pod katero val vpada na tarčo. Kadar torej naletimo na 'smerni diagram' odmevne površine določenega cilja (Sl. 3.4), ta običajno pomeni odmevno površino v nasprotni smeri širjenja vpadnega vala kot funkcijo vpadnega kota vala na cilj!



Sl. 3.4 Odmevna površina letala v odvisnosti od kota vpadnega vala

3.6 Literatura

- [1] Budin, J., *Razširjanje radijskih valov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 1975
- [2] Vidmar, M., *Radiokomunikacije*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2005
- [3] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

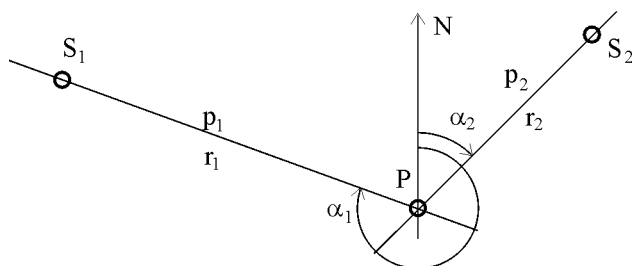
4. Postopki za določanje položaja

4.1 Uvod

Položaj lahko opišemo (podamo), kot smo povedali že v Uvodu v slovarju pojmov, na različne načine, v splošnem v enem izmed koordinatnih sistemov. Položaj v prostoru je podan s tremi koordinatami, saj ima prostor tri dimenzije. Vendar trenutno le satelitski navigacijski sistemi omogočajo tridimenzionalno navigacijo, vsi ostali pa le navigacijo v dveh dimenzijah (običajno na Zemljini površini). Navigacijo v dveh dimezijah je tudi bistveno lažje kot tridimenzionalno narisati in opisati. Zato se bomo v opisu postopkov za določanje položaja omejili na prikaz v dveh dimezijah.

4.2 S pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta)

Pri tem postopku je položaj določen z azimutoma dveh znanih točk (svetilnikov) (Sl. 4.1).



Sl. 4.1 Določanje položaja z dvema azimutoma,

Položajni krivulji pri tem postopku sta premici p_1 in p_2 , ki gresta skozi znani točki (položaja svetilnika) S_1 in S_2 . Smeri premic sta podani z azimutoma α_1 in α_2 znanih točk S_1 in S_2 . Položaj P določa presečišče položajnih premic p_1 in p_2 .

Zgled 4 Določitev položaja izletnika s pomočjo kompasa in zemljevida

Prikažimo postopek z zgledom iz pohodništva: na izletu dobro vidimo antenska stolpa na Nanosu in na Kumu. S kompasom določimo njuna azimuta 226° in 137° . Na zemljevidu poiščemo Nanos (S_1) in Kum (S_2) in skozi točki S_1 in S_2 narišemo premici p_1 in p_2 . Premici se sekata v točki P na Menini planini.

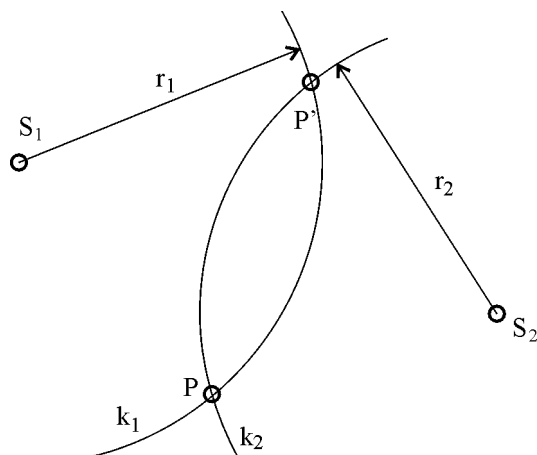
Na letalu pa bomo določili azimut svetilnikov z enim izmed navigacijskih sistemov, ki jih bomo spoznali v naslednjih poglavjih.

Zgled 5 Pogrešek določanja položaja z dvema azimutoma

Za določitev pogreška določanja položaja z dvema azimutoma potrebujemo tudi oddaljenost r_1 in r_2 . Če sta premici p_1 in p_2 med seboj pravokotni (kar je glede pogreškov najugodnejše), je pogreškovna

elipsa podana s polosema $r_1 \cdot \Delta\alpha_1$ in $r_2 \cdot \Delta\alpha_2$, pri čemer sta $\Delta\alpha_1$ in $\Delta\alpha_2$ pogreška pri določanju azimutov. Pri sistemu s pogreškom $\pm 1^\circ$ in razdalji 500 km do svetilnikov, ki ju vidimo pod pravim kotom, je pogrešek položaja enak 9 km, če sta svetilnika oddaljena 50 km, pa znaša pogrešek še vedno 900 m! Ocena pogreška na $\pm 1^\circ$ je kar dobra za sisteme v uporabi, torej taki sistemi pri določanju položaja niso prav natančni!

4.3 S pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho)

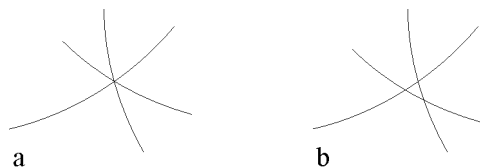


Sl. 4.2 Določanje položaja s pomočjo dveh oddaljenosti

Položajni krivulji sta krožnici k_1 in k_2 . S_1 in S_2 označujeta položaj znanih točk (položajev svetilnikov), r_1 in r_2 pa sta oddaljenosti položaja do teh točk. Položaj P določa presečišče krožnic k_1 in k_2 , katerih središči sta točki S_1 in S_2 , polmera pa sta določena z oddaljenostma r_1 in r_2 (Sl. 4.2). Zgled iz pohodništva bi težko navedli, ker cenениh daljinomerov nimamo. Na letalu pa lahko oddaljenost do svetilnika določimo z enim izmed sistemov, ki jih bomo spoznali v nadaljnjih poglavjih.

Očitno pa imamo pri tem postopku težavo, kajti krožnici k_1 in k_2 se sekata tudi v točki P' . Kako bo torej navigator določil, kateri položaj je pravi? Na dva načina.

Eden je, da bo izmeril še oddaljenost do tretjega svetilniknika, vse tri krožnice se sekajo le v eni točki (Sl. 4.3.a).



Sl. 4.3 Določanje položaja s tremi krožnicami

Vendar, če upoštevamo nenatančnost meritev oddaljenosti, je presečišče pravzaprav drugačno (Sl. 4.3b). Presečišča tvorijo trikotnik iz krožnih lokov, naš položaj pa je najverjetneje nekje v tem trikotniku. Če je trikotnik majhen, je zelo verjetno, da smo svoj položaj izmerili natančno, če pa je trikotnik velik, je z našo meritvijo gotovo nekaj narobe. S tega stališča je torej zaželeno, da pri

določanju položaja naredimo več meritev, kot je potrebno. Zato dvoličnost rezultata ni posebna pomanjkljivost metode.

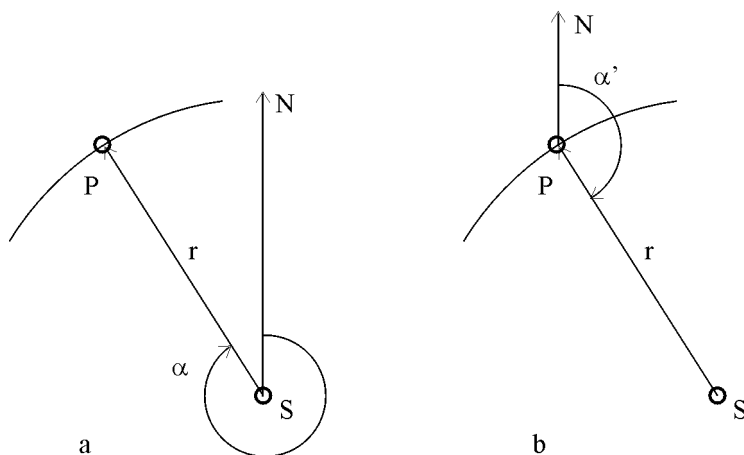
Drugi, pogosto uporabljeni način pa je naslednji: Če približno poznamo svoj položaj, izberemo za pravi položaj tistega, ki je bližje približnemu. Običajno svoj položaj približno poznamo, saj ga na začetku poti poznamo natančno, potem pa ga praviloma določamo v kratkih časovnih razmikih. V enem časovnem razmiku se položaj ne more zelo spremeniti in približni položaj je kar zadnji znani položaj.

Očitno je torej, da lahko v večini primerov kljub dvoličnosti brez posebnih težav določimo pravi položaj.

Zgled 6 Pogrešek določanja položaja z dvema oddaljenostima

Tudi pri tem sistemu je pogrešek najmanjši, če vidimo svetilnika pod pravim kotom, takrat se tudi krožnici sekata pod pravim kotom. V tem primeru je pogreškovna elipsa podana s polosema Δr_1 in Δr_2 , pri čemer sta Δr_1 in Δr_2 pogreška pri določanju oddaljenosti. Oddaljenost merimo s pomočjo radijskih valov praviloma tako, da merimo zakasnitve radijskih valov. Pri takšnem merjenju pogreški praviloma niso odvisni od oddaljenosti. Pri sistemu s pogreškom merjenja oddaljenosti 500m znaša pogrešek ne glede na oddaljenost od svetilnikov 500m, če seveda svetilnika vidimo pod pravim kotom. Ocena pogreška na 500m je za sisteme v uporabi kar realistična, torej so taki sistemi za določanje položaja mnogo bolj natančni kot sistemi z merjenjem dveh azimutov.

4.4 S pomočjo oddaljenosti in azimuta (sistemi rho-theta)



Sl. 4.4 Določanje položaja z oddaljenostjo in azimutom

Pri tem postopku sta položajni krivulji premica in krožnica. Če poznamo oddaljenost r od svetilnika do položaja in azimut α položaja glede na svetilnik, lahko določimo položaj s presečiščem krožnice polmera r s središčem v položaju svetilnik S in premice, ki gre pod kotom α skozi položaj S svetilnika (Sl. 4.4.a). Na tak način radar določa položaj cilja. V navigaciji pa pogosto ne določamo azimuta cilja

glede na svetilnik, temveč azimut svetilnika glede na položaj (Sl. 4.4.b). Kota α in α' se med seboj očitno razlikujeta za 180° , tako da je prehod iz ene slike v drugo trivialen.

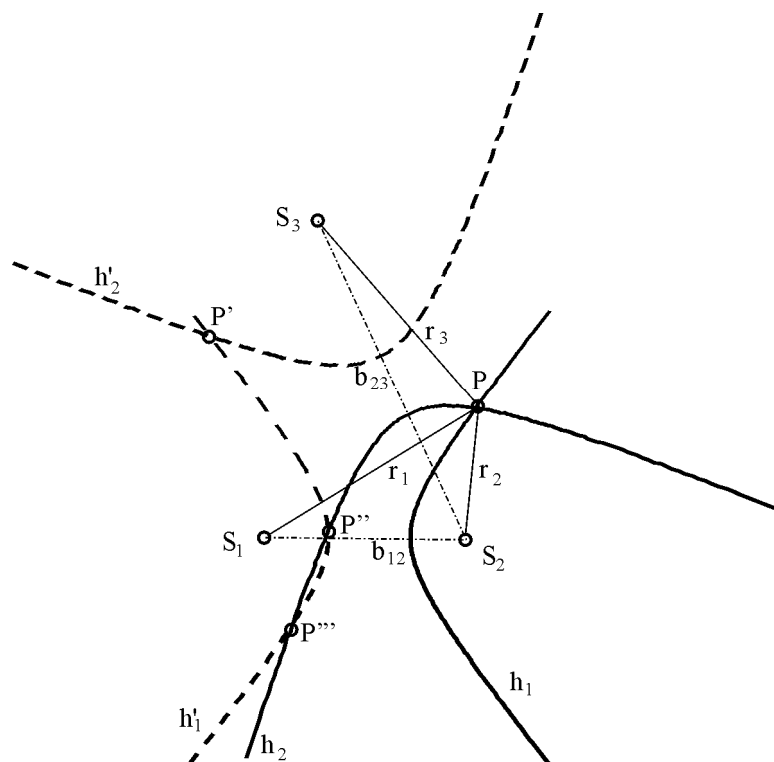
Pogrešek takega sistema bo pravokotno na azimut (tangencialni pogrešek) enak $r \cdot \Delta\alpha$, vzdolž azimuta (radialni pogrešek) pa Δr . Prednost te metode je, da so položajne krivulje med seboj vedno pravokotne in da je potreben le en svetilnik¹.

Zgled za uporabo te metode za določanje lastnega položaja je sistem VOR/DME, za določanje tujega položaja pa radar.

Zgled 7 Pogrešek določanja položaja z oddaljenostjo in azimutom

Vzemimo, da je pogrešek oddaljenosti 400 m, pogrešek azimuta pa $\pm 1^\circ$. Na oddaljenosti 50 km od svetilnika je tangencialni pogrešek 900 m, na oddaljenosti 10 km pa 200 m. Radialni pogrešek je seveda obakrat 400m. Iz zgleda je očitno, da je tudi tangencialni pogrešek takega sistema čisto sprejemljiv, ko se letalo približa svetilniku.

4.5 S pomočjo razlik oddaljenosti do treh svetilnikov (hiperbolični sistemi)



Sl. 4.5 Določanje položaja z razlikami oddaljenosti do treh svetilnikov

Pogosto je lažje kot razdaljo do svetilnika določiti razliko med razdaljama do dveh svetilnikov.

¹ To velja za antenski stolp. Radijska svetilnika sta na tem stolpu dva, eden za določanje azimuta in drugi za določanje oddaljenosti.

Naj trije svetilniki S_1 , S_2 in S_3 , oddaljeni od našega položaja r_1 , r_2 , in r_3 (Sl. 4.5), hkrati oddajo radijski impulz. Sprejemnik izmeri čase prispetja t_1 , t_2 in t_3 teh pulzov in iz njih izračuna časovne razlike, torej

$$\begin{aligned}t_1 - t_2 &= \Delta t_{12} = \frac{r_1 - r_2}{c} \\t_2 - t_3 &= \Delta t_{23} = \frac{r_2 - r_3}{c} \\t_1 - t_3 &= \Delta t_{13} = \frac{r_1 - r_3}{c}\end{aligned}$$

Iz teh enačb sledijo naslednje enačbe

$$\begin{aligned}\Delta t_{12}c &= r_1 - r_2 = k_{12} \\ \Delta t_{23}c &= r_2 - r_3 = k_{23} \\ \Delta t_{13}c &= r_1 - r_3 = k_{13}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Enačbe kažejo, da so položajne krivulje geometrično mesto točk, katerih razlika oddaljenosti do dveh točk je konstantna. Takšno lastnost ima hiperbola, parametri hiperbol so določeni z razlikami časov prispetja impulzov in z znanimi položaji svetilnikov. Prva enačba pravi, da je naš položaj nekje na hiperboli h_1 , druga pa, da je nekje na hiperboli h_2 , položaj sprejemnika je torej določen s presečiščem P obeh hiperbol. Za določitev lege v dveh dimenzijah potrebujemo dve hiperboli in tri svetilnike. Čeprav iz enačb vidimo, da lahko določimo tri hiperbole, tretja ne pomaga za bolj natančno določanje položaja, saj se seka v natančno isti točki kot prvi dve, tretja enačba je namreč vsota prvih dveh. Pozorni bralec utegne pomisliti, da bi pri določanju položaja utegnili imeti težave s tem, da ima hiperbola dve veji, drugi veji sta v sliki narisani črtkano. Vendar ni tako, ker poznamo čase prispetja impulzov, vemo tudi, da smo denimo bližje svetilniku S_2 kot svetilniku S_1 in s pomočjo tega določimo pravilno vejo hiperbole, pripadajoče konstanti k_{12} . V našem primeru (hiperbola h_1) smo bližje svetilniku 2 kot svetilniku 1 (torej pride do nas prej signal s svetilnika 2 kot od svetilnika 3) in bližje svetilniku 2 kot svetilniku 3 (hiperbola h_2). Za ilustracijo smo v sliko črtkano vrisali primer, ko bi bil naš položaj (P') bližje svetilniku S_1 kot svetilniku S_2 (hiperbola h'_1) in bližje svetilniku S_3 kot svetilniku S_2 (hiperbola h'_2).

Daljica med parom svetilnikov se imenuje baza. Na sliki sta vrisana dva para svetilnikov s pripadajočima bazama b_{12} in b_{23} (črta-pika-črta).

Podobno kot pri sistemu določanja položaja s pomočjo dveh oddaljenosti od svetilnikov (poglavje 4.3) lahko pride tudi pri hiperboličnih sistemih do tega, da se dve hiperboli sekata v dveh točkah in tudi tukaj pravo rešitev običajno izberemo na podlagi približno znanega položaja. Na sliki se dvakrat sekata hiperbola h'_1 in hiperbola h_2 , tak primer bi bil, ko bi bil naš položaj (P'' ali P''') bližje svetilniku S_1 kot svetilniku S_2 in bližje svetilniku S_2 kot svetilniku S_3 .

Trenutno edino hiperbolični sistemi omogočajo poleg dvodimenzionalne tudi trodimenzionalno določanje položaja. Pri tridimenzionalnem hiperboličnim določanju položaja pa se moramo iz ploske dežele (Sl. 4.5) preseliti v prostorsko deželo (ki jo je bistveno težje nazorno narisati, zato 'v mislih'). Ostanimo za začetek razmišljanja pri treh svetilnikih, ki vedno ležijo v eni ravnini, naj bo to ravnina s slike. Položaj pa sedaj v splošnem ne bo več v tej ravnini, naj bo od nje oddaljen za višino h . Položajne ploskve posameznih parov svetilnikov, ki gredo skozi položaj in ki jih podaja enačba (4.1), ki smo jo dobili iz merjenja časovnih zakasnitev, so sedaj rotacijski hiperboloidi, katerih osi so bazne premice. To razložimo takole: enačba (4.1) je denimo za par svetilnikov 1 in 2 izpolnjena tudi, če ravnino risbe zavrtimo okrog osi bazne premice b_{12} , to vrtenje pa hiperbolo spremeni v rotacijski hiperboloid. Razmislek seveda velja za oba para. Presečišče dveh rotacijskih hiperboloidov pa ni točka, temveč krivulja. Za določitev položaja potrebujemo torej še en par svetilnikov, torej še dodatni svetilnik. Ta bo podal še en rotacijski hiperboloid, sečišče vseh treh pa položaj. Vendar četrtega svetilnika ne moremo dodati kar na poljubno mesto. Če so namreč vsi štirje svetilniki s položajem vred približno v isti ravnini, se krivulje presečišč med seboj sekajo pod zelo ostrim kotom (vse namreč sekajo to ravnino približno pod pravim kotom), to pa pomeni zelo nenatančno določen položaj po višini. Z drugimi besedami opišemo tako stanje, da je sistem enačb (4.1) slabo pogojen, kar pomeni, da majhna sprememba podatkov (meritev) pomeni veliko spremembo rezultata (položaja). Zato dodatni svetilnik ne sme biti v ravnini prvih treh, temveč na primerni višini, takrat bo namreč ploskev njegovega hiperboloida v točki položaja sekala ploskvi ostalih dveh pod pravim kotom, kar zagotavlja natančno določanje višine h položaja. Za natančno tridimenzionalno določanje položaja je torej potreben **četrty svetilnik na primerni višini**. Iz tega izvajanja sledi, zakaj le satelitski svetilniki omogočajo trirazsežno navigacijo, saj je le pri satelitih mogoče četrty svetilnik postaviti primerno visoko.

Poglejmo si v luči povedanega še enkrat dvodimenzionalno določanje položaja. V resnici ni določanje položaja nikoli idealno dvodimenzionalno, to je možno le v geometriji. Položaj P namreč ni natančno v ravnini slike (Sl. 4.5), temveč je 'izmaknjen' po višini, slika pa je prerez obeh rotacijskih hiperboloidov z ravnino svetilnikov. Položaj P v sliki zato ni pravi, temveč navidezni položaj, ki je projekcija pravega položaja vzdolž tetive presečišča obeh hiperboloidov, ki povezujejo pravi položaj z navideznim. Vendar so te tetive pri majhni višini (v primerjavi z bazno razdaljo) kar tangente, ki sekajo ravnino pod pravim kotom. Očitno pri majhni višini kvazidvodimenzionalno določanje položaja deluje natančno tako, kot od njega pričakujemo, da nam namreč poda projekcijo položaja na ravnino svetilnikov.

4.6 Literatura

- [1] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994
- [2] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

5. Radarji

5.1 Uvod

Radar je elektromagnetni sistem za zaznavo in radiolokacijo ciljev, recimo letal, ladij, vozil, ljudi, pa tudi okolja, denimo hribov, oblakov itd. Radar oddaja radijske valove, ki se odbijajo od tarče. Te odbite valove radar sprejema in s primerjanjem z oddajanimi valovi določi lastnosti tarče: oddaljenost, hitrost, obliko ipd. Radar natančno deluje na kratkih in dolgih razdaljah, v temi, megli in v oblačnem vremenu.

Radar se sicer praviloma uporablja za določanje tujega položaja, pri navigaciji pa na splošno določamo lasten položaj. Kljub temu pa je radar koristno navigacijsko sredstvo.

Največ uporabljan je monostatični¹ pulzni radar, ki deluje takole: Oddajnik preko antene oddaja vlak pulzov radijskega valovanja. Pulzi se odbijajo od tarče in preko iste antene zakasnjeno pridejo v sprejemnik. Iz časa, ki preteče med oddajo in sprejemom pulza, radar določi oddaljenost cilja. Smer, v kateri se nahaja cilj, je smer, v katero je obrnjena antena radarja.

Frekvenčno moduliran radar se uporablja za merjenje višine in vertikalne komponente hitrosti letal. Pulzni Dopplerjevi radarji in sekundarni radarji pa so najpogosteje uporabljani radarji za kontrolo zračnega prometa, torej danes nepogrešljiv navigacijski pripomoček za vsa letala. V veliko pomoč pri navigaciji so tudi meteorološki radarji, ki so v načelu pulzni Dopplerjevi radarji. Zato si bomo v teh skriptah ogledali tudi nekaj osnov radarjev.

5.1.1 Prednosti in pomanjkljivosti radarjev

Prednost radarja je predvsem v tem, da ima svoj vir 'svetlobe' in zato ni odvisen od zunanjih pogojev (Sonce, Luna itd). Uporablja tudi signale takšnih frekvenc, ki se skozi meglo, dež, oblake, sneženje širijo z mnogo manjšim dušenjem kot svetloba. Torej 'vidi' zelo daleč tudi v pogojih slabe optične vidljivosti, česar zaenkrat ne omogoča nobena druga naprava. Zato v mnogih pogledih prekaša tako optične kot infrardeče sisteme.

¹ Pri monostatičnem radarju sta oddajnik in sprejemnik na istem mestu, običajno oba uporabljata kar isto anteno. Pri bistatičnem radarju sta oddajnik in sprejemnik na različnih mestih. Obe zasnovi imata vsaka svoje prednosti in pomanjkljivosti in v zgodovini radarja so poskušali z obema zasnovama.

Poglavitna **pomanjkljivost** radarja pa je njegova ločljivost, ki je mnogo slabša kot ločljivost vidne ali infrardeče svetlobe, radar torej ne 'vidi' podrobnosti. Zato je v radarski tehniki tudi prepoznavanje ciljev še v plenica.

5.1.2 Uporaba radarja

Radarje uporabljamo za zaznavanje tarč na zemlji, v zraku, na morju, v vesolju in celo pod zemljo.

Zgodovina radarja se je začela z **vojaško uporabo** in še vedno je ta raba eden najpomembnejših vzvodov razvoja radarjev. Radar je pomemben člen obrambnih sistemov, pa tudi sistemov za vodenje izstrelkov. V zračni obrambi skrbi za zaznavo, prepoznavanje, sledenje in za označevanje tarč.

Radar uporabljamo tudi za **opazovanje okolja**. Sem štejemo opazovanje vremena z meteorološkimi radarji, opazovanje in kartografiranje površine planetov (ne le Zemlje, brez radarja bi nam bila zaradi gostih oblakov površina Venere povsem nevidna!), sondiranje zemlje za geološke in arheološke namene in kartografiranje zaledenelih morskih površin za določanje optimalnih ladijskih poti.

Kontrola zračnega prometa je poleg vojaške gotovo najbolj poznana uporaba radarjev. Radarje uporabljamo za kontrolo zračnega prostora okrog letališč, za vodenje letal od enega do drugega letališča in za kontrolo premikanja letal po letališču.

Radarji služijo tudi **navigaciji in varnosti zračnega prometa**. Opozarjajo letala pred nevarnimi (vremenskimi) področji in merijo višino ter hitrost spuščanja in dviganja letal. Nizko leteča vojaška letala uporabljajo radarje za sledenje zemljišča. Radarji za sledenje zemljišča se uporabljajo tudi pri navigaciji samoletečih izstrelkov.

Radarji so zelo povečali **varnost ladij**, tako da je ladja brez radarja dandanes že posebnost. Ladje uporabljajo radarje predvsem za preprečevanje trčenj, posebej ob slabi vidljivosti.

V industriji se radarji uporabljajo npr. za merjenje položaja ali hitrosti ali štetje težko dostopnih predmetov.

5.1.3 Zgodovina razvoja radarja

Določanje tujega položaja pred izumom radarja je bilo omejeno na vidljivost. Uporabljali so daljinomer, teodolit (kotomer, vodna tehtnica). Naprave niso imele velikega dosega, ponoči in v megli pa so bile neuporabne.

Narava je pri netopirjih razvila ultrazvočni pulzni radar v približno 200 variantah, od čisto preprostega pulznega radarja do radarja s kompresijo pulzov, pa tudi radarja z različnim načinom delovanja, recimo pri iskanju ali sledenju cilja. Svoj radar netopirji ponoči zelo spretno uporabljajo, prepoznavanje ciljev je pri netopirjevem radarju mnogo bolj izpopolnjeno kot pri človeškem radarju in

ga večinoma še ne poznamo in ne razumemo. Nič čudnega, saj je imela narava za razvoj na voljo nekaj deset milijonov let časa!

Princip radarja je prvi prikazal Heinrich Hertz med leti 1885 in 1888 v klasičnih poskusih, s katerimi je eksperimentalno potrdil teorijo J. C. Maxwella o elektromagnetnem polju. V svojih poskusih je Hertz potrdil tudi, da se radijski valovi odbijajo od kovinskih predmetov in lomijo na dielektričnih prizmah. Ni pa spoznal praktične uporabnosti svojih poskusov.

Prvi, ki je spoznal in praktično uporabil radijske valove za odkrivanje ciljev, je bil Nmec Christian Huelsmeyer. Leta 1904 je v Angliji in v Nemčiji patentiral 'postopek za odkrivanje oddaljenih predmetov..' (Sl. 5.1). S svojim aparatom, ki je v principu deloval kot pulzni radar, je zaznaval ladje na daljavo, poskušal ga je tržiti kot 'pripomoček za preprečevanje trčenj na morju'. Predstavil ga je ladijskim družbam in nemški mornarici, vendar neuspešno. Njegov radar je utonil v pozabo, ker pri nikomer ni mogel vzbuditi zanimanja za uporabo, in to desetletje pred Titanicom! Čudna so pota Gospodova!



Sl. 5.1 Hülsmejerjev patentni spis iz leta 1904

V dvajsetih letih dvajsetega stoletja je nato Marconi v svojih poskusih opazil zaznavanje predmetov z radijskimi valovi in odločno pozval za njihovo uporabo v ta namen. Leta 1922 sta A. H. Taylor in L. C. Young z Ameriškega mornariškega inštituta v Washingtonu slučajno, ne vedoč za Marconijev poziv, opazila, da prehod ladje med oddajnikom in sprejemnikom povzroča spreminjanje signala na sprejemniku. Tako se je rodil bistatični radar, torej radar, ki ima sprejemnik in oddajnik na različnih

lokacijah. Razvoj naslednjih letih je šel v tej smeri, vendar ni bil posebej uspešen, še sedaj takšni radarji niso posebej pomembni.

Razvoj radarjev je pognal v tek v tridesetih letih dvajsetega stoletja pojav težkih kovinskih bombnih letal. Pravočasno zaznavanje teh pošasti je postalo življensko pomembno in kar naenkrat so vsi hkrati in med seboj neodvisno ponovno odkrili radar.

Združene države. Pospešen razvoj mornariškega pulznega radarja se je začel leta 1934, do decembra leta 1941 so Mornarici dobavili že 132 radarjev (200 MHz), 79 jih je bilo že nameščenih na ladjah. V bitki za Midwaye so radarji odločilno pripomogli, da so Amerikanci bolj učinkovito uporabili omejeno število svojih ladij proti premočnim Japoncem, ki niso imeli tako zmogljivih radarjev. Kopenska vojska je začela z razvojem radarja z velikim dosegom za odkrivanje letal leta 1936, do leta 1941 jih je Armada dobila že 112. Eden izmed njih je odlično opravil svojo nalogo v Pearl Harbourju, le sistem poveljevanja in kontrole je odpovedal!

Velika Britanija. Sredi tridesetih let dvajsetega stoletja so Britanci spoznali, da se vojni ne bo mogoče izogniti. Kljub temu, da so z razvojem radarja začeli kasneje kot Amerikanci, so imeli že leta 1938, leto dni pred začetkom vojne, delujoč radarski sistem na frekvenci 30 MHz. Ta sistem je odločilno pripomogel k obrambi pred Nemci v znameniti Bitki za Britanijo v poznem poletju leta 1940. Leta 1939 so Britanci razvili radar na frekvenci 200 MHz, namenjen predvsem odkrivanju letal. Ta sistem je bil kasneje modificiran tako, da je bil uporaben tudi za detektiranje ladij in podmornic. Zelo pomemben napredek radarske tehnike je pomenila uporaba močnostnega magnetrona, ki je omogočil velike moči pri visokih frekvencah.

Nemčija. Tudi dežela Hertza in Huelsmeyerja je pred 2. svetovno vojno na novo odkrila radar. Konec leta 1940 je imela Nemčija tri glavne radarske sisteme. Mobilni radarji Freya so delovali na frekvenci 125 MHz in bili namenjeni zgodnjemu odkrivanju letal. Vendar so imeli v začetku vojne na razpolago le osem radarjev Freya. Radarji za usmerjanje topov Wuerzburg so delovali na frekvenci 565 MHz. Uporabljali so jih v sodelovanju z radarji Freya, do konca vojne so jih naredili 4000. Pomorski radarji Seetakt so delovali na frekvenci 500 MHz in bili namenjeni za kontrolo topovskega ognja na ladjah. Uporabljali so jih že v španski državljanski vojni leta 1937. Leta 1940 so imeli Nemci najbrž boljše razvito radarsko tehniko kot zavezniki, kar so zavezniki ugotovili šele po končani vojni. Nemška vojska namreč svoje prednosti na tem področju ni izkoristila. Svojo napako so Nemci spoznali šele, ko so zavezniki začeli bombardirati nemška mesta, takrat pa je bilo že prepozno.

Sovjetska zveza. Radarje so začeli razvijati sredi tridesetih let in so jih v času invazije Nemcev že imeli na razpolago. Proizvodnja in razvoj sta bili namenjeni obrambi Leningrada in Moskve. Proizvajali so bistatični radar, delujoč na frekvenci 75 MHz. Za razliko od vseh ostalih radarjev, ki so bili pulzni, je ta deloval z nemoduliranim nosilnim signalom (*continuous wave radar*– CW). Ni bil preveč uspešen,

zato so ga ob začetku sovražnosti zamenjali s pulznim radarjem, prav tako delujočim na frekvenci 75 MHz. To je bil mobilni radar, nameščen na kamionu, z dosegom 150 km. Nemška invazija je prisilila Sovjete, da so preselili razvoj na vzhod, kar je resno zavrlo nadaljnji razvoj.

Italija. Italijani niso spoznali pomembnosti radarja, dokler niso Britanci v temi našli njihovega ladjevja in jih presenečene v nočni pomorski bitki pri rtu Matapan odločilno porazili. Ta poraz je vodil do proizvodnje ladijskih radarjev Owl, delujočih na frekvenci 200 MHz.

Francija. V srednjih tridesetih letih so se ukvarjali z razvojem bistatičnega nemoduliranega radarja in šele v letu 1939 začeli z razvojem pulznega radarja, toda vojna jih je prehitela.

Japonska. Japonci so odkrili in razvili magnetron že pred Britanci, toda tega dejstva niso znali izkoristiti za izdelavo radarjev, ki bi bili primerljivi z zavezniškimi. Spočetka so se ukvarjali z bistatičnim radarjem in šele leta 1941, ko so izvedeli za britanski pulzni radar, začeli razvijati pulzni radar. Razvoj so še pospešili po Bitki za Guadalcanal, v kateri so spoznali prednosti Amerikancev z radarji. Vendar v razvoju niso bili preveč uspešni.

Nizozemska. Celo majhna Nizozemska je pred 2. svetovno vojno razvila pulzni mornariški radar za zračno obrambo in začela proizvodnjo desetih prototipov. Toda ravno na dan načrtovane demonstracije so jih napadli Nemci.

Opisano kaže, da je bila radarska tehnika v svojih začetkih vzpodbujena z drugo svetovno vojno in da so, v nasprotju s precej razširjenim mnenjem, da so imeli radar le Britanci in tako ubranili svojo deželo pred Nemci, vse države, ki so v tej vojni kaj veljale, razvijale in imele na razpolago radarsko tehniko. Kako so jo uporabljale, pa ni bilo odvisno le od tehničnih lastnosti naprav, temveč predvsem od vojaških plati vodenja vojne, od logistike do strategije, taktike in poveljevanja. Ta plat je najbolj prišla do izraza v Bitki za Britanijo in v Bitki za Tihi ocean, in v obeh so zmagali zavezniki. Prav tako je jasno, da je pri razvoju radarja odločilno vlogo odigral izum magnetrona. O tem zgodovinarji še niso rekli zadnje besede, vse pa kaže na to, da se tudi pri njem potrjuje znano pravilo: ko je čas zrel, dozori tudi izum, navadno neodvisno na različnih mestih. Dejstvo je, da so magnetron že pred vojno imeli Britanci, Amerikanci, Nemci in Japonci, prve patente pa so imeli Nemci in to v Združenih državah.

Napredek po drugi svetovni vojni. Naštejmo le nekaj mejnikov v razvoju radarske tehnike.

Uporaba Dopplerjevega pojava pri radarjih z dušenjem mirujočih ciljev (moving target indicator – MTI) za ločitev želenega odziva od premikajočih se ciljev od neželenega odziva od mirujoče okolice.

Močnostni ojačevalniki (klystron, cev na potujoče valove) za uporabo bolj sofisticiranih oblik modulacije.

Zelo natančno sledenje ciljev z monopulznim radarjem.

S *kompresijo pulzov* dosežemo z uporabo dolgih pulzov veliko energijo pulza in obenem dobro ločljivost radarja.

Letalski *radarji s sintetično odprtino* imajo veliko ločljivost pri kartografiranju ozemlja.

Letalski *pulzni Dopplerjevi radarji* omogočajo merjenje hitrosti ciljev.

Elektronsko krmiljene antenske skupine omogočajo hitro spreminjanje smeri glavnega snopa antene brez mehanskega premikanja.

Kratkovalovni *prekohorizontni radarji* imajo doseg za odkrivanje letal nekaj tisoč km.

Radar z analizo odbitega signala *prepoznava cilje*.

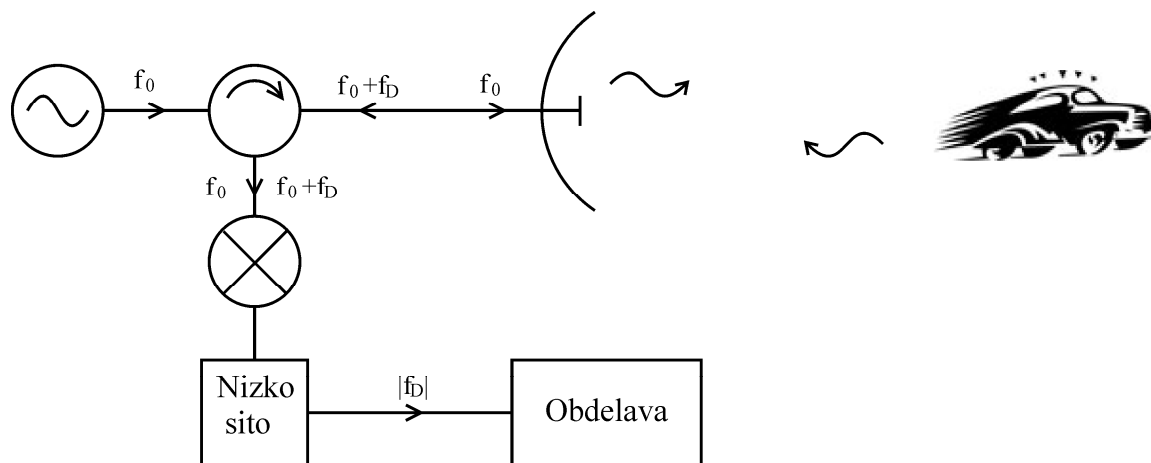
Radar postane važno orodje *meteorologov*.

Hiter razvoj digitalne tehnologije omogoča uporabo vedno večih teoretičnih možnosti *procesiranja signalov* in *procesiranja podatkov*.

Z razvojem visokofrekvenčne tehnike se radar seli na *vedno višje frekvence*, kar ne velja edino za radarje z zelo velikim močnostnim dosegom.

5.2 Dopplerjev radar s kontinuiranim signalom (CW)

Dopplerjev nemoduliran (*continuous wave*, CW) radar je sijajen zgled, kako lahko inženir v učinkoviti napravi 'z eno potezo' izkoristi naravni zakon, predstavlja pa tudi primeren uvod v Dopplerjev pulzni radar, ki ga bomo bežno spoznali v enem od naslednjih poglavij. Blokovna shema radarja je na naslednji sliki (Sl. 5.2).



Sl. 5.2 Nemoduliran Dopplerjev radar.

Če se valovanje odbije od gibajočega se telesa, se njegova frekvenca spremeni. Pojav imenujemo Dopplerjev pojav, spremembo frekvenca pa Dopplerjeva frekvenca. Za Dopplerjev pojav je 'kriva' le komponenta hitrosti vzdolž širjenja vala, pogosto ji rečemo radialna hitrost. Označimo radialno hitrost telesa od katerega se val odbija z v_r , frekvenco vala z f_0 , spremenjeno frekvenco z f , pa velja

$$f_D = 2f_0 \frac{v_r}{c} \quad (5.1)$$

$$f = f_0 + f_D$$

Frekvenca se poveča, če se telo premika proti izvoru valovanja, referenčna smer radialne hitrosti je torej proti valu.

Oglejmo si sedaj, kako radar deluje. Oscilatorjev signal gre preko cirkulatorja in antene v prostor. Če v prostoru naleti na oviro, se od nje odbije. Preko antene in cirkulatorja gre odbiti signal nato na mešalnik. Tam se zmeša s signalom, ki pride na mešalnik preko zapore cirkulatorja. Sistem deluje torej kot koherentni sprejemnik. Na izhodu se pojavijo signali vseh možnih kombinacij vsot in razlik osnovnih in višjih frekvenc. Najnižja in za nas edino zanimiva izmed teh frekvenc je ravno Dopplerjeva frekvenca in samo signal s to frekvenco gre preko nizkega sita na obdelavo. Tu na primeren način določimo Dopplerjevo frekvenco in iz nje izračunamo radialno hitrost cilja. Preprosto, da bolj ne more biti!

No, kljub temu je v postopku nekaj pasti, opozorimo na nekatere. Očitno tako preprost radar ne more določiti, ali se cilj približuje ali oddaljuje. Kadar je ta informacija pomembna (kadar radar služi za merjenje prekoračitve hitrosti vozil, očitno ni!), jo dobimo tako, da obrnemo fazo oscilatorjevega signala za 90° in ta signal mešamo z odbitim signalom še na dodatnem mešalniku. Tako smo dobili **kvadrturni sprejemnik**, iz signalov iz obeh mešalnikov pa lahko določimo tudi smer gibanja cilja.

Preden si ogledamo naslednjo težavo pri realizaciji Dopplerjevega radarja, si oglejmo zgled.

Zgled 8 Dopplerjeva frekvenca

Določimo Dopplerjevo frekvenco cestnoprometnega radarja s frekvenco 9 GHz za vozilo, ki vozi s hitrostjo 40 km/h.

$$f_D = 2f_0 \frac{v_r}{c} = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{40 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^8} = 667 \text{ Hz}$$

Očitno je Dopplerjeva frekvenca v primerjavi s frekvenco oddajane signala zelo majhna. Zato mora oscilator imeti majhen fazni šum, v vezje pa dodamo tudi visoko sito, ki odreže najnižje frekvence, kjer je ta šum največji. Namesto nizkega sita za mešalnikom torej v resnici uporabimo pasovno sito, katerega prepustno področje definira območje hitrosti, ki jih želimo meriti z merilnikom. Lahko pa uporabimo tudi zasnovano sprejemnika z dvojnimi mešanjem, tako da ima signal prve medfrekvence višjo frekvenco od Dopplerjeve frekvence.

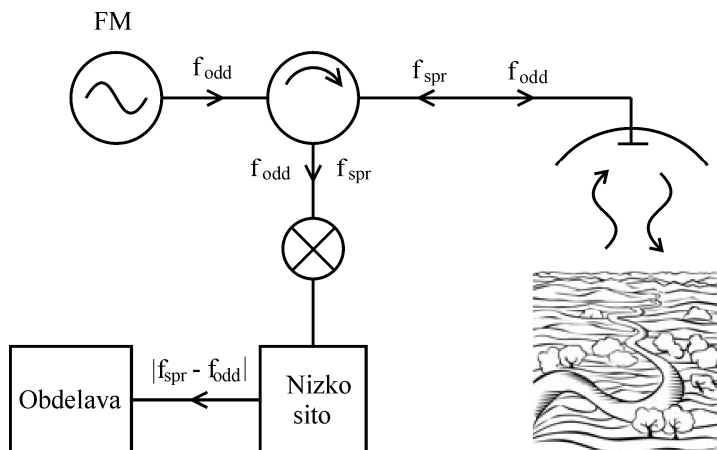
Seveda tudi ni nujno, da je radar izveden s cirkulatorjem, prav tako lahko uporabimo smerni sklopnik in dve anteni.

Dopplerjev radar je najbolj primeren za merjenje hitrosti le enega cilja. Kot možno rabo navedimo cestnoprometni radar, pri katerem z ozkim glavnim snopom antene ciljamo posamezna vozila. Kadar se znajde v snopu radarjev več ciljev, jih bo preprost radar med sabo 'pomešal' v nerazvozljivo 'solato'¹.

¹ 'Solato' seveda lahko razvozlamo z inverzno Fourierovo transformacijo (IFFT), ki signal prestavi iz frekvenčnega v časovni prostor in več tarč razvrsti po časovni zakasnitvi (in torej oddaljenosti). Vendar tak radar ni več preprost Dopplerjev CW radar, temveč kompleksna naprava.

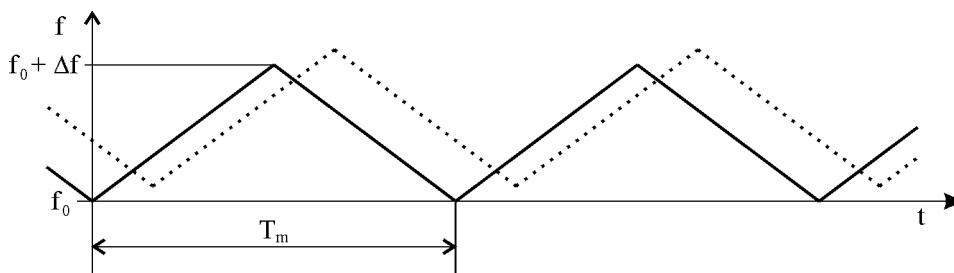
5.3 Frekvenčno moduliran radar s kontinuiranim signalom (FM-CW)

Blokovna shema frekvenčno moduliranega stalno delujočega radarja je na spodnji sliki (Sl. 5.3). Od Dopplerjevega nemoduliranega radarja se loči v bistvu le po tem, da je visokofrekvenčni signal frekvenčno moduliran.



Sl. 5.3 Frekvenčno moduliran radar

Frekvenca oddajane signala naj se spreminja s časom, kakor kaže slika (Sl. 5.4, polna črta)



Sl. 5.4 Frekvenca oddajane in sprejemanega signala FM radarja

V času od 0 do $T_m/2$ je frekvenca oddajane signala podana z

$$a) f_{odd}(t) = f_0 + \frac{2\Delta f}{T_m}t$$

V času od $T_m/2$ do T_m pa je frekvenca oddajane signala podana z

$$b) f_{odd}(t) = f_0 + 2\Delta f - \frac{2\Delta f}{T_m}t$$

Frekvenca sprejemanega signala (Sl. 5.4, črtkana črta) je različna od frekvence oddajane signala iz dveh vzrokov: ker je signal zakasnen in zaradi Dopplerjevega pojava. Torej:

$$f_{spr}(t) = f_{odd}(t - \Delta t) + f_D$$

Dopplerjeva frekvenca je podana z enačbo (5.1), zakasnitev pa z oddaljenostjo tarče

$$\Delta t = \frac{2R}{c} \quad (5.2)$$

Napišimo sedaj sprejemani frekvenci za področje a:

$$\begin{aligned} f_{spr}(t) &= f_0 + \frac{2\Delta f}{T_m}(t - \Delta t) + f_D \\ f_{spr}(t) &= f_0 + \frac{2\Delta f}{T_m}t - \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t + f_D \\ f_{spr}(t) &= f_{odda}(t) - \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t + f_D \end{aligned}$$

in področje b:

$$\begin{aligned} f_{spr}(t) &= f_0 + 2\Delta f - \frac{2\Delta f}{T_m}(t - \Delta t) + f_D \\ f_{spr}(t) &= f_0 + 2\Delta f - \frac{2\Delta f}{T_m}t + \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t + f_D \\ f_{spr}(t) &= f_{odda}(t) + \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t + f_D \end{aligned}$$

Radarski sprejemnik sprejeti signal na mešalniku meša z oddajanim signalom in z nizkim sitom odstrani vse mešalne produkte razen razlike frekvenc. Parametra Δf in T_m sta za resnične radarje izbrana tako, da je sprememba frekvence zaradi časovne zakasnitve veliko večja od Dopplerjeve frekvence. Absolutna vrednost razlik frekvenc je za področji a in b zato podana z:

$$\begin{aligned} f_a &= |f_{spr a} - f_{odda}| = \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t - f_D \\ f_b &= |f_{spr b} - f_{oddb}| = \frac{2\Delta f}{T_m}\Delta t + f_D \end{aligned} \quad (5.3)$$

Iz njiju dobimo oddaljenost in hitrost cilja:

$$\begin{aligned} R &= \frac{(f_a + f_b)T_m c}{8\Delta f} \\ v_r &= \frac{(f_b - f_a)c}{4f_0} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Pri tem radarju pa lahko neposredno določimo smer radialne hitrosti cilja, kadar iz enačbe (5.4) dobimo pozitivno hitrost, se cilj približuje radarju, negativna hitrost pa pomeni oddaljevanje. V postopku je nekaj pasti, ki jih zaradi enostavnosti nismo omenjali. Očitno meja med področjema a in b zaradi zakasnjene sprejemanega signala ni čisto natančno določena, elektronika procesiranja mora to pač upoštevati. Tudi nismo pri določanju Dopplerjeve frekvence upoštevali, da se frekvenca oddajane

signala spreminja s časom. Vendar je običajno frekvenčni razmah Δf v primerjavi s frekvenco f_0 tako majhen, da tega ni treba upoštevati.

Enako kot za Dopplerjev radar velja tudi za FM radar, da je več tarč hkrati za preprosto procesiranje signala pretrd oreh. Toda če je FM radar nameščen na letalu in usmerjen proti tlem, vidi le eno veliko tarčo, Zemljo. S takim radarjem lahko torej prav enostavno merimo višino in vertikalno hitrost letala.

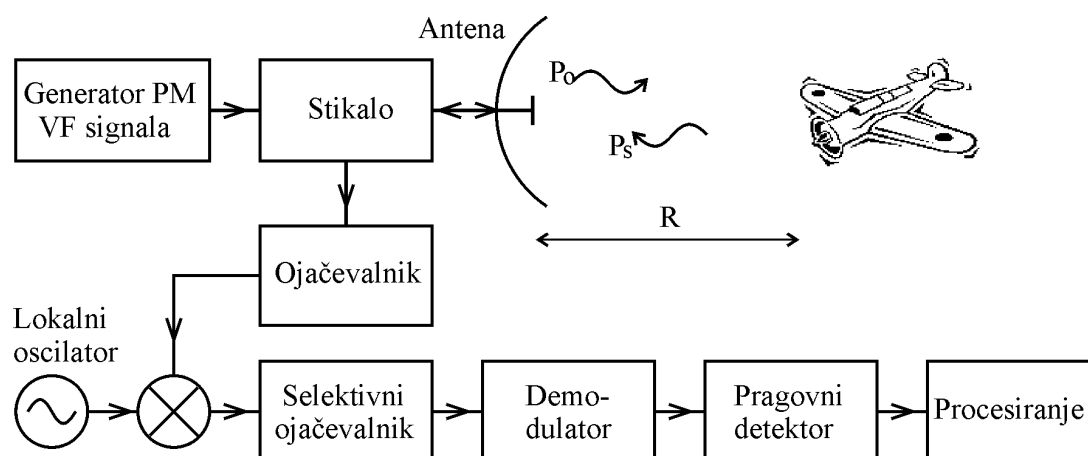
Toda FM radar je že po zasnovi bolj kompleksna naprava kot CW Dopplerjev radar, kadar ga uporabljamo v letalu za merjenje višine, pa je pilotu v veliko pomoč informacija o tem, da je nad zemljo še daljnovid. Zato si v takem radarju 'privoščimo' malo več računanja (danes je najcenejša stvar pod Soncem kakršenkoli računalnik!) in z inverzno Fourierovo transformacijo določimo še odziv v časovnem prostoru. V tem odzivu pa so posamezni različno oddaljeni cilji dobro ločljivi.

5.4 Pulzni radar

5.4.1 Zasnova pulznega radarja

Kot smo rekli že v uvodu, oddaja pulzni radar niz pulzov, pravzaprav harmoničen signal, ki je amplitudno moduliran z nizom pulzov. Pulzi si sledijo s ponavljalnim časom T_p (ali s ponavljalno frekvenco $f_p = 1/T_p$). Pulzi se odbijajo od tarče in preko iste antene zakasnjeno pridejo v sprejemnik (Sl. 5.5). Stikalo poskrbi, da je ob času oddajanja odprta pot oddajnik-antena, ob drugih časih pa pot antena-sprejemnik. Iz časa, ki preteče med oddajo in sprejemom pulza, radar določi oddaljenost cilja. Smer, v kateri se nahaja cilj, je smer, v katero je obrnjena antena radarja. Antena se med delovanjem vrti in z enim vrtljajem prečeše ves horizont.

Blokovno shemo takšnega pulznega radarja kaže spodnja slika (Sl. 5.5).



Sl. 5.5. Blokovna shema konvencionalnega pulznega radarja

Gostota moči na mestu tarče je

$$S = P_o \frac{G_o}{4\pi R^2}$$

Razpoložljiva moč na sprejemniku je (če sta sprejemnik in oddajnik na istem mestu):

$$P_s = \frac{A_s S \sigma}{4\pi R^2} = P_o \frac{A_s G_o \sigma}{(4\pi R^2)^2} = P_o \frac{G_s G_o \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Če za oddajo in sprejem uporabljamo isto anteno, se enačba še malo poenostavi

$$P_s = P_o \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5.5)$$

Vidimo, da sprejemana moč pada s četrto potenco razdalje. Če želimo podvojiti močnostni doseg radarja, moramo moč oddajnika povečati za faktor šestnajst, če ostanejo vsi drugi parametri

nespremenjeni. Zato radarji za velike dosege običajno potrebujejo zelo velike moči! Seveda pa enačba 'deluje' tudi v drugo smer, če smo zadovoljni recimo z desetino močnostnega dosega, lahko moč radarja zmanjšamo za faktor desettisoč! Napišimo enačbo še malo drugače:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_o G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{s\min} (4\pi)^3}}.$$

To enačbo imenujemo radarska enačba v enostavni obliki. Z njo dobimo osnovno oceno, kolikšen je močnostni doseg radarja.

Poglejmo si zgled, kako deluje radarska enačba.

Zgled 9 Razdalja, na kateri radar odkrije 'nevidno' letalo

Naj radar dolgega dosega odkrije dobro vidno letalo z odmevno površino 200 m² (denimo bombnik B-52 z zelo veliko odmevno površino) na razdalji 400 km. Recimo, da uspešne sodobne metode zmanjšajo odmevno površino na 0,02 m² (ocena za 'nevidno' letalo B-2). Radar bo odkril 'nevidno' letalo na razdalji:

$$R_2 = R_1 \sqrt[4]{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}} = 400 \cdot 0,1 = 40 \text{ km}.$$

Kakor je torej radarska enačba zaradi četrtega korena 'neprijazna' za doseganje velikih močnostnih dosegov radarja, je po drugi strani 'prijazna' do dosega radarjev z majhno močjo ali do vidnosti majhnih ciljev (kar je v osnovi isto).

Radar določi oddaljenost do cilja tako, da izmeri čas, ki je potekel od oddaje do sprejema pulza. Ta čas je očitno potreboval pulz za pot od antene do tarče in nazaj. Ker poznamo hitrost radijskih valov, lahko določimo oddaljenost tarče, ki je

$$R = \frac{cT}{2}.$$

Kadar se v snopu radarjeve antene znajdetta dve letali, bosta v sprejemnik prispela dva odbita pulza in sprejemnik ju bo prepoznal kot dva cilja. Vendar ne vedno: kadar sta ta dva cilja preblizu skupaj, ju radar zlije v en cilj (podobno kot oko, mikroskop ali televizijski sistem). Ločljivost radarja je najmanjša razdalja med dvema ciljema, ki ju je radar še sposoben zaznati kot dva različna cilja. Ločljivost po oddaljenosti od radarja je podana s širino pulza. Ko sta dva cilja v isti smeri po oddaljenosti od radarja med sabo bližja od

$$\Delta R = \frac{c\tau_p}{2}$$

se pulza, odbita od obeh ciljev zlijeta v en pulz, za radar pa to seveda pomeni en sam cilj. ΔR iz prejšnje enačbe torej pomeni **radialno ločljivost radarja**.

Smer, v kateri se tarča nahaja, je smer, v katero je obrnjen glavni snop antene. Za natančno določitev smeri mora biti glavni snop radarske antene čim ožji. **Kotno ločljivost radarja** torej določa širina glavnega snopa antene.



Sl. 5.6 Tipična radarska antena

5.4.2 Pulzni Dopplerjev radar

Trditev iz uvoda, da so največ uporabljani pulzni radarji, je le del resnice. V prejšnjem poglavju smo opisali pravzaprav le zasnovo pulznega radarja.

Pri pulznem radarju predstavlja velik problem odboj od velikih mirujočih ciljev, ki so za povrh lahko še v bližini radarja, recimo hribi. Ti odboji lahko povsem prekrijejo odboj od letala, radar pa jih lahko sprejema celo preko stranskih snopov anten. Ti odboji so motilni pojav, saj so radarji na letališčih namenjeni odkrivanju letal in ne okoliških hribov. Te motilne pojave lahko zelo učinkovito odstranimo iz odziva tako, da izkoristimo Dopplerjev pojav. Odbitemu signalu od premikajoče tarče se namreč frekvenca spremeni. Če torej iz odziva s frekvenčnim sitom odstranimo tisti del odziva, ki ima po mešanju z oddanim signalom frekvenco enako nič, smo odstranili mirujoče cilje. Takemu radarju rečemo radar z dušenjem mirujočih ciljev in je nekakšen Dopplerjev pulzni radar, čeprav še ne čisto 'pravi'. Pravi pulzni Dopplerjev radar določa tudi Dopplerjevo frekvenco in s tem hitrost tarče.

Velika večina današnjih pulznih radarjev torej ne meri le časa od oddaje do sprejema odboja, temveč določi tudi Dopplerjevo frekvenco odbitega signala in iz tega določi tudi radialno hitrost cilja.

Zadeva je iz dveh razlogov bolj zapletena kot pri Dopplerjevem CW radraju.

Dopplerjevo frekvenco se določi v sprejemniku z mešanjem oddanega in sprejetega signala, razlika frekvenc je ravno Dopplerjeva frekvenca. Vendar se v resnici signal oddajnika meša z zakasnjanim odbitim signalom. Če se spremeni frekvenca oddajnika v času, ki ga signal porabi za pot od oddajnika do cilja in nazaj, bo ta sprememba vnesla pogrešek pri določanju Dopplerjeve frekvence. Pri

Dopplerjevem CW radarju to ni bilo tako zelo pomembno, ker imajo ti radarji praviloma majhen domet in so zakasnitve zelo majhne. Pulzni Dopplerjevi radarji pa so radarji dolgega dometa, zakasnitve odbojev so praviloma velike, to pa zahteva veliko stabilnost oddanega signala. Lokalni oscilator za mešanje s sprejetim signalom mora tudi neprestano delovati, saj lahko pride odboj v sprejemnik kadarkoli. Praviloma imajo torej ti radarji stabilen oscilator, ojačevalnik in puzni modulator.

V pulznem Dopplerjevem radarju ni signal Dopplerjeve frekvence za merjenje na razpolago ves čas, tako kot v Dopplerjevem CW radarju, temveč le v časih, ko prispe pulz odbitega signala v sprejemnik. Signal je torej vzorčen s ponavljalno frekvenco radarjevih pulzov. Zato se signal obdeluje kot vzorčen signal in ti radarji imajo zato tudi kvadraturni demodulator (glej 5.2). Ena izmed posledic vzorčenega signala je tudi, da je največja (enoveljavno) določljiva Dopplerjeva frekvenca enaka polovični ponavljalni frekvenci (Nyquistov teorem).

Pomanjkljivost radarja z dušenjem mirujočih ciljev pa je, da ne 'vidi' počasnih ciljev (recimo balonov ali jadralnih letal), pa tudi hitroletečih ciljev, ki letijo tangencialno na smer radarskega valovanja.

5.5 Primerjava pulznega in frekvenčno moduliranega radarja

Pokazati se da, da je radialna ločljivost pulznega in frekvenčno moduliranega radarja odvisne le od pasovne širine radarskega signala. Pri FM radarju določa pasovno širino B frekvenčni razmah modulacije, za radar iz poglavja 5.3 velja

$$B = \Delta f .$$

Pri pulznem radarju je pasovna širina določena s trajanjem pulzov

$$B = \frac{1}{\tau_p}$$

Oddaljenost cilja je najlažje določiti iz zakasnitve odbitega signala. To zakasnitev (odziv na impulz) merimo s pulznim radarjem neposredno. Pri FM radarju pa lahko iz spektra odbitega signala z diskretno Fourierovo transformacijo določimo odziv na impulz v časovnem prostoru in iz tega določimo lego cilja. Glede na zmogljivost in cenenost današnjega elektronskega računanja ta postopek ne predstavlja posebne težave ali stroškov.

S tega stališča sta torej pulzni radar in FM radar enakovredna.

Kljub temu pa se uporabljajo oboji radarji, odvisno od okoliščin in zahtev. Naštejmo jih nekaj.

Monostatični radarji praviloma uporabljajo eno anteno za oddajo in sprejem. Pri pulznem radarju je ločitev med oddajo in sprejemom enostavna, zadošča stikalo, ki pri oddajanju stakne na anteno oddajnik, sicer pa je na anteno priključen sprejemnik. Imamo torej nekakšen časovni multipleks. Pri FM radarju to ni mogoče, saj mora radar neprestano oddajati in sprejemati, kar je lahko povezano s

težavami, saj so oddajne moči mnogo večje od sprejemanih. Vendar je pulzni radar med oddajanjem 'slep', zato ne vidi ciljev. Te pomanjkljivosti FM radar nima, saj neprestano oddaja in sprejema.

Tudi oddajnik za pulzni radar je povsem drugačen (velika moč v kratkih pulzih) kot oddajnik za FM radar (razmeroma majhna kontinuirna moč). Za enak doseg sicer oba potrebujeta enako povprečno moč, na vprašanje, katerega je lažje ali ceneje narediti, pa ni enoznačnega odgovora.

Za kateri radar se odločiti torej navadno odloča tehnologija ki jo imamo na razpolago, ta pa se s časom spreminja.

5.6 Radar s sintetično odprtino

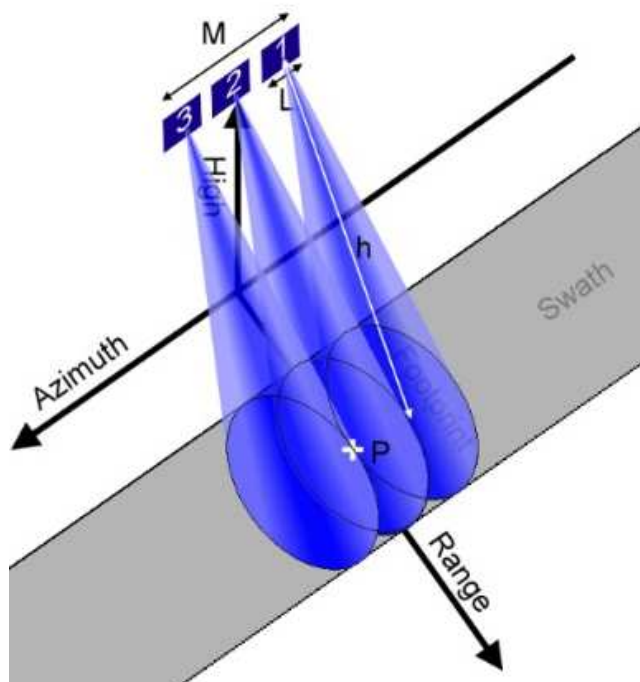
Za veliko kotno ločljivost potrebuje radar veliko anteno (Babica, zakaj imaš tako velike oči? Da te bolje vidim!). To je naravni zakon in se ga na noben način ne da prekršiti. Seveda pa človeška iznajdljivost ne pozna meja in če zakona ne moremo kršiti, ga lahko nekako prelisičimo. Ni namreč rečeno, da mora biti velika antena en sam element. Tako znamo narediti veliko anteno tako, da jo sestavimo iz mnogo majhnih anten, razporejenih po veliki površini¹. Tako je antena velika za elektromagnetno valovanje, čeprav je sestavljena iz mnogih majhnih anten. Takim antenam rečemo antenske skupine. Mimogrede lahko pri tem z različnim vzbujanjem različnih posameznih anten skupine vplivamo tudi na smerni diagram skupine, to so antene z elektronskim odklanjanjem snopa.

Naravo pa lahko prelisičimo še na en način. Radarsko anteno lahko med oddajanjem premikamo in si beležimo sprejete odbite signale, po amplitudi in fazi. Nato kasneje sestavimo celoten signal, tako kot ga pri antenski skupini iz prejšnjega poglavja sestavljamo sproti. Če se cilj med našim početjem ne premika, ni med enim in drugim načinom nobene razlike. Umetno smo torej s premikanjem antene in sintezo sprejetih signalov realizirali večjo dimenzijo antene v smeri premikanja antene, ali, drugače povedano, dobili smo anteno s sintetično odprtino in torej radar s sintetično odprtino.

Če se cilj med 'opazovanjem' premika, bo slika seveda zabrisana ali premaknjena, vendar lahko to 'popravimo', če poznamo vektor hitrosti cilja.

Najbolj pripraven mehanizem za premikanje antene (in radarja) je antena, nameščena na letalo ali satelit. V vzdolžni smeri premikanja dobi ta radar ločljivost s premikanjem antene in sintezo signalov. V prečni smeri se letalo seveda ne more premikati, zato v tej smeri prelisičimo naravo na drugačen način. Kotna ločljivost radarja je sicer določena z dimenzijami antene, radialna ločljivost pa je določena s pasovno širino radarja (5.5). Zato pomanjkanje prečene dimenzije antene nadomestimo s tem, da radar 'gleda' bočno in je zato za ločljivost odgovorna radialna in ne kotna ločljivost.

¹ Površini, ki jo predstavlja antena (ali antenska skupina) rečemo antenska odprtina.



Sl. 5.7 Delovanje radarja s sintetično odprtino

Razmere prikazuje zgornja slika, smer premikanja (in ločljivost v tej smeri) je v izrazoslovju radarjev s sintetično odprtino označena z *azimuth*, ločljivost v prečni smeri pa z *range*.

Za konec tega kratkega opisa povejmo še, da se pod pojmom radar s sintetično odprtino skrivajo različni sistemi. Zato smo v nekaj stavkih opisali zgolj osnove delovanja takih naprav.

5.7 Sekundarni radar

Iz radarske enačbe (5.5) sledi, da moč signala radarskega sprejemnika pada s četrto potenco oddaljenosti. To pomeni, da je za velik doomet radarja potrebna zelo velika oddajna moč. Še ena pomanjkljivost radarja je tudi, da iz sprejetega odbitega signala ne moremo izluščiti nobene informacije o cilju (razen seveda o njegovi oddaljenosti in radialni hitrosti).

Obe pomanjkljivosti uspešno odpravlja naprava, ki ji rečemo sekundarni radar. Sekundarni radar pravzaprav ni avtonomna naprava, kakršne so vse radarske naprave, ki smo jih spoznali doslej, temveč je sistem za določanje položaja.

Princip delovanja sekundarnega radarja je naslednji: oddajnik odda pulz, ki ga sprejemnik na letalu sprejme, ojači, mu doda različne informacije o sebi, in pošlje nazaj. Ker sta in oddajnik in prejemnik tako v letalu kot tudi v sekundarnem radarju, bomo napravi na zemlji rekli povpraševalnik, napravi v letalu pa odzivnik. Lahko bi tudi rekli, da je sekundarni radar aktiven sistem, medtem ko za običajne radarje rečemo tudi, da so pasivni (čeprav ni pasiven radar, temveč tarča!). Povpraševalnik določi oddaljenost cilja iz zakasnitve odziva, smer cilja pa določi iz znane smeri (azimuta) oddajno-sprejemne

antene v času prispetja odziva. Oboje je očitno enako kot pri ostalih radarjih, vendar se v določanju skriva nekaj pasti, na katere bomo opozorili v nadaljnjem tekstu.

Sprejemana moč sekundarnega radarja pada z drugo potenco razdalje, saj gre signal le od radarja do sprejemnika na letalu (in nato 'ojačan' odziv po isti poti nazaj). Tipične oddajne moči sekundarnega radarja so zato mnogo manjše kot moči 'pravega' radarja¹. Prav tako dobi sekundarni radar v odgovoru na povpraševanje informacije o identiteti cilja, o njegovi višini in še o marsičem koristnem, vendar se v to ne bomo spuščali, saj je s tehnične plati trivialno.

Sistem sekundarnega radarja, ki bi dopuščal različne frekvence delovanja in različne ponavljalne frekvence pulzov, bi bil mnogo preveč zapleten, da bi bil praktično uporaben, še posebej če pomislimo na to, da segajo začetki sistema v čas druge svetovne vojne², ko je bila vsa elektronika analogna. Zato deluje sistem na standardiziranih frekvencah. Zveza radar-letalo deluje na frekvenci 1030 MHz, zveza letalo-radar pa na frekvenci 1090 MHz. Tako vsa letala poslušajo povpraševanje, ne slišijo pa sosednjih letal, ki odgovarjajo na povpraševanje.

Poseben problem pri delovanju sekundarnega radarja predstavlja določitev azimuta cilja in sicer zato, ker lahko cilj odgovarja tudi na povpraševanje, ki ga prejme od stranskega snopa oddajne antene radar pa ta (ojačen!) odgovor tudi sprejme s stranskim snopom. Pri običajnem radarju to ni tako hud problem, saj gre signal skozi stranski snop pri oddaji in sprejemu in je učinkovito dušenje stranskih snopov zato enako kvadratu dušenja stranskih snopov³. Pri sekundarnem radarju je dušenje le v eni smeri, na sprejemu, saj so odzivi letala enaki na majhne in velike signale, če se le odzivnik odloči, da bo na povpraševanje odgovoril.

Rešitev tega problema je naslednja. Povpraševalnik oddaja z dvema antenama, eno vrtljivo usmerjeno, enako kot običajni radar, in drugo vsesmerno. V zaporedju prvih treh povpraševalnih impulzov ima drugi pulz vlogo sodnika o tem, ali je povpraševanje, ki ga sprejem odzivnik, poslano preko glavnega ali stranskega snopa vrtljive antene. Vse pulze povpraševalnik oddaja preko vrtljive antene, razen drugega. Drugi pulz je oddan preko vsesmerne antene in sicer s takšno močjo, da je gostota moči v daljnem polju vmes med močjo v glavnem snopu in močjo v stranskem snopu. Če je

¹ Sekundarni radar pravzaprav ni radar, kot smo že omenili, temveč sistem za določanje položaja aktivnega odzivnika. Radar v osnovnem pomenu besede je avtonomna naprava, ki brez 'pomočnikov' zgolj na podlagi odbitega signala določa parametre (hitrost, oddaljenost) cilja.

² Predhodnik sekundarnega radarja je bil sistem IFF (*identification friend or foe*, IFF), ki so ga britanci uporabljali, da so prijateljska letala ločili od sovražnikovih.

³ Če je dušenje stranskega snopa 20 dB, je dušenje signala, oddanega in sprejetega preko tega stranskega snopa, 40 dB

torej drugi pulz večji od prvega in tretjega, je povpraševanje sprejeto preko stranskega snopa oddajne usmerjene vrtljive antene in odzivnik nanj ne odgovarja, Če pa je drugi pulz manjši od prvega in tretjega, je povpraševanje 'pravo' in odzivnik nanj odgovori.

Strnimo za konec te kratke razlage sekundarnega radarja njegove prednosti in pomanjkljivosti pred običajnim pulznim radarjem.

Prednosti so: Sekundarni radar deluje z mnogo manjšo močjo kot običajni pulzni radar. Sekundarni radar iz odziva cilja razbere različne podatke o cilju: predvsem njegovo višino in identifikacijo. Tak radar torej določa tridimenzionalni položaj ciljev, kar je v okolici letališč zelo pomembno. Sekundarni radar odkriva tudi počasne ali tangencialno leteče cilje.

Slabosti pa so: Predvsem ena je očitna: letalo, ki nima odzivnika, je za sekundarni radar nevidno. Glede na nizko nosilno frekvenco in (običajno) razmeroma majhne antene sekundarnega radarja ima tak radar praviloma slabšo ločljivost po azimutu.

Sklep: na letališčih imajo za kontrolo zračnega prometa okrog letališča praviloma oba radarja, pulzni Dopplerjev radar in sekundarni radar, ki se med seboj po komplementarnih lastnostih lepo doplnjujeta.

Sistem sekundarnega radarja je v zasnovi zelo podoben sistemu za določanje oddaljenosti DME, opisanem v poglavju 7.2, le da je pri sistemu DME povpraševalnik na letalu in odzivnik na svetilniku in da sistem DME določa le oddaljenost letala do svetilnika, azimuta letala pa ne.

5.8 Literatura

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, International Edition 2001
- [2] A. Ludloff, *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [3] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 1990
- [4] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

6. Naprave in sistemi za določanje smeri

6.1 Uvod

V zgodovini so nastajali in se izpopolnjevali in razvijali različni sistemi za določanje smeri. Kot pripomoček ladijskemu obalnemu prometu je nastal denimo sistem ladijskih svetilnikov. Ta sistem omogoča, skupaj z uporabo kompasa, določitev položajnih premic azimuta posameznih svetilnikov in s tem določitev položaja po metodi iz poglavja 4.2. V zgodovini letalstva je na podoben način nastajal sistem radijskih svetilnikov.

Za merjenje azimutov lahko uporabljamo ali usmerjene antene na sprejemu ali primerno kodiran signal, ki ga oddaja svetilnik. Signali svetilnikov bodo zato lahko nemodulirani ali pa modulirani na različne načine. Tudi uporabljene frekvence bodo raznolike, praviloma bodo, kakor je splošno pravilo telekomunikacij, novejši sistemi delovali na višjih frekvencah.

6.2 Neusmerjeni svetilnik (NDB)

Sistem neusmerjenih svetilnikov za določanje azimuta sestavlja skupina radijskih oddajnikov z neusmerjenimi antenami. Na letalu se nahaja sprejemnik, ki s pomočjo usmerjene antene določi azimut svetilnika (radijski kompas). Lahko bi torej rekli, da pri tem sistemu **določamo azimut na sprejemni strani**. Položaj določimo po metodi dveh (ali večih) azimutov. Za svetilnik lahko služi katerikoli radijski oddajnik, moduliran ali nemoduliran. Znana je zgodba o napadu na Pearl Harbour, s katerim je Japonska stopila v vojno z Združenimi državami v letu 1941. Napadalna letala so se takrat ravnala po srednjevalovnem oddajniku radia, ki je oddajal zabavni program za ameriške vojake. Takemu letu rečemo radialni let, saj je svetilnik obenem cilj poti, zato lahko letalo leti v smeri (radialno ali po 'radialu', kot rečejo v žargonu) proti svetilniku in njegovega položaja pri tem letu pravzaprav ni treba poznati, razen zato da vemo, kako dolgo bo pot še trajala.

Seveda pa sistem namenskih svetilnikov mnogo bolj učinkovito služi navigaciji kot naključno posejani oddajniki, ki služijo radiodifuziji. Zato je civilno letalstvo s svojim sistemom svetilnikov na ključnih točkah letalskih poti pokrilo večino ozemlja, na katerem se odvija gost letalski promet (Evropa, Severna Amerika).

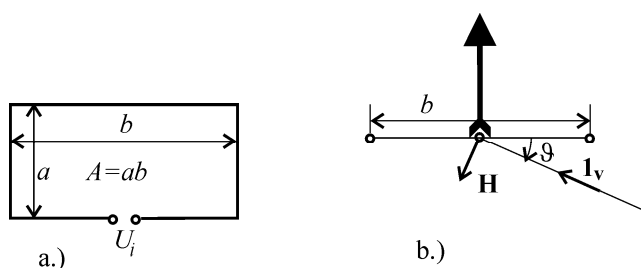
Neusmerjeni svetilnik (*nondirectional radio beacon*, NDB) oddaja signal na srednjevalovnem področju, v Evropi na frekvencah od 255 do 415 kHz. Antena ima v horizontalni ravnini krožni sevalni diagram, valovanje je vertikalno polarizirano. Signal je običajno nemoduliran, le periodično (recimo dvakrat na minuto) oddaja razpoznavni znak v Morsejevi abecedi. S tem znakom je lahko pulzno

moduliran neposredno visokofrekvenčni nosilni signal, lahko pa je z razpoznavnim znakom pulzno moduliran pomožni nosilec s frekvenco 1020 Hz, nosilni signal pa je amplitudno moduliran s tem pomožnim nosilcem. Moči oddajnikov so od 10 do 250 W, **doseg** znaša od 20 do preko 300 km.

Svetilniki so nameščeni na ključne točke letalskega prometa, torej v neposredni bližini letališč, pomembnih zavojev ali križišč letalskih koridorjev in s tem razen navigacije omogočajo tudi radialne lete.

6.3 Okvirna antena

Za določanje smeri neusmerjenega svetilnika se uporablja okvirna antena. Okvirna antena je zanka (pravzaprav tuljava z N ovoji, da je inducirana napetost večja) v vertikalni ravnini. (Sl. 6.1.a)



Sl. 6.1 Okvirna antena

Elektromagnetni val s svojim magnetnim poljem v okvirni anteni inducira napetost

$$U_i = N \frac{d\Phi}{dt}$$

pri čemer je N število ovojev, Φ pa magnetni pretok skozi okvirno anteno (zanko).

Poglejmo si še prerez okvirne antene v horizontalni ravnini (Sl. 6.1.b). Z vektorjem $\mathbf{1}_v$ je označena smer širjenja TEM vala. Ker smo že rekli, je TEM val polariziran vertikalno, torej leži vektor električne poljske jakosti \mathbf{E} v vertikalni ravnini (pravokotno na ravnino slike), vektor magnetne poljske jakosti \mathbf{H} pa v horizontalni ravnini, pravokotno na smer širjenja.

Če sta meri a in b okvirne antene **majhni v primerjavi z valovno dolžino**¹, velja

$$\Phi = BA \cos \vartheta = \mu_0 HA \cos \vartheta$$

pri čemer so Φ , B in H kompleksorji (kazalci). Odvod po času je za kazalce enak $j\omega$, torej velja

$$U_i = j\omega N \mu_0 HA \cos \vartheta$$

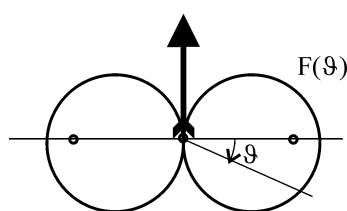
¹ To je zelo važen pogoj! Velikost anten je sicer v splošnem primerljiva z valovno dolžino signal

Če upoštevamo še, da za TEM val električno in magnetno poljsko jakost povezuje valovna impedanca prostora $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, da se val širi s hitrostjo $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ in da je frekvenca valovanja povezana z valovno dolžino z enačbo $c = f\lambda$, lahko enačbo napišemo v obliki, v kakršni se navadno pojavlja v knjigah:

$$U_i = j \frac{2\pi NAE}{\lambda} \cos \vartheta \quad (6.1)$$

Smerni diagram okvirne antene v horizontalni ravnini je očitno

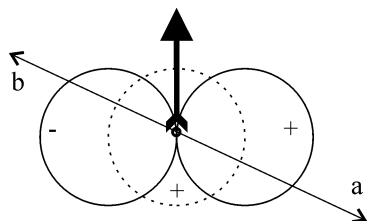
$$F(\vartheta) = |\cos \vartheta| \quad (\text{Sl. 6.3}).$$



Sl. 6.2 Smerni diagram okvirne antene

Kako s takšno anteno določiti smer, iz katere prihaja val? Zelo enostavno, anteno vrtimo tako dolgo, da je signal najmanjši. Takrat je antena s kazalčkom (ki je v slikah okvirne antene narisana s krepko puščico) obrnjena v smer oddajnika. Na minimum signala določamo smer zato, ker je v smernem diagramu veliko bolj oster kot maksimum. Kdor je bil v mladih letih radioamater, se gotovo spominja lova na lisico!

Vendar pozornemu bralcu najbrž ni ušlo, da pri takem določanju smeri lahko pravo smer zgrešimo za 180 stopinj, kajti smerni diagram ima dva minimuma, ki si stojita nasproti. Za določitev prave smeri bi morali meriti tudi fazo napetosti, saj je očitno, da se pri kotu $\vartheta = \pm 90^\circ$ predznak faze inducirane napetosti spremeni (enačba (6.1)). Vendar moramo za merjenje faze imeti na razpolago še referenčni signal, tega pa dobimo iz neusmerjene antene¹ (Sl. 6.3).



Sl. 6.3 Določanje smeri z okvirno anteno s pomočjo vsesmerne antene

¹ Antena, ki ima v vodoravni ravnini krožni smerni diagram za vertikalno polarizacijo električnega polja je navpično postavljen (elementarni) električni dipol.

Smerni diagram vsesmerne antene je na sliki narisano črtkano. Napetost iz vsesmerne antene je treba še zakasniti za 90 stopinj (j v enačbi (6.1)), pa bo za kote ϑ med +90 in -90 stopinj v fazi, za ostale kote pa v protifazi z napetostjo okvirne antene (v sliki označeno s + in - v smernem diagramu okvirne antene, ki je narisano s krepko črto). V sprejemniku napetosti iz okvirne in vsesmerne antene menjajemo periodično med seboj seštevamo in odštevamo. Če je vsota večja od razlike, je smer oddajnika desno od smeri kazalčka (na sliki recimo smer a), če je razlika večja od vsote (na sliki recimo smer b), je smer oddajnika levo od kazalčka. V prvem primeru poskrbi servomotor, da se okvirna antena zavrti v desno, v drugem, da se zavrti v levo. Obakrat motor vrtil anteno dokler napetosti vsote in razlike nista enaki. Takrat gleda kazalček v smer oddajnika, okvirna antena pa kaže minimum smernega diagrama v smer oddajnika, obe napetosti sta enaki zato, ker je obakrat ostala le napetost vsesmerne antene. Ko se iz kateregakoli vzroka smer oddajnika glede na smer kazalčka spremeni (denimo zaradi opravljene poti), bo opisani mehanizem njegovo smer takoj popravil v pravo smer: če se recimo odkloni v levo, je prava smer na desni, vemo pa, da servomotor v takem primeru zavrti okvirno anteno v desno. Ravnotežje je torej stabilno. Kaj pa, če se mehanizem po nesreči 'ujame' v napačno smer, v kateri sta prav tako kot v pravi vsota in razlika napetosti enaki? Če se v tem primeru iz kateregakoli vzroka kazalček z okvirno anteno odkloni v levo, je prava smer na levi in mehanizem bo okvirno anteno vrtel v levo toliko časa, da bo 'obtičal' v pravi smeri! Ravnotežje napačne smeri je torej labilno in v njem kazalček ne more obstati.

Opozorimo na koncu na zanimivo podrobnost, ki nepozornemu študentu pogosto uide. Kot smo videli, določamo z okvirno anteno smer, odkoder prihaja elektromagnetni val, torej azimut svetilnika, na sprejemni strani. Za rešitev takega problema je treba praviloma imeti na sprejemni strani usmerjeno anteno. Vemo, da mora biti usmerjena antena velika, mera za veliko pa je valovna dolžina signala. Pri radarjih določamo azimut tarče z uporabo anten, ki imajo premer mnogo večji od valovne dolžine signala. Okvirna antena pa določa azimut oddajnika, katerega signal ima valovno dolžino 1000 m! Le kako je to mogoče? Preprosto, rešitev je, kot smo videli, v tem, da z okvirno anteno iščemo minimum signala, ta pa je veliko bolj oster kot maksimum, kot je videti iz slike (Sl. 6.2). Ta princip se v tehniki pogosto uporablja.

In, opozorimo še na eno pomembno podrobnost, ki določanje smeri oddajnika z okvirno anteno loči od določanja smeri severnega tečaja z magnetnim kompasom. Ta podrobnost je seveda prav jasno razvidna iz besedila tega poglavja, vendar kot po nekakšnem čudežu vedno znova tik pred izpitom izpuhti iz glav študentov. Igla magnetnega kompasa se postavlja v smer sever jug kar sama, pravzaprav jo v pravilen položaj postavlja zemeljsko magnetno polje. Kazalček okvirne antene pa se v smer oddajnika nikakor ne postavlja sam pod vplivom valovanja iz oddajnika, temveč jo mora nekdo, ali roka ali servomotor, postaviti v pravo lego!

6.4 Križna antena z goniometrom, radijski kompas

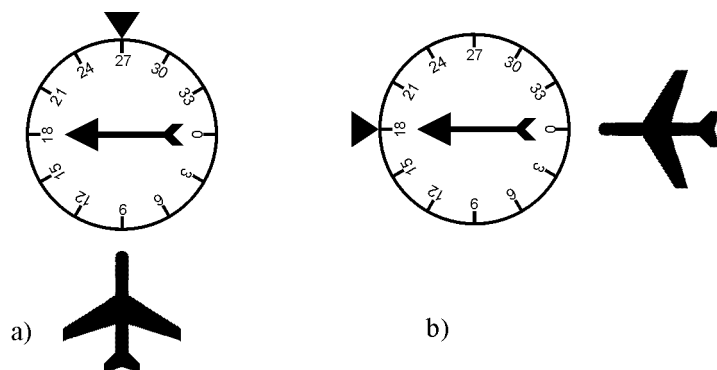
V prejšnjem poglavju smo azimut svetilnika določali s pomočjo okvirne antene, tako da smo anteno vrteli toliko časa, da je bila s kazalčkom obrnjena proti oddajniku. Seveda vrtenje zunanje antene na letalu ni najbolj priročno opravilo, zato je stvar v resnici narejena malo drugače. Kako drugače, je odvisno od stanja tehnike.

Predvsem v resnici zunaj letala ni nameščena vrtljiva okvirna antena, temveč par med seboj pravokotnih negibnih okvirnih anten, ki mu rečemo **križna antena**. Napetost, ki se inducira v prvi od njiju je sorazmerna s kosinusom vpadnega kota ϑ (enačba (6.1)), v drugi, ki je proti prvi premaknjena za 90 stopinj, pa s sinusom vpadnega kota.

Okvirni anteni križne antene sta lahko povezani z dvema pod pravim kotom nameščenima negibnima tuljavama v notranjosti letala. Inducirana napetost okvirnih anten povzroči v teh tuljavah tok, ta pa magnetno polje, ki je enako usmerjeno kot magnetno polje v križni anteni. Sedaj damo v polje teh tuljav vrtljivo okvirno anteno in z njo (in še vedno tudi s pomočjo neusmerjene antene zunaj letala) ugotavljamo smer oddajnika. Tuljavam skupno z vrtljivo okvirno anteno v letalu rečemo **goniometer**. Tako smo vrtenje okvirne antene prenesli z mraza in prepaha v notranjost letala. Navadno dodamo k temu še sistem, ki po algoritmu iz prejšnjega poglavja sam vrtil anteno goniometra v smer oddajnika, hkrati z anteno pa tudi kazalec v instrumentu v pilotski kabini. Taki napravi rečemo **radijski kompas**.

Vendar s tem zgodba še ni čisto končana. Kazalec okvirne antene (in tudi instrument v kabini) nam res kaže smer svetilnika, toda če želimo določiti azimut svetilnika, moramo vedeti še, v kateri smeri je sever in glede na to referenčno smer odčitati smer svetilnika. Referenčna smer radijskega kompasa je namreč vezana na letalo (na položaj križne antene!) in je običajno vzdolžna os letala. Poglejmo si zgled: radijski kompas kaže, da je svetilnik natančno na levi strani letala, torej v smeri 270 stopinj glede na vzdolžno os letala. Ko pilot obrne letalo proti svetilniku, kaže radijski kompas, da je smer svetilnika naravnost naprej, torej v smeri 0 stopinj glede na vzdolžno os letala, čeprav se ni spremenil ne položaj svetilnika in ne letala, le letalo se je zavrtelo. Očitno je tako delovanje pripravno za radialne lete, za določanje položaja in absolutne smeri letenja letala pa ne. Zato je radijski kompas kombiniran še z 'navadnim' kompasom (običajno je to žirokompas), ki poskrbi, da je v radijskem kompasu izhodiščna smer skale obrnjena proti severu. Če nadaljujemo s prejšnjim zgledom: Privzemimo, da je v našem primeru svetilnik natančno južno od položaja letala. Rekli smo tudi, da je svetilnik v začetku levo od letala, torej letalo leti proti zahodu. Sever je na desni, torej je izhodiščna smer radijskega kompasa obrnjena proti desni, zato kaže obenem oznaka 270 stopinj na skali naravnost naprej, kar je očitno tudi smer letenja. Kazalček radijskega kompasa kaže v levo, torej na kot 180 stopinj, kar pomeni jug. Pilot torej ve, da je sever na desni, da je svetilnik na levi (in na jugu) in da leti v smeri 270 stopinj, to je proti zahodu (Sl. 6.4.a). Ko obrne letalo proti svetilniku, leti letalo proti jugu, sever je zadaj, torej je

izhodiščna smer nazaj, naravnost naprej pa kaže sedaj oznaka 180 stopinj. Kazalček radijskega kompasa kaže sedaj naravnost, torej na 180 stopinj. Pilot torej ve, da je sever sedaj zadaj, da je svetilnik pred njim (in še vedno na jugu) in da leti v smeri 180 stopinj, torej proti jugu (Sl. 6.4.b). V bistvu sta torej v radijskem kompasu združena običajen in radijski kompas. Običajen kompas kaže smer letenja¹, radijski pa smer radijskega svetilnika.



Sl. 6.4 Prikazovalnik radijskega kompasa pri dveh različnih smereh letenja

Povejmo še, da je za današnji čas dovolj informacij iz križne in vsesmerne antene, da lahko smer oddajnika z uporabo elektronike določimo na bolj enostaven način kakor z vrtenjem tuljavice v goniometru. Vendar se s takšno elektroniko ne bomo ukvarjali, bralec naj si jo poskusi zamisliti sam. Seveda pa je rezultate še vedno treba kombinirati s kompasom.

Na naslednji sliki je prikazan prikazovalnik radijskega kompasa. Rdeč kazalček je del ohišja in kaže vzdolžno smer letala, številčnica je pravzaprav magnetni kompas, je vrtljiva in kaže s smerjo N (0°) na sever, dva kazalca kažeta na dva izbrana svetilnika, ki sta lahko NDB, lahko pa tudi VOR, ki ga bomo spoznali v naslednjih poglavjih. Iz slike ja razvidno, da je smer letenja 323° , smer prvega svetilnika 290° in smer drugega svetilnika 13° .

¹ Kompas na ladjah in letalih so malo drugačni od kompasov, ki se uporabljajo v pohodništvu. V pohodniškem kompasu se v zemeljskem magnetnem polju vrti igla (in kaže vedno proti severu), številčnico pa obrača pohodnik, kakor se mu zdi prav in prikladno. V mornariškem kompasu pa iglo nadomešča številčnica, ki vedno kaže z izhodiščem proti severu. Ohišje kompasa je pritrjeno na ladjo (ali letalo), tako da kazalček, ki je pritrjen na ohišje, gleda v smeri osi letala in kaže smer gibanja (kurz). To je lepo vidno tudi na sliki (Sl. 6.4), kjer je številčnica magnetni kompas, ki kaže na sliki a) smer letenja zahod in v b) smer letenja jug, medtem ko kazalec radijskega kompasa obakrat kaže, da je azimut svetilnika na jugu.



Sl. 6.5 Prikazovalnik radijskega kompasa

Doseg in natančnost sistema neusmerjenih svetilnikov

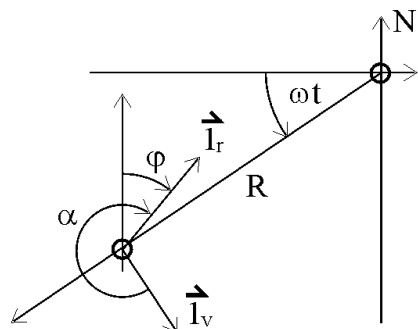
Kot smo povedali že v poglavju o neusmerjenih svetilnikih, je doseg takih svetilnikov nekaj sto km. Natančnost določanja smeri pa je v okviru nekaj stopinj. Nanjo vplivajo pri večjih oddaljenostih od svetilnikov predvsem prostorski valovi (3.4), pa tudi ostali odbiti valovi. Na sprejemni strani pa na točnost določanja smeri najbolj vpliva (z vplivom na smerni diagram) letalo s svojimi kovinskimi površinami. Ker pa se te površine ne spreminjajo, se lahko ti pogoški odstranijo s kompenzatorjem, ki ga umerimo na konkretno letalo.

Kot smo videli v poglavju 4.2, je pogrešek določanja položaja po metodi dveh azimutov razmeroma velik, zato se ta metoda za določanje položaja ne uporablja pogosto. Se pa sistem neusmerjenih svetilnikov in radijskega kompasa uporablja za radialne lete, torej za lete proti svetilniku. Zato so svetilniki praviloma na značilnih točkah letalskih koridorjev.

6.5 Dopplerjev goniometer

Smer sprejemanega elektromagnetnega vala lahko ugotovimo tudi na naslednji način.

Naj sprejemna antena na primerni razdalji od osi kroži z določeno krožno frekvenco. Ker se natena zaradi kroženja premika, se frekvenca sprejemanega vala zaradi Dopplerjevega pojava spremeni. Razmere prikazuje slika (Sl. 6.6).



Sl. 6.6 Krožeča antena Dopplerjevega goniometra

Naj kaže vektor $\mathbf{1}_r$ smer, iz katere se širi elektromagnetni val frekvence f_0 , vektor \mathbf{v} pa je vektor hitrosti krožeče antene. Frekvenco sprejemanega signala podaja naslednja enačba:

$$f = f_0 + f_0 \frac{\mathbf{v}}{c} \mathbf{1}_r = f_0 + f_0 \frac{v}{c} \mathbf{1}_v \mathbf{1}_r$$

$$f = f_0 - \frac{f_0 \omega R}{c} \cos(\omega t + \varphi)$$

Iz slike je razvidno, da je kot φ azimut oddajnika. Sprejemnik torej sprejema frekvenčno moduliran signal, katerega faza je enaka azimutu oddajnika.

Frekvenčni razmah je premosorazmeren krožni hitrosti, radiju kroženja in frekvenci signala.

Za primerne frekvenčne razmahe so potrebni veliki premeri krožečih anten. Sistem se uporablja na letališčih za določanje azimuta letal na valovni dolžini signala 2 m z verikalno polarizacijo.

Zgled 10 Določi frekvenčni razmah signala Dopplerjevega goniometra

Naj bo krožna frekvenca 170 Hz, polmer antene 2,9 m in frekvenca signala 150 MHz. Dobimo

$$\Delta f = \frac{f_0 \omega R}{c} = \frac{150 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 170 \cdot 2,9}{3 \cdot 10^8} = 1550 \text{ Hz}$$

Seveda je nemogoče narediti anteno ki bi krožila na razdalji nekaj metrov od središča (vrtiljak!) s frekvenco 170 Hz. Zato sprejemno anteno predstavlja venec anten s polmerom R , ki se zaporedoma (s frekvenco 170 Hz na celoten venec) stikajo na sprejemnik.

Vse skupaj zelo spominja na oddajnik sistema DVOR, ki je opisan v poglavju 6.8.

6.6 Vrtilni svetilnik (VOR)

Za določitev azimuta neusmerjenega svetilnika potrebujemo na sprejemni strani vrtljivo usmerjeno anteno. Poglejmo si, ali bi bilo možno narediti takšen sistem, pri katerem bi določali azimut z neusmerjeno anteno, ki je ne bi bilo treba vrteti. Pri takšnem sistemu bi očitno moral svetilnik oddajati v različne smeri različen signal, saj bi le tako sprejemnik lahko določil, iz katere smeri prihaja signal. To lahko storimo na različne načine, pogledjmo si za uvod, kako bi tako deloval svetlobni svetilnik. Svetilnik bi z vrtečim se reflektorjem seval vrteč ozko usmerjen snop bele svetlobe v horizontalni ravnini, denimo z vrtilno periodo 360 sekund. Vsakič, ko bi bil ta snop usmerjen proti severu, pa bi svetilnik osvetlil okolico še z bliskom neusmerjene rdeče svetlobe. V sprejemniku bi bilo treba le izmeriti čas, ki preteče od sprejema rdeče do sprejema bele svetlobe in ta čas v sekundah bi bil kar enak azimutu sprejemnika v stopinjah glede na svetilnik. V današnji telekomunikacijski terminologiji bi rekli, da bela svetloba nosi informacijo o azimutu svetilnika, zakodirano s pulzno položajno modulacijo, rdeči blisk pa služi kot referenčni signal za sinhronizacijo ure v sprejemniku. Bela svetloba je torej

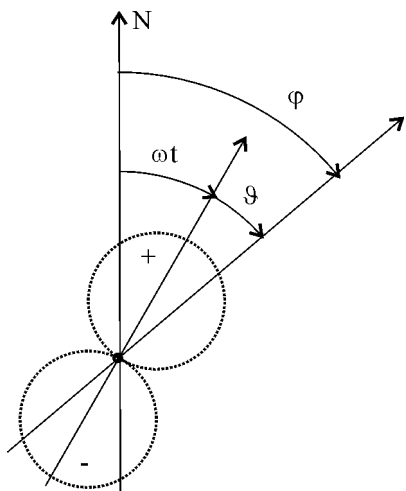
azimutni, rdeča pa referenčni signal. Za ta sistem bi lahko rekli tudi, da z njim **določamo azimut na oddajni strani**.

Poglejmo si sedaj, kako nekaj podobnega naredimo z radijskimi valovi. Oddajnik vrtilnega svetilnika VOR (*very high frequency omnidirectional radio range* – VOR) deluje na ultrakratkovalovnem področju (108-118 MHz) s horizontalno polarizacijo. Oddaja dva signala, oba frekvence $f=30$ Hz. Eden je referenčni, drugi pa azimutni. Signala se med seboj razlikujeta po tem, da je azimutni signal proti referenčnemu fazno premaknjen za azimut smeri oddajanja. Z referenčnim signalom je najprej frekvenčno moduliran pomožni signal frekvence $f_p=9960$ Hz s frekvenčnim razmahom $\Delta f=\pm 480$ Hz. S tem pomožnim frekvenčno moduliranim signalom je amplitudno moduliran nosilni signal. Z azimutnim signalom pa je s stopnjo modulacije $m=30\%$ neposredno amplitudno moduliran nosilni signal. Za prepoznavanje svetilnika je z amplitudno modulacijo s frekvenco 1020 Hz dodan še prepoznavni signal svetilnika, ki je pulzno moduliran z Morzejevimi znaki. Na enak način je dodana še amplitudna modulacija za prenos govora, ki služi za različna govorna sporočila.

Vsi potrebni modulacijski postopki za opisani oddajni signal so v telekomunikacijah splošno poznani, posebnost je le amplitudna modulacije azimutnega signala. Vsi signali razen AM signala azimutnega signala se tudi oddajajo preko vsesmerne antene.

Postopek in oddajanje azimutnega AM signala pa si bomo podrobno ogledali v nadaljnjem tekstu.

Amplitudno moduliran azimutni signal generiramo s seštevanjem polja dveh anten, ene neusmerjene in ene usmerjene vrteče se antene. Obe anteni napajamo z istim visokofrekvenčnim nosilnim signalom frekvence ω . Daljnje polje obeh anten je horizontalno polarizirano, tako pri seštevanju ni treba paziti na vektorje in lahko seštevamo kar kazalce.



Sl. 6.7 Generiranje azimutnega signala z vrtečo anteno

Naj bo referenčni signal (tisti, s katerim frekvenčno moduliramo pomožni signal) enak $\cos(\omega t)$. Vrteča antena naj se vrti sinhrono s tem signalom, torej s kotno hitrostjo ω , trenutna smer antene je

torej enaka ωt . Naj ima ta antena smerni diagram $F = \cos(\vartheta)^1$, ki je na sliki vrisan s krepko črtkano črto, predznak pa je nakazan s $+$ in $-$ (Sl. 6.7). Sever je označen z N , azimut pa s φ . Velja

$$E_v = E_{v0} F(\vartheta) = E_{v0} \cos(\vartheta)$$

$$\vartheta = \varphi - \omega t$$

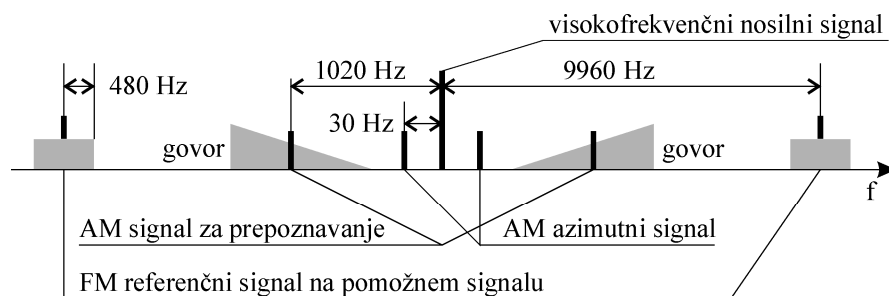
$$E_v = E_{v0} \cos(\varphi - \omega t) = E_{v0} \cos(\omega t - \varphi) \quad (6.2)$$

Za neusmerjeno anteno je polje podano kar z $E_0 = E_{00}$, saj to polje ni odvisno od smeri. Pri napajanju obeh anten poskrbimo tudi za to, da sta kazalca E_{00} in E_{v0} v fazi. Polje obeh anten skupaj bo enako

$$E = E_o + E_v = E_{00} + E_{v0} \cos(\omega t - \varphi) = E_{00} \left(1 + \frac{E_{v0}}{E_{00}} \cos(\omega t - \varphi) \right) = E_{00} (1 + m \cos(\omega t - \varphi))$$

Naš oddajnik z dvema antenama očitno oddaja amplitudno moduliran signal. Frekvenca modulacijskega signala je podana z vrtilno frekvenco antene, stopnja modulacije m pa je podana z razmerjem amplitud napajalne napetosti vrtilne in vsesmerne antene. Najvažnejša pa je faza modulacijske napetosti, ta je odvisna od smeri oddajanja in je proti fazi referenčnega signala $\cos(\omega t)$ premaknjena ravno za kot azimuta φ .

Poglejmo si sedaj še celoten spekter signala svetilnika VOR (Sl. 6.8). Zaradi preglednosti pri spektru AM moduliranega govornega signala (ki je v sliki označen z govor), ki se prenaša v frekvenčnem področju od 300 do 3000 Hz, frekvence niso označene.



Sl. 6.8 Spekter signala vrtilnega svetilnika

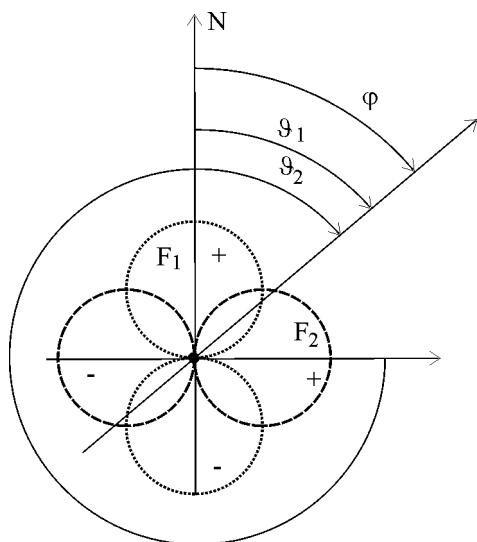
Očitno so vsi signali s frekvenčnim multipleksom z amplitudno modulacijo natovorjeni na nosilni signal.

¹ Smerni diagram običajno sicer podajamo kot absolutno vrednost funkcije porazdelitve polja. Vendar moramo v našem primeru upoštevati tudi predznak, ker bomo seštevali polja dveh anten. Kosinusni smerni diagram ima elementarni izvor. Tudi majhna (v primerjavi z valovno dolžino) zanka je elementarni magnetni izvor, njen smerni diagram smo spoznali v 6.3. V osnovi imajo pravzaprav vsi dipoli kosinusni smerni diagram.

Vrteti anteno s frekvenco 30 obrati na sekundo je nerodna stvar, zato so antene vrteli v začetkih zgodbe o vrtilnih svetilnikih. Poglejmo, kako bi lahko dobili vrtilno polje enačbe (6.2) brez vrtenja antene. V ta namen jo napišimo malo drugače:

$$\begin{aligned}
 E_v &= E_{v0} \cos(\omega t - \varphi) = E_{v0} (\cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi)) \\
 E_v &= E_{v0} \cos(\omega t) \cos(\varphi) + E_{v0} \sin(\omega t) \sin(\varphi) \\
 E_v &= E_{v0} \cos(\omega t) F_1(\varphi) + E_{v0} \sin(\omega t) F_2(\varphi) \\
 F_1(\varphi) &= \cos(\varphi), \quad F_2(\varphi) = \sin(\varphi)
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Očitno lahko dobimo vrtilno polje tudi z dvema mirujočima primerno vzbujanima antenama s primernima smernima diagramoma. Potrebna smerna diagrama anten dobimo s pomočjo dveh prekržanih anten (križne antene). Smerna diagrama teh anten sta na sliki (Sl. 6.9) označena sta z F_1 in F_2 .



Sl. 6.9 Smerna diagrama dveh prekržanih anten

Smerna diagrama obeh anten sta $F = \cos(\vartheta)$, iz slike je razvidno, da velja:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_0 \cos(\vartheta_1) = E_0 \cos(\varphi) \\
 E_2 &= E_0 \cos(\vartheta_2) = E_0 \cos(\varphi - 90^\circ) = E_0 \sin(\varphi)
 \end{aligned}$$

Potrebno vzbujanje dobimo, če priključimo na anteno 1 nosilni signal, pomnožen z referenčnim signalom $\cos(\omega t)$, na anteno 2 pa nosilni signal, pomnožen z za 90° premaknjenim referenčnim signalom $\cos(\omega t - 90^\circ) = \sin(\omega t)$ (enačbe (6.3)). Polje obeh anten je podano z:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_0 \cos(\omega t) \cos(\varphi) \\
 E_2 &= E_0 \sin(\omega t) \sin(\varphi)
 \end{aligned}$$

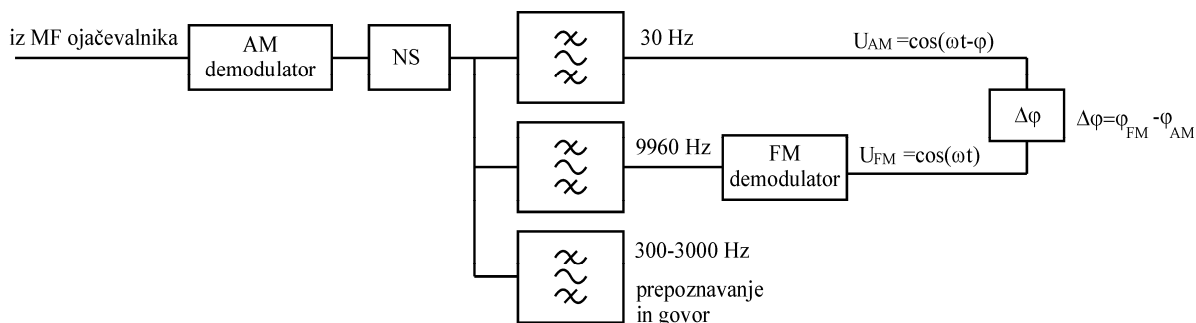
Interferenčno polje pa je

$$E_i = E_1 + E_2 = E_0 \cos(\omega t) \cos(\varphi) + E_0 \sin(\omega t) \sin(\varphi)$$

to pa je natančno takšno vrtilno polje, kot ga potrebujemo za svetilnik VOR (enačba (6.3))

6.7 Sprejemnik za VOR

Sprejemna naprava na letalu sprejema signal z neusmerjeno horizontalno polarizirano anteno. Sprejemnik je superheterodinski sprejemnik. Iz spektra oddajane signala sledi, da je treba v sprejemniku signal iz medfrekvenčnega sita voditi najprej na amplitudni demodulator. Posamezne signale dobimo nato s pomočjo pasovnih sit. Blokovna shema je na sliki (Sl. 6.10)



Sl. 6.10 Blokovna shema sprejemnika VOR

Z NS je označeno nizko sito. Izsejani signal frekvenčno moduliranega pomožnega nosilnega signala je treba še frekvenčno demodulirati, nato pa referenčni in azimutni signal vodimo v fazni detektor. Razlika faz, ki je na sliki označena z $\Delta\phi$, je enaka azimutu, ki je vtisnjen v amplitudno moduliran azimutni signal.

Instrument v letalu omogoča pilotu, da nastavi zeleni kurz (OBS, *omni bearing selector*), instrument pa prikazuje ali je levo ali desno o tega kurza (CDI, *course deviation indicator*), prav tako pa tudi, ali se na tem kurzu približuje (TO) ali oddaljuje (FROM) od svetilnika

Doseg in natančnost sistema VOR

Doseg sistema vrtilnih svetilnikov VOR je omejen z optično vidljivostjo, torej predvsem z radijskim horizontom. Za letala na višini preko 6000 m znaša nekaj sto kilometrov, za letala na višini pod 1000 m pa le nekaj deset kilometrov.

Zgled 11 Višina letala in doseg sistema VOR

Določi na kakšni višini mora leteti letalo, da bo 'videlo' svetilnik VOR z oddaljenosti 300 km?

Če enačbo za geometrijski horizont (pri katerem ne upoštevamo loma troposfere) (3.3) malo obrnemo, dobimo

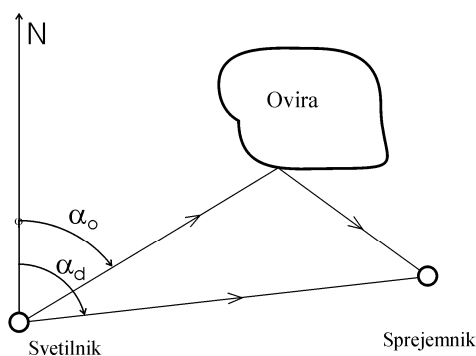
$$H = \frac{D^2}{2R_z} = \frac{300^2}{2 \cdot 6370} = 7,01 \text{ km}$$

Višino letal se v civilnem letalstvu po vsem svetu podaja v čevljih. Da ne prihaja do zmede, vsi piloti in nadzorniki letenja to pravilo vedno in povsod dosledno upoštevajo. Piloti o višini letala

razmišljajo v čevljih in ne v metrih, kajti za preračunavanje v kritičnih trenutkih ni časa in zmeda bi lahko pripeljala (in tudi že je pripeljala) do nesreče. Podajmo zato to višino tudi v čevljih, torej:

Letalo mora leteti na višini 23200 čevljev, da bo videlo svetilnik VOR na razdalji 300 km (kar je 162 milj¹, ki se v letalskem prometu uporabljajo za merjenje razdalj)

Pogreški azimuta so v razredu nekaj stopinj, največji pogrešek povzročajo odbiti valovi, ki prinašajo informacijo o napačnem azimutu. Odbiti val je namreč amplitudno moduliran z azimutnim signalom, ki pripada azimutu vala, oddanega v smeri ovira, od katere se je val odbil in ne azimutu vala, oddanega v smeri letala.



Sl. 6.11 Razmere pri motnji signala VOR

Razmere ilustrira slika (Sl. 6.11). Sprejemnik sprejema interferenčni val, ki ga sestavljata direktni in odbiti val. Odbiti val je amplitudno moduliran z napačno fazo (faza signala je kar azimut!) α_o , zato 'pokvari' fazo amplitudne modulacije direktnega val v smeri α_d . Oglejmo si to na sledečem zgledu

Zgled 12 Pogrešek sistema VOR zaradi odbitega vala

Določimo največji pogrešek, ki ga lahko povzroči odbiti val, katerega moč je za 20 dB manjša od moči direktnega vala. Pri vsoti dveh amplitudno moduliranih signalov, ki sta modulirana s signaloma iste frekvence in različne faze, gre za preprosto seštevanje kazalcev. Razmerje -20 dB je za napetosti enako 0,1. Očitno je največji vpliv na fazo rezultante takrat, kadar sta kazalca med seboj pravokotna, takrat je pogrešek faze enak $\varphi = \arctg(0,1) = 5,7^\circ$. V najslabšem primeru je torej pogrešek približno 6 stopinj.

Prednosti sistema vrtilnih svetilnikov VOR pred sistemom neusmerjenih svetilnikov NDB so

- Pogrešek je manjši kot pri radijskem kompasu

¹ Uporabljajo se morske milje, čeprav govorijo o miljah. Morska milja je razdalja ene ločne minute na ekvatorju in znaša 1852 m. Zemeljska ali angleška milja, ki se uporablja za merjenje razdalj na kopnem v Ameriki in Veliki Britaniji, znaša 5280 čevljev ali 1609 m.

- atmosferske motnje na ultrakratkih valovih so bistveno manjše kot na srednjevalovnem področju
- sprejemnik za VOR se uporablja tudi za sprejemnik za pristajalni sistem ILS (9.1)
- zasnova oddajnikov je enostavna, zato so stroški vzdrževanja majhni

Pomanjkljivost v primerjavi s sistemom srednjevalovnih neusmerjenih svetilnikov pa je zahtevana optična vidljivost, zato imajo svetilniki VOR za nizkoteča letala majhen doseg.

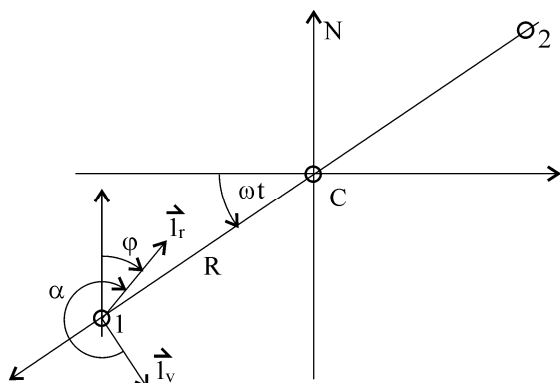
6.8 Dopplerjev vrtilni svetilnik (DVOR)

V opisu sistema VOR smo ugotovili, da ima sistem v okoliščinah, ko so poleg neposrednega vala prisotni tudi odbiti valovi, razmeroma velik pogrešek azimuta. To je pravzaprav posledica tega, da se azimutni signal prenaša z amplitudno modulacijo. Če bi azimutni signal prenašali s frekvenčno modulacijo, bi bil vpliv odbitih valov bistveno manjši, vemo, da je pri velikih stopnjah modulacije frekvenčna modulacija za motnje manj občutljiva kot amplitudna. Kot vemo, je stopnja frekvenčne modulacije podana s kvocientom $m = \frac{\Delta f}{f_m}$, kar znaša za naš primer $m = \frac{480}{30} = 16$, kar pomeni veliko

stopnjo modulacije. Naj torej svetilnik oddaja referenčni signal z amplitudno modulacijo in azimutnega s frekvenčno modulacijo, pri čemer naj vse ostale značilnosti obeh modulacij ostanejo enake.

Na prvi pogled bi lahko sklepali, da bo sedaj velik pogrešek referenčnega signala, ki se prenaša z amplitudno modulacijo. Vendar ni tako, referenčni signal je namreč v vseh smereh enak in so zato tudi odbiti valovi modulirani z enako fazo modulatorskega signala kot neposredni val.

Spet ne bo težko z referenčnim signalom amplitudno modulirati neusmerjene antene, poglejmo si zato le, kako modulirati azimutni signal. Za modulacijo izkoristimo Dopplerjev pojav, v različne smeri različno frekvenčno modulacijo signala dobimo s kroženjem neusmerjene antene oddajnika (Sl. 6.12).



Sl. 6.12 Oddajnik Dopplerjevega vrtilnega svetilnika (DVOR)

Naj bo oddajnik nameščen na mestu 1, ki na razdalji R kroži s krožno frekvenco ω okrog središča C (Sl. 6.12) in naj bo vzbujan s signalom frekvence f_0 . Zaradi gibanja oddajnika s hitrostjo v v smeri $\mathbf{1}_v$, je frekvenca vala v smeri $\mathbf{1}_r$ zaradi Dopplerjevega pojava podana z

$$f = f_0 + f_0 \frac{v}{c} \mathbf{1}_r = f_0 + f_0 \frac{v}{c} \mathbf{1}_v \mathbf{1}_r,$$

ali, z drugimi besedami, sprememba frekvence vala v določeni smeri je premosorazmerna komponenti hitrosti v tej smeri.

Uporabimo enačbo za frekvenco vala, ki se širi v smer azimuta φ , to je v smer $\mathbf{1}_r$. Hitrost oddajnika v je enaka $v = \omega R$, skalarni produkt med smernima vektorjema hitrosti $\mathbf{1}_v$ in smerjo vala $\mathbf{1}_r$ je enak kosinusu kota α , ki je enak $\alpha = \omega t + \varphi + 180^\circ$. Frekvenca vala oddajnika 1 v smeri azimuta je torej

$$f_1 = f_{10} + \frac{f_{10} \omega R}{c} \cos(\omega t + \varphi + 180^\circ) = f_{10} - \frac{f_{10} \omega R}{c} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$f_1 = f_{10} - \Delta f_1 \cos(\omega t + \varphi)$$

Dodajmo še en oddajnik (na sliki označen s točko 2), ki se vrti z enako hitrostjo kot prvi, le da je ravno na drugi strani osi C , torej v kroženju zaostaja (ali prehiteva) prvega za 180° . Njegov kot α bo torej za 180° različen od kota α prvega oddajnika. Če ga napajamo s signalom frekvence f_2 , je frekvenca njegovega vala v smeri azimuta enaka

$$f_2 = f_{20} + \frac{f_{20} \omega R}{c} \cos(\omega t + \varphi) = f_{20} + \Delta f_2 \cos(\omega t + \varphi)$$

Tako, zdaj smo pa že čisto pri koncu. Izberimo frekvenci f_{10} in f_{20} takole

$$f_{10} = f_n - 9960 \text{ Hz}$$

$$f_{20} = f_n + 9960 \text{ Hz}$$

ter upoštevajmo za določitev frekvenčnega razmaha Δf oceno

$$\Delta f_1 \cong \Delta f_2 \cong \Delta f = \frac{f_n \omega R}{c}, \quad (6.4)$$

pa dobimo

$$f_1 = f_n - 9960 \text{ Hz} - \Delta f \cos(\omega t + \varphi)$$

$$f_2 = f_n + 9960 \text{ Hz} + \Delta f \cos(\omega t + \varphi)$$

To pa sta bočna pasova amplitudno moduliranega signala, pri čemer je modulatorni signal še frekvenčno moduliran s funkcijo $\cos(\omega t + \varphi)$. Očitno smo torej dobili natančno to, kar potrebujemo: z azimutnim signalom $\cos(\omega t + \varphi)$ frekvenčno moduliran pomožni signal frekvence 9960 Hz, s katerim je amplitudno moduliran nosilni signal. Kot smo povedali že v uvodu, je nosilni signal neposredno amplitudno moduliran tudi z referenčnim signalom $\cos(\omega t)$ in oddajan preko vsesmerne antene.

Kako pa zadeve urediti na sprejemni strani? Sprejemnik je narejen tako, da določa fazno razliko med signalom iz FM demodulatorja in signalom iz AM demodulatorja (Sl. 6.10). Ta znaša sedaj:

$$\Delta\varphi = \varphi_{FM} - \varphi_{AM} = \varphi,$$

kar je ravno prav. To je zato, ker je smer kroženja Dopplerjeve oddajne antene ravno nasprotna smeri vrtenja vrtilne antene in ker smo pravilno izbrali začetek kroženja. Oboje smo seveda izbrali tako ravno zato, da bi sprejemnik deloval enako ne glede na to, ali sprejema signal navadnega ali Dopplerjevega vrtilnega svetilnika.

V naslednjem zgledu pa določimo še polmer R , na katerem mora krožiti antena Dopplerjevega vrtilnega svetilnika.

Zgled 13 Polmer antene svetilnika DVOR

Obrnimo enačbo (6.4), pa dobimo

$$R = \frac{c\Delta f}{\omega f_n} = \frac{c\Delta f}{2\pi f f_n}$$

Za podatke $\Delta f=480$ Hz, $f=30$ Hz, $f_n=110$ MHz dobimo rezultat

$$R=6,9 \text{ m.}$$

Vrtiljaka s premerom 14 m pa seveda ne moremo vrteti s frekvenco 30 obratov v sekundi. Zato so krožeče antene v resnici narejene kot venec 50-tih mirujočih anten, na katere se zaporedoma priklaplja signal oddajnika in tako simulira kroženje antene. Primer take anterne je na sliki (Sl. 6.13).



Sl. 6.13 Oddajna antena sistema DVOR brniškega letališča pri Šenčurju

Doseg in natančnost sistema DVOR

Vse, kar smo splošnega povedali za doseg in natančnost sistema VOR, velja tudi za sistem DVOR. Sistem DVOR se od sistema VOR razlikuje le po pogrešku, ki ne presega vrednosti $\pm 1^\circ$.

6.9 Literatura

- [1] E. Lertes, *Funkortung und Funknavigation*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1995
- [2] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994
- [3] M. Kayton, W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Willey&Sons, 1997
- [4] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

7. Sistemi za določanje oddaljenosti

7.1 Uvod

Vsi sistemi za merjenje oddaljenosti s pomočjo elektromagnetnih valov temeljijo na merjenju časov ali faz, nekateri pa oboje kombinirajo. Med merjenjem faze in časa ni bistvene razlike, le pri merjenju faze je nedoločnost faze za mnogokratnik 2π vzrok za več možnih rešitev in je določitev pravilne izmed njih povezana z dodatnimi težavami. Navadno se odločimo za pravilno rešitev izmed mnogih na podlagi približno znanega položaja. Približno lahko določimo položaj po kateri drugi metodi, lahko pa tudi tako, da izhajamo iz znanega, običajno začetnega položaja, nato pa določamo položaj tako pogosto, da lahko za 'približno znani položaj' vzamemo položaj prejšnjega določanja. Lahko pa približni položaj določimo z merjenjem časa, natančnega pa z merjenjem faze. Na podoben način deluje analogna ura z velikim in malim kazalcem, veliki kaže točen čas (nedoločeno za eno uro), mali pa približnega!

Poglejmo si, kako lahko z merjenjem časa določimo oddaljenost. Ker potuje elektromagnetni val s svetlobno hitrostjo c , velja $R=ct$. Kako pa izmeriti čas t ? Ena možnost je, da svetilnik ob dogovorjenem času t_0 odda pulz, na sprejemniku pa izmerimo, ob katerem času t_1 je impulz prispel, čas t je očitno $t=t_1-t_0$. Ocenimo natančnost rezultata, če poznamo pogreška obeh ur:

$$t = (t_1 \pm \Delta t_1) - (t_0 \pm \Delta t_0) = t_1 - t_0 \pm (\Delta t_1 + \Delta t_0) = t_1 - t_0 \pm \Delta t$$

Ta časovni pogrešek povzroči pogrešek pri določanju oddaljenosti

$$\Delta R = c\Delta t .$$

Zgled 14 Pogrešek merjenja oddaljenosti zaradi netočne ure

Naj bo v oddajniku cezijeva ura s stabilnostjo 10^{-12} in v sprejemniku kvarčna ura s stabilnostjo 10^{-8} in da ju imamo možnost sinhronizirati enkrat na dan. V enem dnevu kažeta uri narobe za $\Delta t_1=10^{-7}$ sekund in $\Delta t_2=10^{-3}$ sekund. Očitno lahko pogrešek oddajnikove ure v primerjavi s pogreškom sprejemnikove ure zanemarimo. Sam pogrešek sprejemnikove ure pa povzroča pogrešek določanja oddaljenosti, ki znaša 300 km!

Takšen pogrešek določanja položaja je seveda nesprejemljiv, edina rešitev iz zagate bi bila, da imamo tudi v sprejemniku cezijevo uro, takrat bi bil pogrešek enak 60 m, kar je čisto nekaj drugega! Vendar problema s tem nismo rešili, cezijeve ure so namreč predrage in prenerodne za takšno uporabo, zato bo čas treba meriti drugače.

Pri sistemih za določanje oddaljenosti od svetilnika vedno merimo čas tako, da pri merjenju sodeluje le ena ura in ne dve. Tako ni treba da ura kaže točen čas, biti mora le natančna. Z isto uro pa

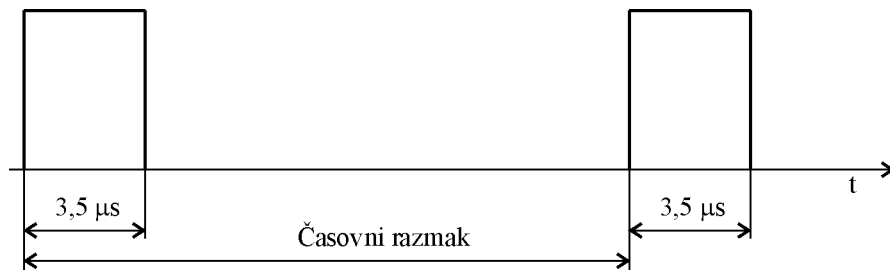
lahko merimo čas le tako, da oddamo impulz, ki se nato odbije od cilja, tako meri oddaljenost radar, ali pa ta pulz sprejemno oddajna naprava na svetilniku sprejme in odda nazaj, ta način je v rabi pri sistemu DME in pri sekundarnem radarju. Očitno mora pulze oddajati tisti, ki določa položaj. Pri navigacijskih sistemih za določanje oddaljenosti do svetilnika mora torej pulze oddajati letalo, svetilnik na znanem položaju pa jih mora 'vračati'.

7.2 Sistem DME

Sistem za merjenje oddaljenosti DME (*distance measurement equipment*) je sestavljen iz oddajnika in sprejemnika na letalu ter oddajnika in sprejemnika na poznanem položaju na zemlji (na svetilniku). Sistem deluje na frekvenci okrog 1 GHz z vertikalno polariziranimi valovi. Zasnova delovanja je takšna, za kakršno smo napisali že v uvodu, da je pravzaprav edina mogoča: oddajnik na letalu odda impulz (pravzaprav oddaja pulzno moduliran visokofrekvenčni nosilni signal), sprejemnik na svetilniku ga sprejme in spet odda. Sprejemnik na letalu ta odgovor sprejme in iz časovne razlike med oddajo in sprejemom izračuna, kako daleč je svetilnik. Impulzom, ki jih oddajajo letala, bomo rekli **povpraševalni impulzi** ali kar **vprašanja**, napravi na letalu pa **povpraševalnik** (*interrogator*). Impulzom svetilnika bomo rekli **odgovor**, napravi na svetilniku pa **odzivnik** (*transponder*). Ker smo tehniki že vajeni, da se 'hudič skriva v podrobnostih', si zato pogledjmo pasti, ki prežijo na tehnično izvedbo tako enostavne zasnove.

Poglavitna težava sistema je, da je blizu svetilnika praviloma veliko število letal, ki vsa želijo določiti svojo oddaljenost od njega. Za sisteme svetilnikov NDB ali VOR to ni nobena ovira, svetilniki oddajajo elektromagnetne valove, ki jih je dovolj za vsa okoliška letala in ki se z uporabo sistema čisto nič ne motijo med sabo. Pri sistemu DME pa je drugače, vsako od letal oddaja svoje pulze, ker pa svetilnik odgovarja vsem, je vsako letalo poleg odgovorov na svoje pulze deležno tudi odgovorov na pulze vseh ostalih letal. Okolica letališč, kjer je seveda natančen položaj letala najbolj važen, je običajno tudi polna radarskih impulzov. In v tej zmešnjavi impulzov mora vsako letalo prepoznati svoje. V splošnem slonijo vse telekomunikacije na tem, da je vzpostavljenih veliko število istočasnih zvez, tako delovanje imenujemo multipleks. Glede na tehnične možnosti naprav se je v razvoju telekomunikacij najprej pojavil frekvenčni, potem časovni in nazadnje še kodni multipleks. Niti frekvenčni, niti časovni multipleks za sistem DME ne bi bila primerna. Frekvenčni bi bil preveč zapleten, saj bi moralo vsako letalo komunicirati na svojem kanalu. Pri časovnem multipleksu pa bi morala biti zaradi velikih zakasnitev (pulz mora priti od letala do svetilnika in nazaj!) časovna okna za posamezna letala predolga, zato bi cikel za vsa letala trajal predolgo in osveževanje oddaljenosti bi bilo preveč počasno. Ostane le še kodni multipleks in videli bomo, da uporablja sistem DME za ločitev letal (kanalov) med sabo psevdonaključno položajno kodiranje pulzov.

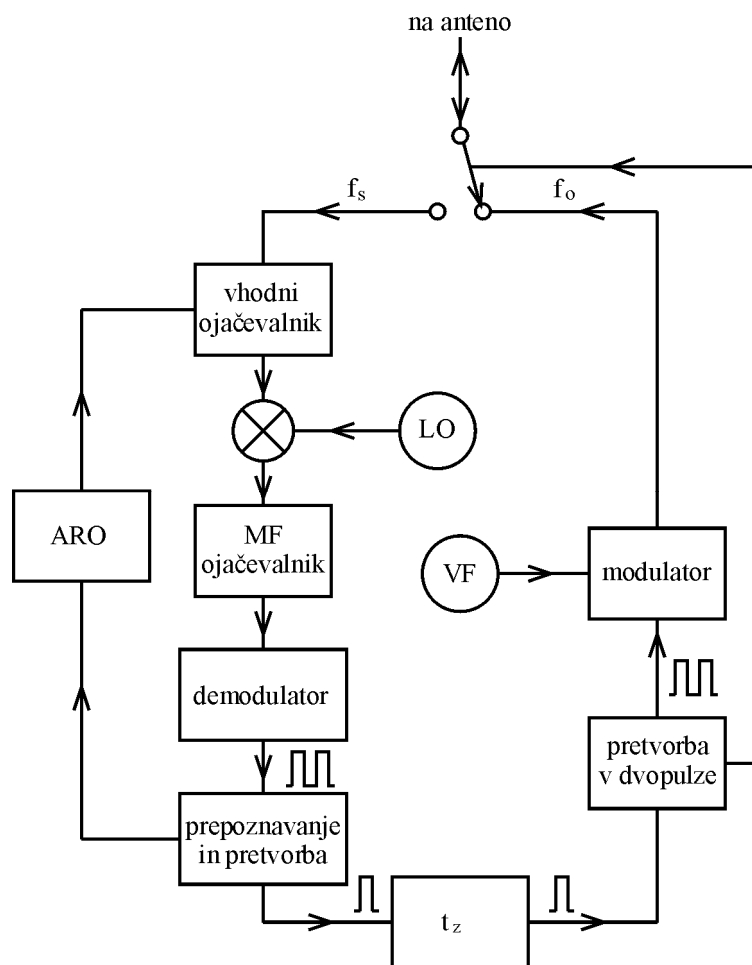
Poleg tega pa uporablja sistem DME za lažje prepoznavanje impulzov še dva ukrepa. Prvi je, da impulzi vedno nastopajo v parih. Oddajnik povpraševalnika in odzivnika vedno odda dva pulza zapored, vsak od njiju traja $3,5 \mu\text{s}$, sledita pa si v razmaku $12 \mu\text{s}$, $18 \mu\text{s}$, $30 \mu\text{s}$ ali $36 \mu\text{s}$, da se s tem razlikujejo od dvojnih pulzov sekundarnega radarja, ki so v razmaku $8 \mu\text{s}$ ali $21 \mu\text{s}$ (Sl. 7.1).



Sl. 7.1 Dvojni pulz sistema DME

Na tak način sprejemnik v svetilniku ali v letalu kot 'pravi' impulz prepozna le predpisan par impulzov, vse enojne pulze pa 'zavrne'. Drugi ukrep pa je, da so s frekvenčnim multipleksom povpraševalni impulzi ločeni od impulzov odgovorov.

Preden gremo na podrobnosti prepoznavanja odgovorov na vprašanja v povpraševalniku, si oglejmo blokovno shemo odzivnika (Sl. 7.2) in povpraševalnika (Sl. 7.3).



Sl. 7.2 Blokovna shema odzivnika sistema DME

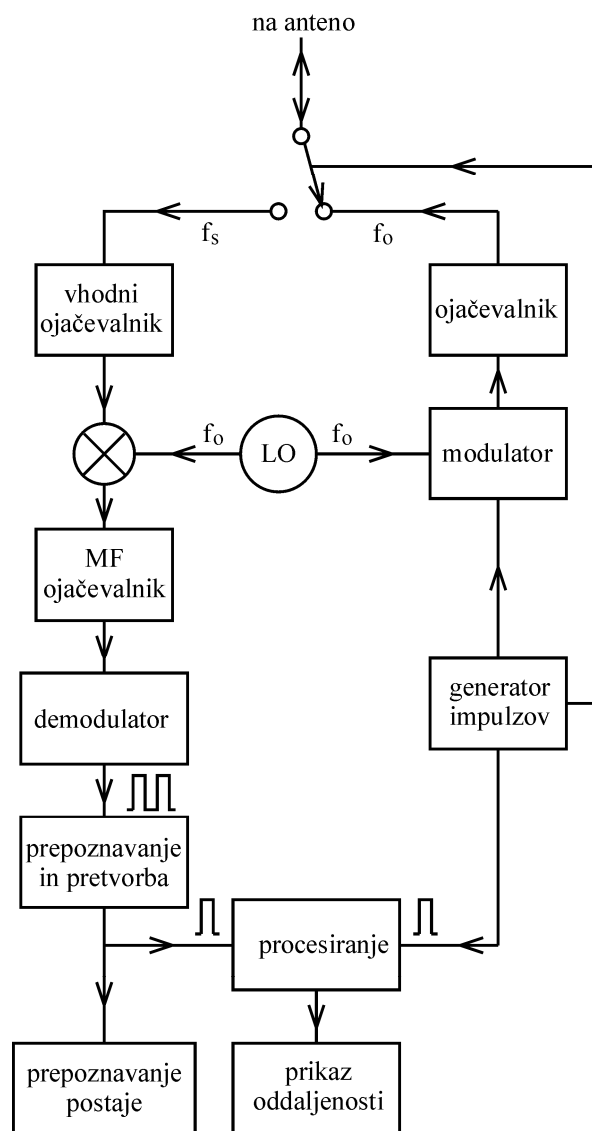
Sprejemnik je superheterodinski sprejemnik, ki mu sledi amplitudni demodulator. Za njim sledi vezje, ki vrednoti impulze. Kadar si dva impulza sledita v predpisanem času, ju prepozna kot 'dvopulz', enojne pulze pa zavrže. Dvopulze pretvori v enojne pulze in jih zakasni za predpisan čas t_z . Ta čas je določen tako, da je zakasnitev pulza od sprejema do oddaje na anteni enaka $50 \mu\text{s}$. Zakasnitev je potrebna zato, ker med sprejemom in oddajo neizogibno pride do zakasnitve impulza zaradi obdelave signala, taka zakasnitev pa bi v določanje oddaljenosti vnesla pogrešek. Zato je v sistem vnešena umetna definirana zakasnitev, ki jo lahko sprejemnik na letalu upošteva. Po tej zakasnitvi se impulzi spet pretvorijo v dvopulze, s katerimi se modulira signal nosilne visoke frekvence. Ta signal se preko stikala vodi na anteno. Stikalo med oddajanjem pulzov preklopi anteno na oddajnik, ostali čas je antena priključena na sprejemnik. Razlika med oddajno in sprejemno frekvenco je 63 MHz . Odzivniki delujejo na fiksnih frekvencah, raster je 1 MHz .

Oddajnik mora delovati s konstantnim številom oddanih pulzov na sekundo, to je približno 3000 dvopulzov na sekundo (kar pomeni, da za dano trajanje pulzov oddajnik oddaja približno 2% časa). Število impulzov, ki jih mora obdelati in oddati, pa je seveda odvisno od števila letal, ki merijo svojo oddaljenost s tem sistemom. Kadar je letal preveč, sprejemnik z avtomatsko regulacijo ojačenja (ARO)

zniža občutljivost in zato ne sprejema več povpraševalnih impulzov najbolj oddaljenih letal. Ko kasneje naval letal pojenja, zviša občutljivost. Če je letal kljub največji občutljivosti premalo, oddajnik naključno med prave impulze vriva še polnilne impulze.

Vsake 37 sekund oddaja oddajnik 3 sekunde razpoznavne impulze.

Oglejmo si sedaj še blokovno shemo povpraševalnika na letalu (Sl. 7.3).



Sl. 7.3 Blokovna shema povpraševalnika sistema DME

Frekvenco spremenljivega lokalnega oscilatorja je treba nastaviti (običajno s frekvenčno sintezo) na sprejemno frekvenco zemeljske postaje DME, nastavljivo frekvenco pasovnega vhodnega ojačevalnika pa na oddajno frekvenco zemeljske postaje DME. Ker je frekvenca medfrekvenčnega ojačevalnika enaka 63 MHz in je tudi razlika med oddajno in sprejemno frekvenco zemeljske postaje enaka 63 MHz, lahko isti oscilator služi kot lokalni oscilator v vhodnem mešalniku in kot generator visokofrekvenčnega nosilnega signala.

Sprejemni del deluje v principu enako kot sprejemni del transponderja: iz dvopulza naredi pulz, ki ga pošlje na procesiranje pulzov, posamezne pulze pa zavrže. Zaporedje pulzov obdela tudi vezje za prepoznavanje postaje.

Tudi oddajni del je podoben, z dvopulzi se amplitudno modulira visokofrekvenčni nosilni signal, ki se ga nato še ojači in preko stikala pošlje na anteno. Stikalo poskrbi za preklon med oddajo in sprejemom. Samo določanje oddaljenosti od svetilnika je trivialno, čas od oddaje impulza do sprejema je enak

$$\Delta t = \frac{2R}{c} + t_z, \quad (7.1)$$

iz česar sledi

$$R = \frac{(\Delta t - t_z) c}{2}$$

Poglavitni del naloge sistema DME je, kot smo že rekli, ločiti odgovore na lastna vprašanja od odgovorov na vprašanja ostalih letal. To nalogo rešujeta generator impulzov in procesiranje pulzov v povpraševalniku. Sistem lahko deluje v dveh načinih, v načinu **iskanja** in v načinu **sledenja**. V naslednji razlagi bomo zaradi preglednosti govorili o impulzih, čeprav sistem oddaja dvojne pulze.

Pred začetkom razlage pa si oglejmo, na čem sloni algoritem ločevanja lastnih od tujih odzivov. Zadeva sloni na dejstvu, da povpraševalniki v vseh letalih oddajajo pulze tako, da so časovno posejani naključno. Zamislimo si sedaj, da na zaslonu osciloskopa opazujemo sliko prispelih pulzov in sicer tako, da sprožimo časovno bazo osciloskopa vedno takrat, ko oddamo pulz. Na zaslonu bomo na vsaki sliki opazili mnogo pulzov, ki so odzivi na povpraševanje vseh letal, ki oblegajo napravo DME na letališču. Ker pa so pulzi posejani naključno, bodo vse slike med seboj različne, razen ene podrobnosti: **izmed vseh pulzov se bo en pulz pojavljal vedno na istem mestu**. To je ravno pulz, ki ga iščemo, pulz, ki je odziv na naše povpraševanje, saj smo časovno bazo sprožili ob oddaji pulza, njegovo zakasnitev pa določa oddaljenost našega letala od svetilnika. V času od pulza do pulza tudi najhitrejša letalo preleti tako kratko razdaljo, da tega pri opazovanju lege pulza sploh ni mogoče zaznati. Torej sloni ločevanje lastnega odziva od naključnih odzivov na izločanju 'mirujočega' pulza iz množice premikajočih se pulzov.

V načinu **iskanja** deluje sistem, ko se letalo približuje svetilniku DME in ne pozna svoje oddaljenosti do svetilnika. V tem načinu generator generira približno 150 impulzov na sekundo, ki se jim ponavljalni čas spreminja psevdonaključno. Po vsakem oddanem pulzu se z določeno zakasnitvijo odpre časovno okno, široko 10 μ s. Procesor obdela le impulze, ki so prispeli v času odprtega okna. Iz dosega sistema, ki je nekaj sto km in povprečnega ponavljalnega časa impulzov sledi, da je zaporedje vedno impulz, okno, naslednji impulz, naslednje okno itn. Pri povprečnem številu vseh pulzov

odzivnika, ki znaša 3000 pulzov na sekundo, bo skozi odprto okno prišlo povprečno 4,5 impulza na sekundo (okno je v eni sekundi odprto skupaj $150 \cdot 10 \mu\text{s} = 1500 \mu\text{s}$, v tem času je impulzov $0,0015 \cdot 3000 = 4,5$). To je seveda povprečje in tu so vštetni vsi impulzi, namenjeni vsem letalom, ki trenutno uporabljajo sistem. Če je zakasnitev časovnega okna izbrana naključno, je število odgovorov, ki pridejo skozi odprto okno, zelo majhno, saj dobi povpraševalnik le 4,5 odgovorov na 150 vprašanj. Kaj pa se zgodi, če je zakasnitev okna ravno takšna, da sredina okna sovpada z zakasnitvijo odgovorov na naša vprašanja (enačba (7.1))? Takrat bodo očitno skozi odprto okno prispeli odgovori na vsa naša vprašanja in število odgovorov na sekundo bo naraslo iz 4,5 na približno 155 (150 naših in 5 naključnih). Kako pa določiti ravno pravo zakasnitev okna? Sistem jo določi s časovnim spreminjanjem zakasnitve. Okno 'drsi' v času s hitrostjo $100 \mu\text{s/s}$ in zato svojo širino $10 \mu\text{s}$ preleti v $1/10$ sekunde. Ko med drsenjem okna časovna zakasnitev sovpade z zakasnitvijo odgovorov na lastna vprašanja, se število pulzov, ki pridejo skozi odprto okno v desetinki sekunde, kolikor traja 'prelet' okna, povzpne iz povprečno 0,45 naključnega pulza na 15 pravih impulzov. Ko se to zgodi, se drsenje zakasnitve ustavi, sprejemnik določi oddaljenost letala od zemeljske postaje in se preklopi na način sledenja.

V načinu **sledenja** ni potrebna tako visoka frekvenca povpraševanja, saj sprejemnik že približno ve, kako daleč od svetilnika je. Generator impulzov generira v tem načinu povprečno 25 impulzov na sekundo, ki se jim ponavljalni čas spet spreminja naključno. Časovno okno je odprto $20 \mu\text{s}$, zakasnitev pa se sproti spreminja tako, da odgovori padajo v sredino odprtega okna. V času odprtega okna ($500 \mu\text{s}$ na sekundo) pride v procesor približno 1,5 naključnega pulza in 25 pravih impulzov na sekundo. Če se letalo giblje v radialni smeri s hitrostjo 1000 km/h , se bo v sekundi zakasnitev odgovorov spremenila za $2 \mu\text{s}$, čemur lahko sistem lagodno prilagaja zakasnitev časovnega okna.

Poglejmo na zgledu, kolikim letalom hkrati lahko služi en odzivnik sistema DME.

Zgled 15 Število letal, ki jim lahko hkrati streže sistem DME

Izkušnje so pokazale da je približno 95% letal v fazi sledenja in 5% letal v fazi iskanja. Če je vseh letal n , je skupno število pulzov na sekundo N enako

$$N = n \cdot 0,05 \cdot 150 + n \cdot 0,95 \cdot 25 = n \cdot 31,25$$

Skupno število pulzov na sekundo za sistem DME je $N=3000$, torej je skupno število letal enako 96 ali, kakor običajno rečemo, približno sto.

Doseg in natančnost

Oddajniki zemeljskih postaj imajo pulzno moč od 1 do 15 kW, oddajniki na letalih pa od manj kot 100 W do 1,25 kW. Doseg sistema je določen z radijskim horizontom in znaša za letala na višini 23 km do 500 km, sicer pa ustrezno manj. Cel sistem zagotavlja natančnost določanja oddaljenosti na $\pm 370 \text{ m}$.

Sistem VOR/DME

Za določanje položaja je prav posebej pripravna metoda merjenja oddaljenosti in azimuta letala (4.4), saj za določitev položaja zadošča en sam svetilnik. Zato je odzivnik sistema DME pogosto nameščen na isto mesto kot svetilnik VOR ali DVOR. Za določanje položaja se sistem VOR uporablja v glavnem v kombinaciji VOR/DME.

Sistem DME/DME

Za določanje položaja se pogosto uporabljata tudi dva svetilnika DME. Kot smo videli v poglavju 4.3, je tak postopek za določanje položaja od vseh dosedaj obravnavanih sistemov najbolj natančen.

7.3 Sistem DME/P

Sistem DME/P (*precision distance measurement equipment*) deluje v osnovi enako kot sistem DME, le prva fronta impulzov je bolj strma, zato je natančnost določanja oddaljenosti večja. Uporablja se za določanje oddaljenosti letal pri pristajanju v kombinaciji s pristajalnima sistemoma ILS (9.1) in MLS (9.2). Sistem deluje v dveh načinih, daljnem (začetek doleta od 40 km do 13 km) in bližnjem (zaključek doleta od 13 km do pristanka). Sistem zagotavlja z bližino padajoč pogrešek in sicer v daljnem področju pogrešek pada od 250 m do 85 m, v bližnjem področju pa pogrešek pada od 85 m do 30 m.

7.4 Primerjava sekundarnega radarja in sistema DME

Skupen imata sistema princip, da merita razdaljo z merjenjem časovne zakasnitve med povpraševanjem in odgovorom in da sistem določa položaj množice letal glede na lego svetilnika.

Razliki, katerih posledica je tako različna izvedba sistemov, sta pravzaprav le dve. Ena je, da sekundarni radar meri položaj posameznih letal, sistem DME pa le oddaljenost. Druga pa je, da je pri sekundarnem radarju en povpraševalnik in mnogo odzivnikov, pri sistemu DME pa mnogo povpraševalnikov in en odzivnik.

Sekundarni radar nima nobenih težav z ločevanjem ciljev, saj vsak cilj na povpraševanje odgovori z identifikacijo (in vsem ostalim seveda). Ima pa problem z določanjem smeri, zato ima sistem nekaj posebnosti, da lahko smer določi enoveljavno.

Sistem DME nima nobenih težav z določanjem smeri, saj je sploh ne določa. Ima pa hud problem z ločevanjem odzivov na lastno povpraševanje od odzivov na povpraševanje ostalih letal iz jate, ki dela gnečo v bližini letališča. Zato ima sistem v delovanje vgrajen domiselni sistem ločevanja pravih odzivov od nepravih.

7.5 Literatura

- [1] E. Lertes, *Funkortung und Funknavigation*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1995
- [2] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994
- [3] M. Kayton, W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Willey&Sons, 1997
- [4] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

8. Hiperbolični sistemi

8.1 Uvod

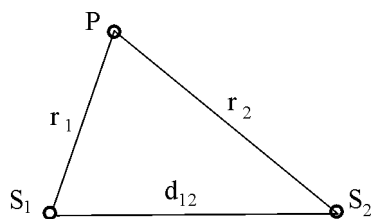
Sistemi za določanje položaja, ki smo jih spoznali v poglavjih 6 in 7, so bili pravzaprav zgolj naprave za določanje položajnih ploskev. Navigator je lahko določil položaj svojega letala s kombinacijo večih sistemov ali naprav, recimo radijskega kompasa, svetilnika VOR, sistema DME ipd. Vse te naprave delujejo avtonomno in med seboj čisto neodvisno in nobena ne ponuja 'kompletne usluge' določanja položaja¹. To je po eni strani slabost in po drugi prednost. Pomanjkljivost je, da od navigatorja zahteva znanje in spretnost uporabe večih sistemov, določanje položaja je tudi zamudno. Prednost pa je fleksibilnost in robustnost. Z le nekaj napravami imamo možnost mnogih kombinacij in s tem mnogih različnih metod. Če odpove ena naprava, lahko položaj določimo s tistimi, ki še delujejo.

Pri hiperboličnih sistemih pa posamezni svetilniki ne služijo za določanje položajnih ploskev, temveč je celoten sistem zasnovan kot sistem za določanje položaja, saj morajo biti svetilniki med seboj povezani v sistem z enotno uro, da bo metoda delovala. Zato je navigator s takšnim sistemom dobil eno učinkovito napravo za določanje položaja. Toda če ta naprava odpove, ne bo o svojem položaju vedel ničesar več. Tudi če ima v rezervi še eno, lahko odpove sistem (ali ga nekdo izključi), takrat pa ne bo nihče (od tistih, ki za določanje položaja uporablja samo ta sistem) več vedel kje je. Zato ima vsak svetilnik v hiperboličnem sistemu tudi rezervni svetilnik. Vendar se kljub temu hiperbolični sistemi uporabljajo za navigacijo vedno v kombinaciji z drugimi navigacijskimi napravami.

8.2 Pomorski sistemi (LORAN)

Za sistem LORAN (*long range navigation*) je značilna skupina svetilnikov, imenovana veriga (*chain*), v kateri je en glavni (*master*) in več stranskih svetilnikov (*slave*). Za referenčno uro za celo verigo služi ura v glavnem svetilniku. Ta oddaja pulze (pravzaprav pulzno moduliran nosilni signal), ki jih sprejemajo sprejemniki na letalih in ladjah, pa tudi sprejemniki na stranskih svetilnikih. Stranski svetilniki pulze zakasniijo za čas t_z in jih kot 'svoje' oddajo naprej.

¹ Sodobna letala uporabljajo več svetilnikov DME za določanje položaja po metodi večih oddaljenosti (4.3) za umerjanje sistema inercialne navigacije (1). Tako je sistem svetilnikov DME pravzaprav kompletan sistem za linijsko navigacijo. Odpove pa pri približevanju letališču, saj je takrat letalo prenizko, da bi videlo dovolj svetilnikov.



Sl. 8.1 Glavni in stranski svetilnik verige LORAN

Označimo glavni svetilnik z S_1 , stranskega z S_2 in položaj sprejemnika s P (Sl. 8.1). Časa, v katerih prispeta pulza do sprejemnika, sta podana z

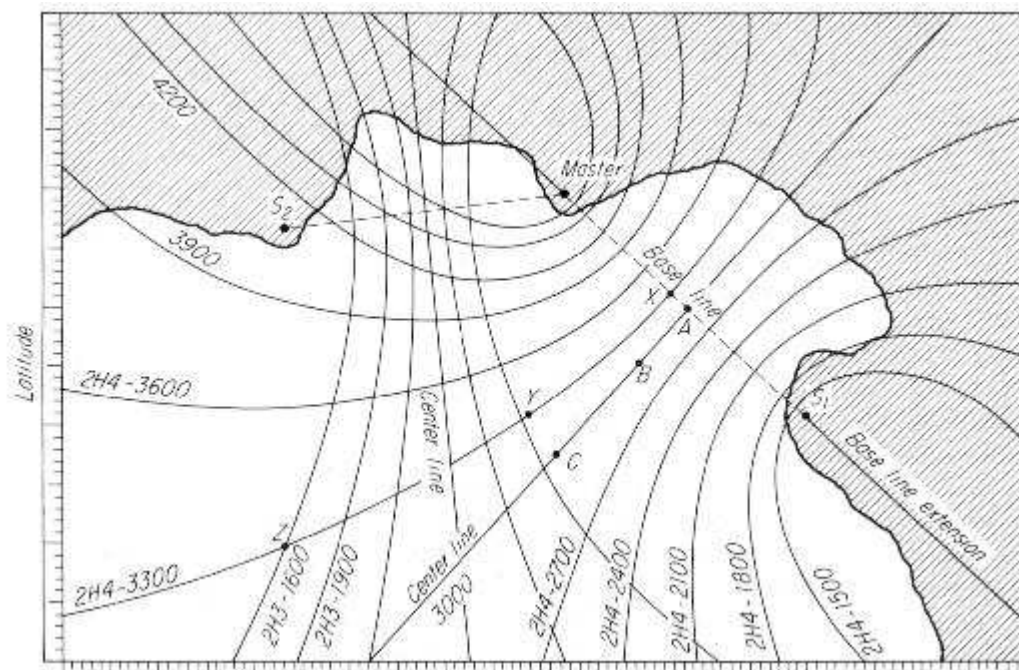
$$t_1 = \frac{r_1}{c}$$

$$t_2 = \frac{d_{12}}{c} + t_z + \frac{r_2}{c}$$

Razlika razdalj od položaja do svetilnikov, ki je pomembna karakteristika hiperbol (enačba (4.1)) pa je

$$r_2 - r_1 = (t_2 - t_1 - t_z)c - d_{12}$$

Zakasnitev t_z je sistemsko podana, prav tako je za vsak par poznana njuna bazna razdalja d_{12} . Iz razlike v času prispetja je torej možno določiti hiperbolo, na kateri je položaj sprejemnika. Sistem je nastajal pred davnimi časi, ko še ni bilo računalnikov. Zato so bile za vsako verigo natisnane navigacijske karte, v katere so bile vrisane hiperbole za posamezne pare svetilnikov in s časovno zakasnitvijo kot parametrom (Sl. 8.2)



Sl. 8.2 Navigacijska karta sistema LORAN-A

Sistem LORAN-A

Sistem LORAN-A, ki ne deluje več, je bil eden izmed prvih pomorskih navigacijskih sistemov, postavljeni so ga pričeli v letu 1940. Deloval je na frekvenci 2 MHz, bazne razdalje posameznih parov so znašale nekaj 100 km. Oddajali so na treh različnih frekvencah, vendar vsi oddajniki ene verige na isti frekvenci. Med seboj so se pari oddajnikov ločili po ponavljalnem času impulzov. Če je en glavni oddajnik skrbel za več stranskih, je moral za vsakega od njih oddajati verigo pulzov s svojim ponavljalnim časom. Sistem je v odvisnosti od pogojev razširjanja in lege sprejemnika zagotavljal natančnost do 10 km. Nikoli ni pokrival cele Zemlje, temveč le posamezne dele, posebej dobro so bila pokrita področja severnega Atlantskega oceana, Indijskega oceana in zahodnega Tihega oceana.

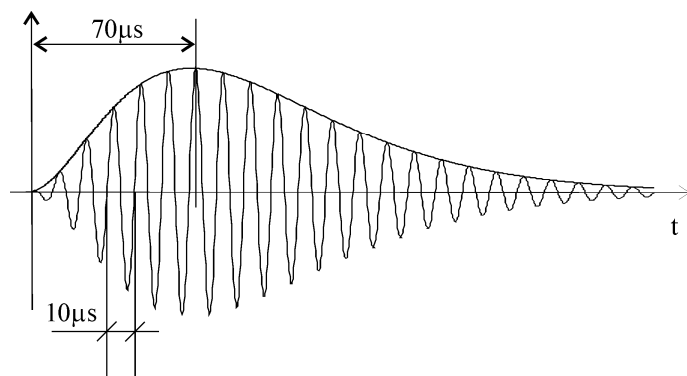
Strnimo: v **sistemu LORAN-A**

- se **razlika razdalj** določa z merjenjem časovnih razlik med signali posameznih svetilnikov,
- **ločevanje svetilnikov** pa je omogočeno s tem, da oddaja vsak par svetilnikov zaporedje pulzov s svojim ponavljnim časom, dodatno pa še s tem, da delujejo verige na treh različnih frekvencah.

Sistem LORAN-C

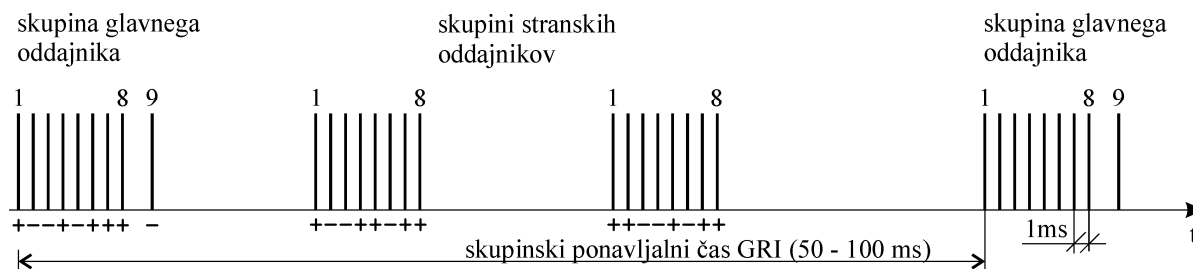
Sistema LORAN-A sicer ne vzdržujejo več, še vedno pa vzdržujejo sistem LORAN-C. Od sistema LORAN-A se LORAN-C razlikuje predvsem po tem, da meri tudi fazno in ne le časovne razlike med prispelimi pulzi. Vsi oddajniki delujejo na isti frekvenci 100 kHz. Pri tej frekvenci je zagotovljeno stabilno razširjanje talnih valov, dosegi oddajnikov so preko 1000 km. Bazne razdalje posameznih parov so razreda 1000 km. Poglejmo si najprej, kako sistem meri razlike razdalj, nato pa si bomo ogledali še, kako med seboj loči signale posameznih svetilnikov.

Ovojnica pulzov ima posebno obliko (Sl. 8.3), zaradi katere je sistem manj občutljiv na motnje zaradi odbitih valov. Periodo nihajev v pulzu določa nosilna frekvenca in znaša $10\ \mu\text{s}$. Iz primerjanja ovojnice pulzov para oddajnikov sprejemnik določi najprej grobo časovno razliko, podobno kot sistem LORAN-A. Nato iz primerjanja faze tretjega nihaja v pulzih para oddajnikov (torej približno $30\ \mu\text{s}$ po začetku pulza) določi razliko razdalj bolj natančno.



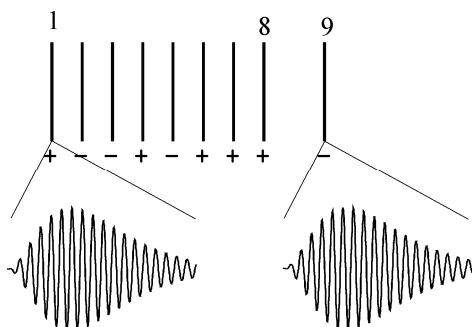
Sl. 8.3 Oblika impulza sistema LORAN-C

Vsi oddajniki verige oddajajo zaporedje skupin osmih zaporednih pulzov s ponavljalnim časom 1 ms, glavni oddajnik doda na koncu tega zaporedja še deveti pulz s časovno zakasnitvijo 2 ms. Te skupine pulzov so med seboj zakasnjene, najprej odda svojo skupino glavni svetilnik, nato zaporedoma s točno določeno zakasnitvijo še stranski oddajniki (Sl. 8.4).



Sl. 8.4 Zaporedje skupin pulzov verige svetilnikov sistema LORAN-C

Zakasnitve so takšne, da na ozemlju, ki ga pokriva veriga, ne more priti do prekrivanj skupin zaradi prostorskih zakasnitev valov. Cel cikel se ponavlja s skupinskim ponavljalnim časom (*Group Repetition Interval* - GRI), ki je za vsako verigo drugačen. Na podlagi tega časa lahko sprejemnik določi verigo, kateri pripada signal. Skupinski ponavljalni časi so v razredu 50 do 100 ms. Za medsebojno ločevanje svetilnikov pa je nosilni signal posameznih pulzov v okviru ene skupine fazno moduliran tako, da je za posamezen pulz bodisi v fazi, bodisi v protifazi z referenčnim nosilnim signalom (Sl. 8.5).



Sl. 8.5 Fazna modulacija posameznih pulzov v skupini

Tudi sistem LORAN-C ni nikoli pokrival cele Zemlje in zadnja leta upada tudi število delujočih verig. Še vedno pa deluje mnogo verig, predvsem pa je v rabi veliko število sprejemnikov, tako na ladjah, kot na letalih. Sistem zagotavlja natančnost razreda 1 km

Strnimo

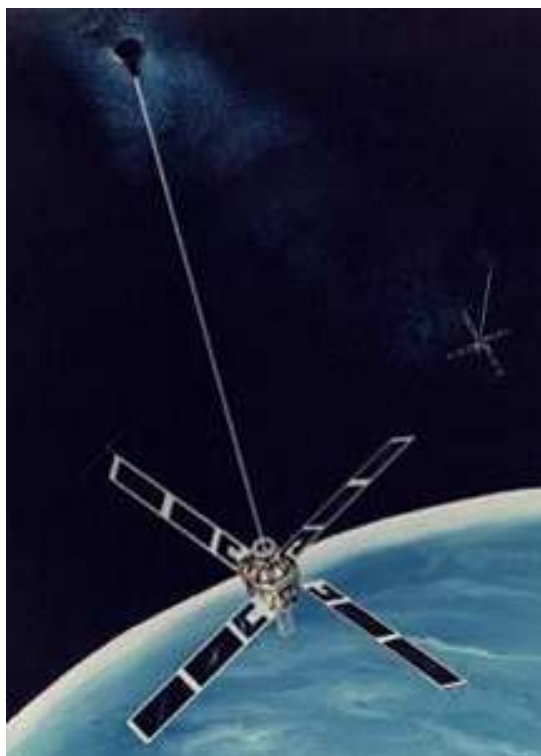
- **Razlika razdalj** se določa v sistemu LORAN-C grobo z merjenjem časov, bolj natančno pa z merjenjem faznih razlik med signali posameznih svetilnikov.
- **Ločevanje svetilnikov** omogoča sistem LORAN-C tako, da vsaka veriga oddaja skupine pulzov z značilnim skupinskim ponavljalnim časom, vsak oddajnik pa oddaja svojo skupino pulzov z značilnim zaporedjem fazno moduliranih nosilnih signalov posameznih pulzov.
- **Natančnost** sistema je reda 1 km.

8.3 Satelitski sistemi

8.3.1 Uvod (sistema Transit in Cikada)

Satelitski navigacijski sistemi so hiperbolični sistemi, ki omogočajo trirazsežno določanje položaja. Omenimo le najbolj znane, delujoča GPS in Glonass ter sistem Galileo v nastajanju. Svoj globalni sistem je začela uresničevati tudi Kitajska (Compass), Indija (IRNSS) načrtuje lokalni satelitski sistem za določanje položaja s kombinacijo geosinhronih in geostacionarnih satelitov (njena lega na zemeljski krogli je za tak sistem idealna!). Japonska (QZSS) pa načrtuje svoj regionalni sistem tako, da bodo štirje geosinhroni sateliti dopolnjevali sistem GPS na tak način, da bo eden izmed njih vedno v zenitu nad Japonsko. Ni naključje, da ima svoje sisteme pet največjih sil na svetu. Po eni strani je to stvar zelo velikih denarjev, po drugi pa očitno tudi prestiža. Šele ko država postane vesoljska sila (z vsem, kar sodi zraven), se utrdi tudi kot verodostojen sogovornik v svetovni politiki!

Toda zgodba satelitskega določanja položaja se je začela pred pol stoletja s sistemoma Transit (ameriški) in Cikada (sovjetski). Ti sateliti so imeli na krovu dva oddajnika s frekvencama 150 MHz in 400 MHz. Frekvenci sta izvedeni iz iste osnove in sta v natančnem razmerju 3:8. Podatki o tirnici so vtisnjeni na visokofrekvenčno nosilno frekvenco s fazno modulacijo PSK. Sateliti so bili na nizki tirnici okrog 1000 km, obhodna doba je bila približno 2 uri. Položaj sprejemnika se je izračunal iz podatkov merjenja Dopplerjeve frekvence na visokofrekvenčnem signalu in znane lege satelita. Računanje ni bilo trivialno (pred petdesetimi leti so bile zmogljivosti računalnikov nekoliko drugačne od današnjih!), v principu pa je potekalo tako, da je računalnik iz enačb (8.2) z znano tirnico satelita (in znanem vektorju lastne hitrosti) poiskal po metodi najmanjših kvadratov položaj, ki se je najbolje ujema s funkcijo spreminjanja Dopplerjeve frekvence v odvisnosti od časa.



Sl. 8.6 Satelit Transit

Omejitev sistema je bila, da je bilo treba običajno čakati nekaj časa na ugodno lego satelita, sama meritev pa je morala teči nekaj minut, da je bilo izmerjenih dovolj podatkov za določitev položaja.

8.3.2 Sistem NAVSTAR-GPS

Sistem NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time and Ranging, Global Positioning System* NAVSTAR-GPS) je globalni hiperbolični navigacijski sistem, ki s sistemom svetilnikov na satelitih pokriva celo Zemljo in omogoča tridimenzionalno določanje lastnega položaja. Na kratko ga običajno imenujemo kar GPS. Tridimenzionalno hiperbolično določanje položaja smo opisali v poglavju 4.5. Sistem satelitskih svetilnikov ima med seboj sinhronizirane cezijeve ure. Napišimo še enkrat sistem enačb za določanje položaja, ki jih poznamo že iz poglavja 4:

$$r_1 - r_2 = \Delta t_{12}c = k_{12}$$

$$r_1 - r_3 = \Delta t_{13}c = k_{13}$$

$$r_1 - r_4 = \Delta t_{14}c = k_{14}$$

Razdalje r so razdalje od našega položaja do satelitov 1, 2 in 3. Kot že vemo, so to enačbe treh rotacijskih hiperboloidov, katerih skupna točka (presečišče) je položaj P.

Vendar se določanje položaja s sistemom GPS pogosto tolmači malo drugače, poglejmo kako. Če bi vsak sprejemnik imel točno uro (to je uro, sinhronizirano s sistemsko uro satelitov), bi lahko določil svoj položaj le iz signalov treh satelitov, saj bi lahko oddaljenost od posameznih satelitov izmeril z

merjenjem časa prispetja signala s svojo točno uro in mu ne bi bilo treba meriti časovnih razlik. Enačbe bi bile:

$$r_1 = t_1 c$$

$$r_2 = t_2 c$$

$$r_3 = t_3 c$$

Vemo, da je dovolj točna ura le cezijeva ura. Toda vzemimo, da ima sprejemnik uro, ki sicer ni točna, je pa natančna. Pogrešek ure se sicer s časom spreminja, v času ene meritve pa je približno konstanten, če je le ura dovolj natančna (za naše potrebe je dovolj natančna vsaka kvarčna ura s stabilnostjo 10^{-8}). Naj ima torej ura pogrešek Δt in naj kaže čas t' , točen čas t bo torej $t = t' - \Delta t$. S tako uro lahko izmerimo čase prispetja signalov posameznih svetilnikov in napišemo ustrezne enačbe

$$r_1 = (t'_1 - \Delta t) c$$

$$r_2 = (t'_2 - \Delta t) c$$

$$r_3 = (t'_3 - \Delta t) c$$

Če bi poznali pogrešek Δt , bi lahko zelo enostavno določili naš položaj, ta je v presečišču treh krogel s polmeri r_1 , r_2 in r_3 in središči v satelitih 1, 2 in 3. Tega pogreška sicer ne poznamo vnaprej, lahko pa ga določimo tako, da dodamo še meritev četrtega satelita. Tako dobimo sistem štirih enačb s štirimi neznankami (trema neznanimi oddaljenostmi in enim neznanim časovnim pogreškom sprejemnikove ure):

$$r_1 = (t'_1 - \Delta t) c$$

$$r_2 = (t'_2 - \Delta t) c$$

$$r_3 = (t'_3 - \Delta t) c$$

$$r_4 = (t'_4 - \Delta t) c$$

(8.1)

Sistem GPS lahko torej tolmačimo kot sistem določanja položaja s pomočjo presečišča treh krogel (denimo prve tri enačbe), četrti satelit pa potrebujemo za sinhronizacijo svoje ure. Sistem enačb tudi dejansko rešujemo po takšnem algoritmu. Premislimo najprej, kaj pomenijo enačbe (8.1), če v njih nastopa pravi, in kaj, če nastopa napačni pogrešek. Enačbe pomenijo štiri krogle, pri pravem času se sekajo v isti točki - merjenem položaju, sicer pa presečišče tvori nekakšno piramido, katere ploskve so krogelne kapice (Ekvivalent temu v dveh dimenzijah smo spoznali pri določanju položaja z dvema razdaljama). Torej predpostavljajmo najprej, da je naša ura točna, rešimo sistem enačb in izračunajmo razdalje do satelitov, ki pa še niso prave (ker ura ni točna). Te razdalje se imenujejo psevdorazdalje. V naslednjih korakih reševanja spreminjamo Δt , dokler se vse krogle ne sekajo v eni točki. Takrat nam

dajo enačbe prave razdalje in pravi položaj, pa še ura v sprejemniku je natančno sinhronizirana¹. Ker je satelitski čas enostavno pretvoriti v 'uradni zemeljski čas' (*Coordinated Universal Time* - UTC), je stranski rezultat določanja položaja tudi natančen čas (*Navigation System with Time and Ranging!*). Pri računanju naslednjega položaja izhajamo iz prejšnjega urinega pogreška, kar je seveda zelo dober približek, saj se pogrešek od meritve do meritve zelo malo spremeni.

Ko že poznamo svoj položaj, lahko določimo še svojo hitrost z merjenjem Dopplerjeve frekvence. Za Dopplerjevo frekvenco je merodajna radialna hitrost, ker se gibljeta oddajnik in sprejemnik, je merodajna relativna radialna hitrost. V vektorski obliki lahko enačbo za Dopplerjevo frekvenco napišemo takole:

$$\mathbf{1}_i \cdot (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_p) = -c \frac{f_{Di}}{f_0} \quad (8.2)$$

$\mathbf{1}_i$ pomeni smerni vektor i-tega svetilnika, \mathbf{v}_i in \mathbf{v}_p sta (vektorski) hitrosti i-tega satelita in položaja, f_{Di} je Dopplerjeva frekvenca, f_0 pa nosilna frekvenca. To enačbo lahko 'kombiniramo' tudi za dva satelita.

Sateliti sistema GPS krožijo v krožnicah v ravninah, ki so nagnjene na ekvatorialno ravnino za 55°. Teh ravnin (in krožnic) je 6, nanizane so okrog Zemlje na vsakih 60°. V vsaki krožnici so 4 sateliti, skupaj torej 24 satelitov. Lega satelitov zagotavlja, da so vsak trenutek na vsaki točki Zemlje vidni najmanj štirje sateliti. Sateliti so na višini 20000 km, kar pomeni obhodno dobo 12 ur.

¹ Natančnih ur nikoli ne sinhroniziramo tako kot stenske ali ročne ure, ki jim premaknemo njihove kazalce v pravo lego in jih tako 'prisilimo', da kažejo točen čas, temveč tako, da 'na uro pripnemo listek s pogreškom'. Če spomnimo na kronometer iz Uvoda: vsak kronometer je bil varno shranjen v leseni škatli, obloženi z žametom. H kronometru je spadal tudi njegov dnevnik, v katerega je kapitan vpisal njegov pogrešek, ki ga je določil z natančnim merjenjem časa ob vsaki priložnosti, ki se je ponudila.



Sl. 8.7 Satelit sistema GPS

Del sistema GPS je tudi kontrolni sistem na Zemlji, ki ga sestavljajo opazovalne postaje in nadzorna postaja. Opazovalne postaje so razporejene po vsej Zemlji in s svojimi sprejemniki iz satelitskih signalov nenehno določajo svoj položaj. Vsaka od teh postaj ima tudi svojo atomsko uro. Položaj teh postaj je seveda natančno znan in rezultati njihovih meritev služijo za to, da iz njih določajo natančen položaj posameznih satelitov na njihovih krožnicah in pogrešek satelitskih ur. Zbrane podatke nato nadzorna postaja pošilja satelitom, tako da vsak satelit vedno natančno pozna svoj položaj na krožnici in pogrešek svoje ure.

Vsak satelit ima svojo atomsko uro (pravzaprav za rezervo več ur) in računalnik. Nenehno oddaja natančne podatke o svoji dejanski tirnici (kot popravek referenčne tirnice) in o pogrešku svoje ure. Oba podatka sta ključna pri določanju položaja, saj ta sloni na poznavanju lege svetilnika (satelita) in časa oddaje signala. Oddaja pa tudi približne podatke o legi in stanju vseh ostalih satelitov (almanah). Tako lahko sprejemnik hitro izbere najugodnejše satelite za določanje položaja in ne upošteva podatkov pokvarjenih satelitov.

Oglejmo si na kratko še, kako satelit oddaja podatke v signalu. Za osnovo vseh signalov služi referenčni oscilator s frekvenco 10,23 MHz, ki je krmiljen z atomsko uro. Iz tega se pridobi s frekvenčnim množilnikom signala nosilnih frekvenc L1($154 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz}$) in L2 ($120 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz}$).

Satelit oddaja podatke z bitno hitrostjo 50 bit/s. Ta niz podatkov pred oddajo pomnoži še s psevdonaključnim zaporedjem bitov - kodo. Vsak satelit uporablja dve kodi, kodo C/A (*Coarse/Acquisition*) in kodo P (*Precision*). Koda C/A je psevdonaključno zaporedje 1023 bitov s

hitrostjo 1,023 Mbit/s (torej se ponovi na 1 ms), ki je objavljena in namenjena vsem uporabnikom. Vsi sateliti oddajajo na istih frekvencah L1 in L2, sprejemnik med seboj loči signale različnih satelitov s pomočjo kode¹. Koda P vsebuje bistveno daljše zaporedje s hitrostjo 10,23 Mbit/s. Tudi ta koda je objavljena, omogoča pa bolj natančno navigacijo kot koda C/A, vendar v bistvu ni namenjena vsem, saj jo sistem lahko kadarkoli spremeni v neobjavljeno kodo Y (*anti spoofing*). Podatki, kodirani s kodo P, se z binarno fazno modulacijo (*binary phase shift keying*, BPSK) vtisnejo na nosilni signal L1 in L2. Podatki, kodirani s kodo C/A, pa se z binarno fazno modulacijo vtisnejo na kvadraturni nosilni signal L1, to je na signal, ki je proti signalu L1 v fazi premaknjen za 90°.

Sprejemnik najprej na frekvenci L1 z različnimi kodami C/A išče primeren satelit. Ker je zaporedje kratko (kot smo rekli, se koda ponavlja na 1 ms), se lahko 'uglasi' v razumnem času. Iz tega satelita lahko potem dobi podatke še o drugih satelitih (cikel oddaje enega okvirja z natančnimi podatki o satelitu traja 30 sekund, almanah pa se oddaja razdeljen na zaporedne okvirje). Nato poišče še primerne druge satelite in izmeri časovne razlike. Sodobni sprejemniki so seveda večkanalni, tako da potem, ko se enkrat uglasijo na zaporedne satelite, sprejemajo in obdelujejo signale večih satelitov hkrati in ne drugega za drugim. No, za večino civilnih uporabnikov se zgodba tukaj konča.

Priviligirani (beri vojaški!) uporabniki pa se lahko na obeh frekvencah uglasijo še na kodo P. Ta jim zagotavlja bolj natančno merjenje razdalj, ker se prenaša z desetkrat večjo bitno hitrostjo kot koda C/A. Ker se ta koda ponavlja z bistveno večjo periodo kot koda C/A, se sprejemnik najprej uglesi na kodo C/A, iz katere pridobi grobo sinhronizacijo za kodo P, nato pa se lahko hitro sinhronizira še na kodo P. Ko pa se sinhronizira še na kodo P, lahko iz razlik med časi, izmerjenimi na frekvencah L1 in L2 iz modela določi trenutne lastnosti ionosfere in to upošteva pri izračunu položaja.²

Ker so signali nosilnih frekvenc vseh satelitov med seboj sinhroni (saj so sinhronizirani z atomskimi urami in popravki!), se lahko **za zelo natančno določanje položaja uporablja tudi merjenje faznih razlik**. Ker je valovna dolžina signala 20 cm, mora biti zaradi večličnosti faze položaj že določen do tega pogreška natančno. Ena možnost je, da nas zanima položaj, določen relativno na začetni položaj. S

¹ Postopek ločevanja se imenuje kodni multipleks. Pred oddajo se informacijski podatki seštejejo s kodo po modulu 2. Pri sprejemu se ta oddani niz spet sešteje s kodo po modulu 2. Če sta kodi med seboj enaki, dobimo po tem postopku na sprejemni strani spet originalni niz informacijskih podatkov, lahko bi rekli, da je sprejemnik 'uglašen' na kodo oddajnika, podobno kot je pri frekvenčnem multipleksu 'uglašen' na frekvenco oddajnika. Če pa kodi med seboj nista enaki, je rezultat le 'presluh' med kodama. Kode morajo biti izbrane tako, da je presluh med njimi čim manjši. Če presluha med njimi ni, rečemo da so kode med seboj ortogonalne. Kode C/A so določene tako, da je presluh med njimi -21,6 dB

² Za nove satelite GPS je predvideno, da bodo kodo C/A oddajali tudi na frekvenci L2. Tako bodo lahko tudi civilni uporabniki pri določanju položaja upoštevali vpliv ionosfere.

pomočjo merjenja faznih razlik lahko torej zelo natančno merimo relativne zaporedne položaje premikajočega sprejemnika. Če na kakršenkoli način enako natančno določimo tudi začetni položaj, poznamo seveda z enako natančnostjo vse zaporedne položaje.

Za natančno določanje položaja se lahko uporablja tudi **diferencialni sistem GPS**. Ideja je zelo preprosta: en sprejemnik na znanem položaju meri svoj položaj s pomočjo sistema GPS in iz razlike med dejanskim in izmerjenim položajem izračuna pogrešek sistema GPS. Ostali sprejemniki lahko pri določanju svojega neznanega položaja ta pogrešek upoštevajo kot popravek merjenega položaja. Pri tej metodi privzamemo, da so pogreški za vse sprejemnike enaki, to pa velja za sprejemnike, ki so blizu skupaj in pri določanju položaja uporabljajo iste satelite.

Poglavitni viri pogreškov so: netočne ure in podatki o krožnicah, odbiti valovi, vpliv troposfere in ionosfere na razširjanje valov in neugodna lega satelitov. Od vseh naštetih povzroča največji pogrešek vpliv ionosfere in neugodna lega satelitov. Vplivu ionosfere se civilni uporabniki pravzaprav ne morejo izogniti, na izbiro satelitov pa praviloma lahko vplivajo. Zato se je treba izogibati izbiri štirih satelitov v eni ravnini ali dveh satelitov v približno isti smeri.

Strnimo:

- **Razlika razdalj** se določa v sistemu GPS praviloma z merjenjem časovnih razlik. Zelo natančno se položaj lahko meri z merjenjem faznih razlik med signali posameznih svetilnikov.
- **Ločevanje svetilnikov** omogoča sistem GPS tako, da satelite loči med seboj s kodnim multipleksom
- **Natančnost** sistema za čas integracije 1s je za civilne uporabnike, ki uporabljajo kodo C/A, v horizontalni smeri v razredu nekaj 10 m, v vertikalni pa zaradi vpliva ionosfere nekoliko slabša.

8.3.3 Sistem GLONASS

Sovjetska zveza je razvila satelitski hiperbolični navigacijski sistem GLONASS. Po nekajletnih težavah po razpadu Sovjetske zveze je sistem sedaj operativen in je dobrodošla dopolnitev sistema GPS.

Zasnova je zelo podobna zasnovi sistema GPS. Sateliti oddajajo informacijski signal C/A in P na dveh frekvencah, L1 in L2, ki sta 1610 in 1250 MHz. Razlika je, da vsi sateliti oddajajo isto kodo, vendar vsak na svoji oddajni frekvenci, sistem torej za ločevanje kanalov ne uporablja kodnega, temveč frekvenčni multipleks. Orbite in obhodne dobe satelitov so malo drugačne kot pri sistemu GPS. Orbite zagotavljajo večjo natančnost določanja višine položaja pri večjih zemljepisnih širinah, obhodne dobe pa so izbrane tako, da so tirnice satelitov bolj stabilne od tirnic satelitov GPS in je potrebnih manj popravilanj.

Zaradi podobnosti sistemov GPS in GLONASS so mnogi sprejemniki narejeni tako, da omogočajo navigacijo po obeh sistemih in tako povečajo natančnost določanja položaja.

8.3.4 Sistem GALILEO

Je bodoči evropski sistem, s katerim bo Evropa postala neodvisna od ZDA pri civilni navigaciji in merjenju časa. Zaenkrat je v načrtovanju, v načelu pa bo zelo podoben sistemu GPS.

Načrtovana je takšna natančnost, da bo zadostovala za pristajalne sisteme in za določanje položaja na cestah.

8.4 Literatura

- [1] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994
- [2] D. Matko in drugi, *Uporaba vesoljskih tehnologij*, Didakta, Ljubljana 1996
- [3] M. Kayton, W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Willey&Sons, 1997
- [4] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

9. Pristajalni sistemi

Letalo mora med pristajanjem leteti po pravilni pristajalni poti, to je v pravilni smeri (pristajalni kurz, azimut) in pod pravilnim vertikalnim kotom (drsni kot, elevacija). Pristajalni kurz definira ravnino pristajalnega kurza, to je vertikalna ravnina, ki leži v osi pristajalne steze. Drsni kot definira ravnino drsnega kota, ki leži pravokotno na ravnino pristajalnega kurza, običajno pod kotom 3° na vodoravno ravnino. Presečišče teh ravnin je idealna ali referenčna pristajalna pot. Letalo mora seveda pristati tudi s pravilno hitrostjo, torej mora pilot vzdolž pristajalne poti poznati tudi hitrost letala. Hitrost in višino praviloma določa letalo s svojimi instrumenti avtonomno, ali se letalo v resnici približuje stezi po idealni pristajalni poti, pa ocenjuje pilot vizualno in s pomočjo instrumentov in na koncu tudi pristanek izvede vizualno. Za takšen pristanek pa mora pilot videti stezo nekaj kilometrov daleč, sicer je za 'poravnavo' letala na pravo pot premalo časa. V pionirskih časih letalstva je moralo zato letalo v megli ali dežju odleteti k pristanku na alternativno letališče. Tako početje bi bilo v dobi gostega letalskega prometa zamudno in negospodarno, zato danes letala tudi v pogojih zmanjšane vidljivosti pri pristajanju vodijo po pristajalni poti pristajalni sistemi. Ti sistemi so poznani pod popularnim imenom 'sistemi za slepo pristajanje'. Pristajalni sistem vodi letalo do določene točke, 'točke odločitve'. Če pilot na točki odločitve še vedno ne vidi steze, mora pristanek odložiti in preleteti letališko stezo, sicer pa od te točke naprej prevzame vodenje letala na podlagi optične vidljivosti. Nekateri sistemi omogočajo vodenje letal prav do stika s tlemi, tudi brniško.

Večina letališč in letal je opremljena z napravami sistema ILS (*instrumental landing system*). Sistem je razmeroma zapleten in že kar zastarel. Vendar deluje in zamenjava bi bila neznansko draga, zato si ga bomo kljub zastarelosti ogledali v naslednjem poglavju.

Za zgled pa si bomo ogledali tudi zasnovo modernega pristajalnega sistema, ki je pravo nasprotje prej omenjenega ILS: je 'mrtvorajeno dete' in nima prav nikakršnih možnosti za uspeh. Vendar je tehnično zanimiv in (vsaj za opis) zelo preprost. To je pristajalni sistem MLS.

Bodočnost pristajalnih sistemov pa so satelitski navigacijski sistemi. Sistem Galileo ni namenjen zgolj navigaciji in merjenju časa, temveč bo služil tudi kot pristajalni sistem.

9.1 Sistem ILS

Najbolj razširjen pristajalni sistem je sistem ILS (*instrumental landing system*). Z oddajanjem primerno moduliranega signala s primerno usmerjenimi antenami na letališču definira:

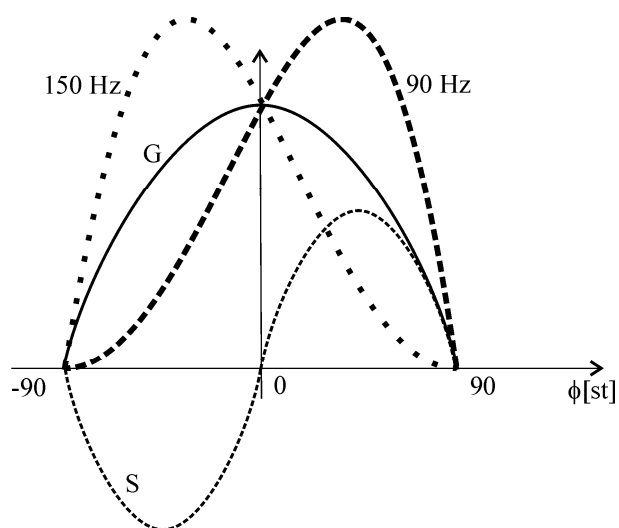
- **ravnino pristajalnega kurza,**
- **ravnino drsnega kota in**

- **značilne točke** na pristajalni poti (dve ali tri)

in s tem idealno ali referenčno pristajalno pot. Za vsako izmed opisanih nalog je na letališču poseben sistem naprav.

Naprave ILS omogočajo pristanek v treh kategorijah. Pri prvi kategoriji (ILS CAT-I) je točka odločanja na višini 60 m, pri drugi kategoriji (ILS CAT-II) na višini 30 m, tretja kategorija pa omogoča vodenje do stika s pristajalno stezo (ILS CAT-III). Za točko odločanja je merodajna naprava ILS na letališču, oprema pristajajočega letala in usposobljenost posadke letala. V drugi kategoriji lahko pristajajo le letala z radijskim višinomerom, v tretji pa le letala z najmanj dvema radijskima višinomeroma.

Ravnino pristajalnega kurza določa oddajnik na frekveni 108 do 112 MHz, to je na enakih frekvencah, na katerih delujejo oddajniki VOR in DVOR. Oddajnik oddaja na dveh antenah, na glavni in stranski anteni. Glavna antena (Sl. 9.1) ima glavni snop v obliki osmice, torej kosinusni smerni diagram, na sliki je vrisan samo naprej usmerjen snop sevalnega diagrama s celo črto in označen z G. Glavna antena seva nosilni signal in bočna pasova amplitudne modulacije frekvenca 90 in 150 Hz. Stranska antena ima sevalni diagram v obliki 'ozke osmice' ali štiriperesne deteljice, njen naprej usmerjeni del smernega diagrama je narisana na sliki s črtkano črto in označen s črko S. Ker bomo seštevali polja, povzročena z obema antenama, moramo spet, podobno kot v poglavju 6.6, upoštevati tudi predznak povzročene polja. Stranska antena je napajana z bočnima pasovoma amplitudne modulacije frekvenca 90 Hz z enako fazo kot glavna antena. Daljnje polje se zato sešteva, smerni diagram obeh anten skupaj je za ta signal na sliki narisana s krepko črtkano črto s pripisom '90 Hz'. Z bočnima pasovoma amplitudne modulacije frekvenca 150 Hz pa je stranska antena napajana z nasprotno fazo kot glavna antena. Daljnje polje bočnih pasov se zato med seboj odšteva, sevalni diagram je za ta signal na sliki narisana s krepko pikčasto črto s pripisom '150 Hz'.



Sl. 9.1 Smerni diagram anten za definiranje ravnine pristajalnega kurza.

V sprejemniku je treba le ugotoviti, kateri signal ima večjo stopnjo modulacije. Če je večja 90 herčna modulacija, je letalo levo od pristajalne steze, sicer pa desno. Kadar sta obe stopnji modulacije enaki, je letalo naravnano natančno v idealni smeri pristajanja. S primerno izbiro sevalnih diagramov in moči dobimo področje med $\pm 10^\circ$, za katero velja linearen odnos med stopnjo modulacije in odklonom letala iz pravilne smeri pristajanja. To področje se imenuje področje kurza in na njem je možno meriti odklon. Območje večjih kotov (od $\pm 10^\circ$ do $\pm 35^\circ$) je področje orientacije, v tem področju natančno merjenje ni mogoče, se je pa možno orientirati. Antene sevajo z zmanjšano močjo tudi nazaj, tako je mogoča orientacija tudi pri zgrešenem pristanku, ko letalo preleti pristajalno stezo. Sistem anten oddajnika za določanje pristajalnega kurza je nameščen na koncu pristajalne steze. Sistem anten brniškega letališča je na spodnji sliki (Sl. 9.2).



Sl. 9.3 Antene oddajnika za določanje pristajalnega kurza na brniškem letališču.

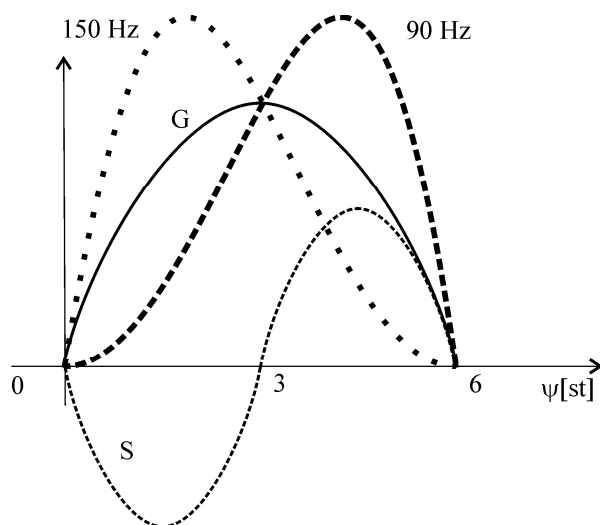
Ravnino drsnega kota določa oddajnik na frekvenci 328 do 336 MHz. Zasnova definiranja drsnega kota je enaka kot zasnova definiranja kurza, to je od kota odvisna stopnja modulacije na frekvencah 90 in 150 Hz. Vendar bi bilo zaradi vpliva zemljinega površja nemogoče realizirati potrebna smerna diagrama obeh anten. Zato vpliv površja izkoristimo za oblikovanje smerne diagrama. V poglavju 3.1 smo videli, da je polje nad ravno površino zemlje podano z

$$E \propto \sin\left(\beta H_1 \frac{H_2}{D}\right)$$

Ulomek $\frac{H_2}{D}$ je azimut sprejemnika, torej drsni kot bližajočega letala. Smerni diagram (izotropne) antene, ki je nameščena na višini H_1 , je torej podan z

$$F = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} H_1 \psi\right).$$

Da bo vse delovalo smiselno enako kot pri sistemu za definiranje ravnine pristajalnega kurza, mora imeti glavna antena prvi maksimum pri drsnem kotu pristajanja, stranska pa pri polovičnem drsnem kotu. Oglejmo si (Sl. 9.4) primer, ko je kot pristajanja 3° , kar je običajno.



Sl. 9.4 Smerni diagram anten za definiranje ravnine drsnega kota ψ

Vse povedano o signalih glavne in stranske antene pri definiranju kurza velja tudi pri definiranju ravnine drsnega kota.

Poglejmo si še, na kakšni višini morata biti nameščeni glavna in stranska antena. Glavna mora imeti prvi minimum pri kotu $\psi=6^\circ$, torej $H_1 = \frac{\lambda}{2\psi} = 4,3 \text{ m}$, stranska pa pri kotu $\psi=3^\circ$, torej na višini 8,6 m (glej tudi Zgled 2). Anteni sta nameščeni 180 m levo od osi pristajalne steze na taki razdalji od začetka steze, da je ravnina drsnega kota na začetku steze na višini 6 m. Za drsni kot 3 stopinje je ta razdalja 115 m.

Na fotografiji (Sl. 9.5) je vidna še tretja antena, ki služi za popraviljanje oblike smerne diagrama glavnega snopa.



Sl. 9.5 Oddajna antena ravnine drsnega kota

Za označevanje značilnih točk služijo **označevalniki**, ki so nameščeni na tleh v osi letališke steze. Označevalnik je oddajnik, ki oddaja signal naravnost navzgor. Smerni diagram antene označevalnika je ozek vzdolž pristajalne poti in širok prečno na pristajalno pot. Sprejemnik v letalu, ki leti nad njim, zazna signal in s tem potrdi, da je letalo preletelo določeno točko. Včasih so se uporabljali za označevanje karakterističnih točk (križišča, zavoji, priključki) na letalskih poteh. Vendar so očitno uporabni le v primeru, ko letalo leti po pravi poti (kurzu). Kadar letalo ni na pravi poti, bo zgrešilo označevalnik in tako ne bo moglo potrditi svojega položaja. Zato uporabo v ta namen opuščajo, saj je sedaj na razpolago več drugih sistemov, ki omogočajo zvezno določanje položaja in ne le potrditev preleta določene točke. Še vedno pa se uporabljajo v sklopu pristajalnega sistema ILS. Oddajniki oddajajo signal nosilne frekvence 75 MHz, ki je amplitudno moduliran s signalom frekvence 400, 1300 ali 3000 Hz. Ko sprejemnik preleti označevalnik in zazna signal, prižge glede na modulacijsko frekvenco modro, rumeno ali belo kontrolno lučko. Prvi, zunanji označevalnik, je nameščen 7200 m pred pristajalno stezo, njegova frekvenca je 400 Hz, drugi, osrednji je nameščen 1050 m pred stezo, njegova frekvenca je 1300 Hz. Tretji, notranji je nameščen 75 m pred stezo, njegova frekvenca je 3000 Hz. Ko torej letalo preleti prvo točko, se prižge modra lučka, nato rumena in še bela. Tretji, notranji označevalnik, se opušča in se v bližini letališč uporablja za druge namene. Na brniškem letališču služi pri zgrešenem pristanku za označitev zavoja v podaljšku pristajalne steze pri kraju Šenčur (Sl. 9.6).



Sl. 9.6 Označevalnik sistema ILS letališča Brnik

Večina letališč s pristajalnim sistemom ILS ima za določanje oddaljenosti letala pri pristajanju še dodatno nameščen sistem DME/P, opisan v poglavju 7.3, katerega antena je na istem mestu kot antena za določanje drsnega kota.

Pri pristajanju s sistemom ILS mora letalo najprej prileteti v pravi smeri na začetek pristajalne poti, to stori z uporabo daljinskih navigacijskih sistemov (NDB, VOR, DME). Ker so ti sistemi premalo natančni za pristajanje, bo letalo priletelo na pristajalno pot praviloma 'izmaknjeno'. Nato bo vključilo sistem ILS, katerega sprejemnik je povezan z instrumentom, ki kaže odstopanje lege letala od idealne pristajalne poti, ki jo definira sistem ILS. Poglejmo primer, da se letalo bliža stezi pod kotom, ki je večji od kota, ki ga definira pristajalni sistem. V tem primeru bo sprejemnik drsnega kota ugotovil, da je stopnja modulacije 90 herčnega signala večja od stopnje 150 herčnega signala, kar z drugimi besedami pomeni, da letalo leti previsoko. Če se obenem letalo bliža stezi z desne, bo sprejemnik kurza ugotovil, da je stopnja modulacije 150 herčnega signala večja od stopnje 90 herčnega signala. Instrument bo zato kazal, da je letalo desno in previsoko (Sl. 9.7 a). Ko pilot poravna letalo v pravo smer, kaže instrument tako, kot prikazuje slika b). Na to, kako blizu stezi je letalo, opozarjajo kontrolne lučke.



Sl. 9.7 Prikazovalnik sprejemnika ILS

Pristajalni sistem ILS je že star. Njegova poglobljena pomanjkljivost je, da definira le eno pristajalno pot in zato omogoča le pristanek po tej poti, ki pa ni optimalna za vsa letala in tudi ne za vse smeri doleta letal. Odbiti valovi od okolice povzročajo tudi spremembo stopnje modulacije in s tem velike pogoške vodenja pri pristanku. Zato je bil kasneje razvit sodobnejši sistem s popolnoma drugačno zasnovo, to je sistem MLS.

9.2 Mikrovalovni pristajalni sistem MLS

Mikrovalovni pristajalni sistem MLS (*microwave landing system*) deluje na frekvenci 5 GHz. Sam sistem zagotavlja določanje kurza in elevacije, oddaljenost pa meri sistem DME/P (7.3). Sistem deluje v časovnem multipleksu. Oddajnik na letališču oddaja informacijo v posameznih blokih, modulacija je DPSK, hitrost prenosa podatkov je 15625 bitov na sekundo. V posameznih blokih so različne splošne informacije o samem konkretnem sistemu MLS, o letališču in pa informacija o tem, katera funkcija sistema MLS sledi v okviru bloka. Vse te informacije oddaja neusmejena antena. Nato sledi definirano dolg odmor v oddajanju moduliranega signala. V tem odmoru sistem oddaja nemoduliran signal iz antene z elektronsko krmiljenim snopom. Oddajna antena tega signala je na istem mestu kot antena sistema ILS za ustrezno funkcijo. Če je funkcija definiranje kurza pristajanja, je torej oddajna antena v osi pristajalne steze na koncu steze. Glavni snop antene za to funkcijo ima v horizontalni ravnini širino 2° in v vertikalni ravnini širino nekaj 10° . Snop linearno s hitrostjo $20^\circ/\text{ms}$ preleti horizontalno ravnino v kotu od -40° do $+40^\circ$ in nazaj. Sprejemnik v letalu bo torej sprejel dva pulza nemoduliranega signala, iz časovne razlike med njima bo lahko izračunal natančen kurz pristajanja. Odboji od okolice so zakasnjeni in ne vplivajo na prvo fronto signala. Če je funkcija definiranje drsnega kota (elevacije) pristajanja, je oddajna antena levo od osi pristajalne steze v bližini začetka steze. Glavni snop ima sedaj po višini širino 2° in v horizontalni smeri širino nekaj deset stopinj. Snop linearno s hitrostjo $20^\circ/\text{ms}$ preleti vertikalno ravnino v kotu od 0° do $+20^\circ$ in nazaj. Sprejemnik v letalu bo spet sprejel dva pulza nemoduliranega signala, iz časovne razlike med njima bo lahko izračunal natančno elevacijo pristajanja. Sistem ima še nekaj dodatnih funkcij vodenja, ki so zanimive s stališča pristajanja, sicer pa delujejo na enak način kot že opisane funkcije.

Sistem omogoča v povezavi z ustreznim prikazovalnikom pristajanje po različnih pristajalnih poteh, tudi v zavoju.

Sistem je zelo drag in zaenkrat nameščen le na nekaj letališčih. Vse kaže, da se ne bo nikoli uveljavil, zato smo ga opisali le bežno.

9.3 Literatura

- [1] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994

- [2] M. Kayton, W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Willey&Sons, 1997
- [3] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006

10. Določanje položaja s sistemi mobilne telefonije

10.1 Določanje položaja

Sistem mobilne telefonije GSM že s svojo zasnovo omogoča približno določitev položaja sprejemnika. Sistem namreč mora vedeti, kje je domača lokacija mobilne postaje in kje se mobilna postaja nahaja v vsakem trenutku, tako zaradi učinkovitega vzpostavljanja zveze v in iz mobilne postaje, kot tudi zaradi obračunavanja storitve. Sistem ('Veliki brat?') torej natančno ve, na področju katere bazne postaje so posamezne mobilne postaje. Očitno je položaj določen tem bolj natančno, čim manjše so celice, torej v urbanih področjih.

Bolj natančno določitev položaja telefona omogoča uporaba podatka *Timing Advance* (TA). Ta podatek določa, koliko prej mora bazna postaja oddajati signal za zvezo s telefonom, da bo odgovor zaradi zakasnitve padel natančno na svoje mesto v časovnem multipleksu. V tem podatku se torej skriva oddaljenost telefona od bazne postaje, kar zelo izboljša natančnost določitve lokacije (znotraj določene celice je položaj na določeni krožnici). Pri prestopu iz ene v drugo celico je položaj kar dobro določen!

Nobena od doslej omenjenih metod ne zahteva nobene dodatne opreme, le nekaj računanja na strani ponudnika storitev mobilne telefonije.

Za metode, ki omogočajo bolj natančno določanje položaja mobilne postaje, pa je potrebna nadgraditev opreme in sicer na strani omrežja in na strani mobilnih postaj. Vse metode slonijo na merjenju zakasnitev signalov in določanju položaja po metodi dveh razdalj ali hiperbolični metodi, zato se v podrobnosti ne bomo spuščali, saj s stališča določanja položaja za nas niso nič novega.

Za konec povejmo še, da najbolj natančno določitev položaja mobilne postaje omogoča sprejemnik GPS, vgrajen v mobilno postajo, kar dandanes ni več nobena redkost. Tudi ta rešitev s stališča določanja položaja ni za nas nič novega. Podaja pa različne možnosti, če recimo uporabnik dovoli, lahko ponudnik storitev beleži njegov položaj, kar je zelo priročno, če se hribolazec na izletu izgubi ali ponesreči. Tudi poznavanje položaja, določenega z uporabo sistema GSM, lahko pripomore k hitrejši določitvi položaja sprejemnika GPS.

10.2 Literatura

- [1] A. Küpper, *Location-based Services*, John Willey & Sons, 2005

11.Sklep

Vse kaže, da gre razvoj določanja položaja v smer, ko bo lahko vsakdo svoj položaj s pomočjo satelitske navigacije določil s pogreškom razreda 1 m z napravo velikosti (in cene!) ročne ure.

Zato je gotovo, da se bodo veliki denarji vlagali v glavnem v vzdrževanje in razvijanje satelitskih sistemov. Vedno pa bo ostala vprašljiva zanesljivost takih sistemov, o čemer smo nekaj besed povedali že sproti. Kot vemo, nobena stvar ni popolnoma zanesljiva, zato zanesljivost povečamo s podvajanjem sistemov. Pri podvajanju je treba paziti predvsem na to, da delujejo podvojeni sistemi na različnih zasnovah, le tako izključimo možnost, da iz istega vzroka odpovedo vsi hkrati. Če recimo pohodniku odpove naprava GPS, bo pač po mobiju (če ni tudi v njem odpovedala baterija!) poklical pomoč. Najbolje pa je, da poleg rezervne baterije vzame s seboj tudi kompas in zemljevid. Jadranci okrog sveta, kapitani dolge plovbe in navigatorji medcelinskih poletov bodo zato morali poleg znanja odčitavanja položaja na sprejemniku GPS tudi v bodočnosti še dolgo obvladati tudi klasično določanje položaja s kompasom, natančno uro, Soncem, zvezdami, tablicami in sekstantom. Na tak način bodo določili svoj položaj sicer res le na nekaj kilometrov natančno, kar pa bo še vedno mnogo bolje kot nič, če bo odpovedal sistem satelitske navigacije.

12. Seznam virov fotografij

- Sl. 1.1 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Harrison%27s_Chronometer_H5.JPG
- Sl. 3.4 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Sigma_invader_RCS.png
- Sl. 5.1 http://www.100-jahre-radar.de/index.html?gdr_2_huelsmeyer.html
- Sl. 5.6 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/C-band_Radar-dish_Antenna.jpg
- Sl. 5.7 <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0a/Sarresrp.jpg>
- Sl. 6.5 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Adf_rmi.jpg
- Sl. 8.2 http://www.jproc.ca/hyperbolic/loran_a.html
- Sl. 8.6 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Transit-o.jpg>
- Sl. 8.7 <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/Navstar-2.jpg>
- Sl. 9.5 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/EDDV-ILS_09R_Glideslope.jpg

Ostale slike je narisal ali posnel avtor sam.

13. Priporočljivo branje

- [1] D. Hercog, *Prenosne poti v telekomunikacijah*, Založba FE in FRI, 1999
- [2] J. Budin, *Razširjanje radijskih valov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 1975
- [3] M. Vidmar, *Radiokomunikacije*, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2005
- [4] D. Kostevc, *Radarji in navigacijski sistemi*, Založba FERİ, Ljubljana 2006
- [5] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, International Edition 2001
- [6] A. Ludloff, *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [7] W. Mansfeld, *Funkortungs- und Funknavigationsanlagen*, Huethig, Heidelberg, 1994
- [8] D. Matko in drugi, *Uporaba vesoljskih tehnologij*, Didakta, Ljubljana 1996
- [9] M. Kayton, W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Willey&Sons, 1997