

INNEHÅLL

9	RADIOSYSTEM	3
9.1	Allmänt	3
9.1.1	Historik	3
9.1.2	Användning av radionavigeringssystem	3
9.1.3	Frekvenser och vågutbredning	4
9.1.4	Antenner	5
9.2	Pejlar och homing	7
9.2.1	Allmänt	7
9.2.2	Markpejl	8
9.2.3	Flygburen pejl ADF	9
9.2.4	Homing, Anitafyrar	10
9.3	System för bäringsmätning	11
9.3.1	Allmänt	11
9.3.2	Talfyrar	12
9.3.3	Consol	13
9.3.4	VOR	16
9.3.5	TACAN	20
9.4	Avståndsmätning	22
9.4.1	Allmänt	22
9.4.2	TACAN och DME	23
9.4.3	PN-systemet (Barbro, Anita och Anna)	26
9.4.4	Avståndsmätning med stabila oscillatorer	27
9.5	Hyperbelsystem	27
9.5.1	Allmänt	27
9.5.2	Decca	28
9.5.3	Loran A	31
9.5.4	Loran C	33
9.5.5	Omega	35
9.6	Satellitesystem	38
9.6.1	Allmänt	38
9.6.2	Funktion	40

9 RADIOSYSTEM

9.1 ALLMÄNT

9.1.1 Historik

Den första betydelsen som flygburen radio fick för navigering var att man kunde informera navigatören eller flygföraren om vädret längs flygbanan. Den gradvisa utvecklingen av riktad radioutrustning gjorde det möjligt att börja utnyttja radio för att bestämma riktningar till olika punkter. Dvs man kunde bestämma ortlinjer som dock till en början var behäftade med stor osäkerhet.

Andra världskriget medförde en kraftig utveckling för olika slags radiosystem. Grundprinciperna för flera av dagens radionavigeringssystem härrör från denna tid. Den snabba ökningen av flygtrafiken efter andra världskriget nödvändiggjorde användningen av radionavigeringshjälpmedel för att säkerställa flygning under dåliga väderförhållanden och minska kollisionsrisken.

Till en början utnyttjades samma flygburna radioutrustning både för kommunikation och navigering. Efterhand som behoven ökade infördes separata utrustningar för de olika funktionerna samtidigt som dessa specialiserades och nya funktioner tillkom såsom identifierings-, landningshjälp etc. I och med denna uppdelning i specialfunktioner med speciell utrustning har systemen och då inte minst navigeringssystemen förbättrats avsevärt. Det har varit möjligt att välja lämpliga frekvensområden och signalmönster så att noggrannheten blivit hög och risken för interferens och störning blivit liten.

Tyvärr har denna utveckling inte kunnat fortgå helt optimalt. Utvecklingen av nya system har styrts av kravet på kompatibilitet med befintlig utrustning, vilket har medfört begränsningar vid val av frekvens och signalkarakteristik. Stora ekonomiska intressen står på spel vid införandet av nya system. Ny utrustning av flygplan i tjänst är dyrbar, tidsödande och besvärlig. Därför har i stället i första hand förbättringar inom ramen för existerande system genomförts.

9.1.2 Användning av radionavigeringssystem

Radionavigeringshjälpmedlen har alltsedan de började att användas utnyttjats till att bestämma position eller åtminstone ortlinjer. Man har försökt att bygga upp system som möjliggör fullständig positionsfixtagning momentant eller med ett antal snabba successiva mätningar. Man har därvid eftersträvat att flygplanet endast skall ha *en* utrustning och helst en utrustning som är så enkel och föga kostnadskrävande som möjligt. Långdistanssystemet på långväg och mellanväg ansluter väl till denna bild med en mottagare till ganska låg kostnad i flygplanen och ett dyrbart marksystem. Marknätet har ett utseende som medger kontakt med flera stationer och därmed fullständig positionsbestämning i de flesta punkter.

Kortdistanssystemen på VHF och UHF har för att inte antalet markstationer skall bli orimligt stort fått en annan utformning. Positionsbestämningen sker mot en markstation i form av avstånds- och riktningbestämning. Detta har inneburit antingen ganska komplexa flygutrustningar typ TACAN eller kombinerade system på två frekvenser typ VOR/DME.

En utveckling som har börjat och som med stor säkerhet kommer att fortsätta

är att en fullständig positionsbestämning inte längre utförs vid ett tillfälle. En förutsättning för detta är automatiska navigeringsberäkningar i en digital dator samt ett dödräkningssystem. Genom successiva ortlinjebestämningar kan felet i dödräkningssystemet begränsas och minskas. Denna utveckling har medfört att det blivit mera meningsfullt att förse flygplan med radiosystem som ger enbart ortlinjer t ex bäringar *eller* avstånd och inte nödvändigt bådadera.

9.1.3 Frekvenser och vågutbredning

I avsn 3.5 och 3.6 har allmänt definierats och beskrivits vilka egenskaper elektromagnetisk strålning har. Vi skall här se vad detta betyder för radiosystem för navigering.

För radionavigeringssystem som skall ha lång räckvidd (mer än 300 km) kan man med markbaserade sändarstationer inte utnyttja frekvenser över 30 MHz eftersom man för högre frekvenser endast har direktvågsutbredning.

Vill man ha mer information från sändaren än bara riktningen och identitets-signaler är man tvungen att på något sätt mäta avstånd eller avståndsskillnader. Utbredningsvägen såväl horisontellt som vertikalt måste därvid vara väldefinierad. Detta innebär att endast markvåg eller direktvåg är av intresse.

För kortdistanssystem (under 300 km) kan man för flygplannavigering ofta använda direktvågsutbredning. VHF- och UHF-bandet har stor användning men även mikrovågsområdet upp till ca 10 GHz kan utnyttjas. Vill man kunna utnyttja radiosystem vid flygning på låg höjd måste man även vid ganska korta avstånd ha markvågsutbredning, dvs lågfrekvenssystem.

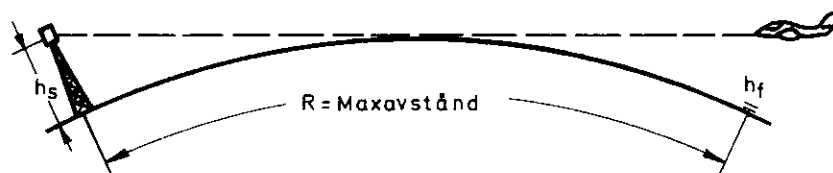
Navigeringssystem på lågfrekvens har alltså fått stor betydelse beroende på markvågsutbredningen. Det finns emellertid många nackdelar med lågfrekvenssystem som gör dem opraktiska och dyra att utnyttja. Några exempel:

1. Det är svårt att konstruera effektiva sändarantennor med rimliga dimensioner.
2. Atmosfärsbrus och störningar från åska m m framtingar höga sändareffekter.
3. Markvågens utbredningshastighet är inte konstant, vilket ger upphov till fel.
4. Interferens med rymdvåg ger fel speciellt under nattförhållanden.
5. På snabba flygplan kan urladdningsfenomen ge upphov till allvarliga störningar.

Trots dessa och andra nackdelar är markvågsutbredningen så väsentlig att långvågssystemen fått stor användning. Detta har gett upphov till frekvensträngsel och interferensproblem.

Direktvågssystem, dvs VHF- och UHF-system, saknar de flesta av långvågssystemens nackdelar men besväras i stället av andra utbredningsproblem. Ett problem är hinder, »masker» mellan sändare och mottagare, ett annat flervågssystem genom reflexioner. Vissa frekvensområden, t ex 108–118 MHz, har dessutom blivit så hårt utnyttjade att det även här existerar frekvensträngsel och interferensrisker.

Direktvågens räckviddsbegränsning framgår av bild 9.1. Genom att placera referenssändarna högt, t ex i satelliter, kan man öka räckvidderna avsevärt. Direktvågssystem får därför ökad betydelse även som långdistanssystem.



$$R = 4,1(\sqrt{h_s} + \sqrt{h_f})$$

R mäts i km h mäts i m

Bild 9.1 Direktvågens räckvidd

9.1.4 Antenner

Antenner kan klassificeras som *rundstrålande* eller *riktade*. I verkligheten har nästan alla antenner mer eller mindre riktverkan men med riktade antenner avses antenner med utpräglad riktverkan och där avsikten är att antennen skall vara riktad.

Rundstrålande antenner. En rundstrålande antenn sänder eller tar emot radioenergi lika väl i alla riktningar. En rundstrålande antenn har ett likformigt *strålningsdiagram*. En antenn kan vara rundstrålande i såväl två som tre dimensioner. I praktiken är det svårt att utforma en antenn som är rundstrålande i tre dimensioner. I bästa fall kan man få någorlunda likformig strålning i lite mer än en halvsfär. På flygplan och andra farkoster av metall fungerar skrovet som en skärm och förhindrar mottagning och sändning från antennen. I svängar och vid avancerad flygning kan detta omöjliggöra förbindelse. Detta gäller särskilt vid högre frekvenser, 100 MHz och däröver. Ett sätt att lösa problemet är att utnyttja två eller flera antenner på olika platser på farkosten och använda antennomkopplare.

Det är ofta svårt att få en flygburen antenn rundstrålande ens i två dimensioner. Detta gäller speciellt flygplan med yttre last, t ex stridsflygplan lastade med bomber, raketer, extratankar etc. I ett sådant flygplan måste man vara medveten om att det kan vara svårt att upprätthålla förbindelsen i vissa riktningar.

I navigeringssammanhang förekommer ofta flygburna rundstrålande antenner. Navigeringsinformationen finns då i signalernas utseende och inte i riktningen varifrån de sänds. På marken finns rundstrålande antenner på långvågs- och mellanvågsbanden. De används både till fyrar avsedda för pejling från flygplan och till navigeringssystem av typ Decca, Loran m m där informationen finns i de utsända signalerna. På högre frekvensområden finns också rundstrålande antenner, t ex för avståndsmätssystem DME.

På LF-området är sändarantennerna i regel vertikala och så långa som är praktiskt möjligt. Genom lämplig avstämning får man god rundstrålning för ett ganska stort höjdvinkelområde.

På VHF- och UHF-frekvenser pressar man samman antenndiagrammet i höjdvinkelled för att kunna använda sändareffekter. Antennerna får emellertid då ett flikigt lobdiagram, bild 9.2. I vissa höjdvinklar blir den utsända effekten liten. En flygförare eller navigatör bör vara medveten om denna effekt som kan innebära att man på vissa höjder ganska nära en navigeringsfyr inte får någon kontakt.

Riktade antenner. En riktad antenn eller *riktantenn*, som den också kallas, sänder eller tar emot radioenergi mera effektivt i någon eller några riktningar än i andra. Riktade antenner har två principiella användningsområden. Det ena är att få högre signaleffekter i de riktningar där man har användning för

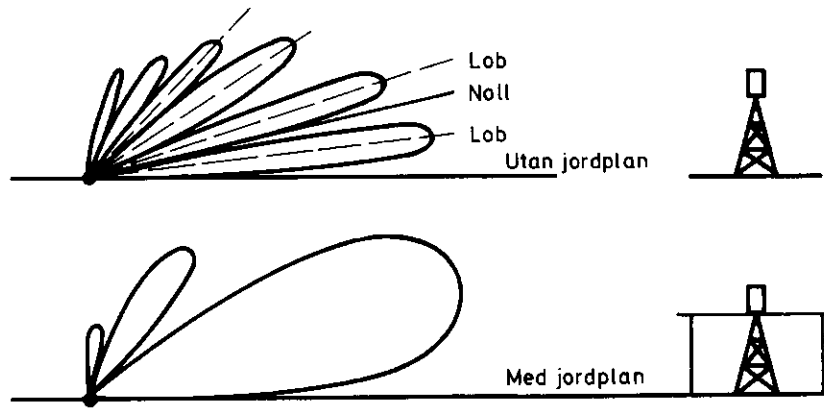


Bild 9.2 Vertikalt lobdiagram för VHF- eller UHF-sändare

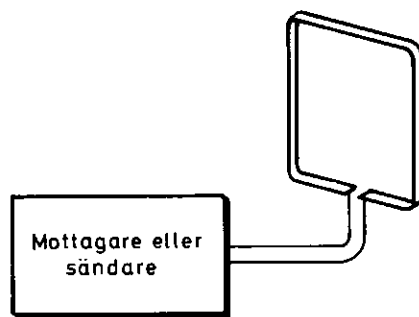


Bild 9.3 Ramantenn

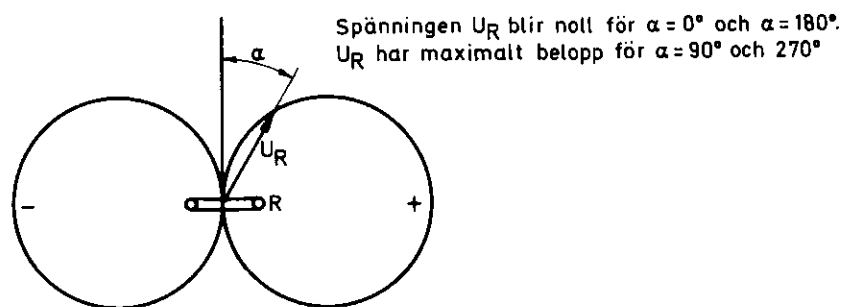


Bild 9.4 Strålningsdiagram för ramantennen

signalen. Detta möjliggör sändare med lägre effekt än om antennerna varit rundstrålande. Det andra användningsområdet är att ge riktningssinformation. Genom att orientera en riktantenn så att maximal eller minimal signal sänds eller tas emot i en viss riktning erhålls information om denna riktning.

Det finns många sätt att utforma riktantenner och utformningen beror i hög grad av frekvensen. En av de vanligaste antenntyperna är ramantennen, bild 9.3. Denna används i flygburen pejlrutrustning. Ramantennen kan användas både som sändar- och mottagarantenn. Strålningsdiagrammet ser ut som en åtta, se bild 9.4. Minima i diagrammet är mycket tydliga och med ramantennen kan en riktning bestämmas mycket väl.

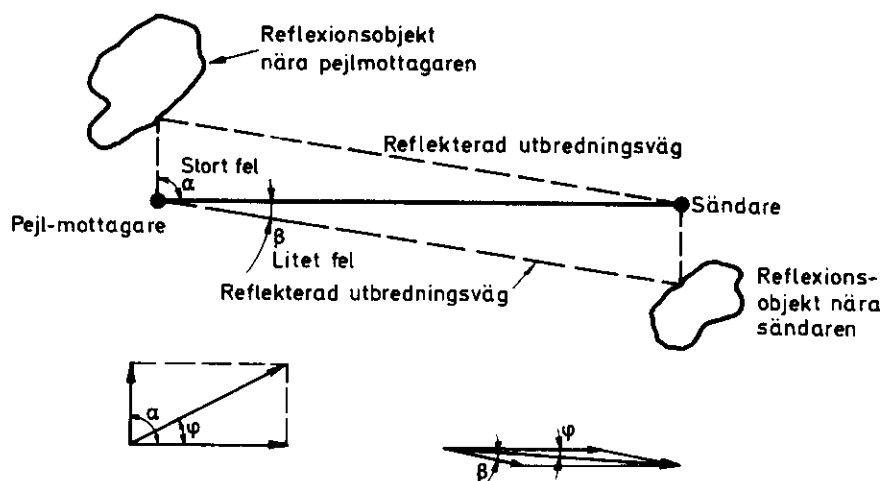
För höga frekvenser, 1 GHz och högre, kan man erhålla riktverkan med hjälp av parabolantenner.

9.2 PEJLAR OCH HOMING

9.2.1 Allmänt

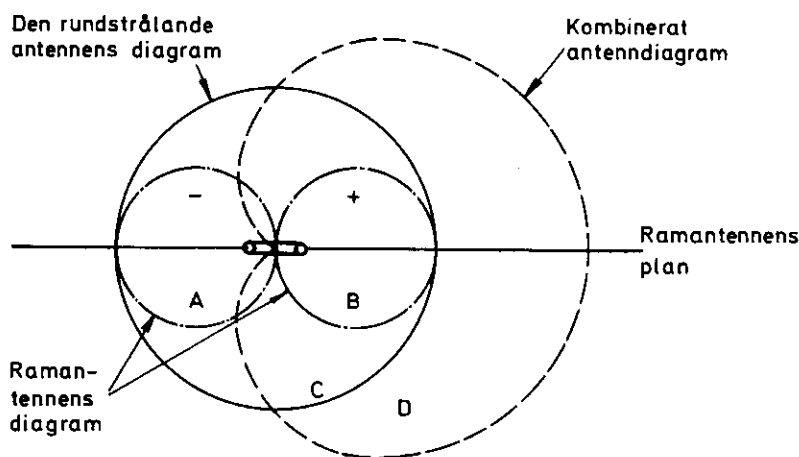
Pejling innebär att man genom att känna av vågfrontens riktning i utsänd elektromagnetisk strålning bestämmer riktningen till sändaren. Det finns både *markpejl* och *flygburen pejl*.

För pejling gäller att man endast kan bestämma riktningen på den elektromagnetiska vågfronten eller riktningen vinkelrätt mot denna. Den elektromagnetiska vågfronten är emellertid inte alltid vinkelrät mot riktningen till sändaren beroende på att reflekterad strålning interfererar med den rätlinjigt utbredda. Bild 9.5. Var och hur den elektromagnetiska strålningen reflekteras beror på frekvensen. Långvågsstrålning reflekteras huvudsakligen i jonosfären, medan strålning på VHF- och UHF-frekvenser kan reflekteras på terrängföremål i närheten av mottagaren.



φ = riktningsfelet om signalerna är i fas. φ blir stort om reflexionen skett nära mottagaren. Felet blir litet om reflexionen sker nära sändaren.

Bild 9.5 Inverkan av reflekterad strålning



A = vänstra ramantennendiagrammet.
 B = högra ramantennendiagrammet, 180° ur fas med A.
 C = rundstrålände antennendiagrammet, 180° ur fas med A.
 D = C + B - A

Bild 9.6 Kombinerat pejldiagram

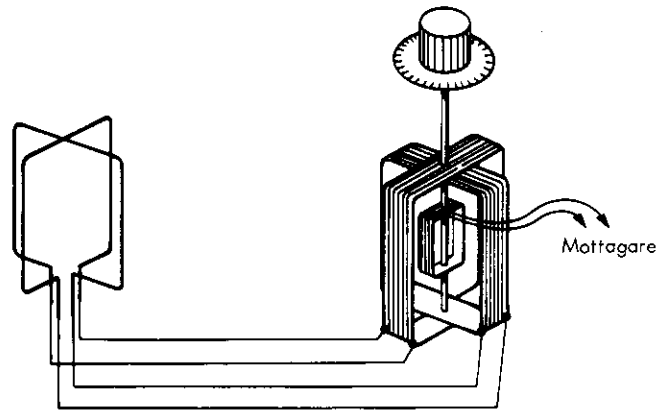


Bild 9.7 Goniometer

Den rörliga ramantennen utgör som nämnts den principiella grunden för pejling. I praktiken är en rörlig ramantenn svår att handskas med. Dels så existerar en tvetydighet på 180° , dels blir antennerna på lägre frekvenser ganska stora och därmed svårörliga, om de skall vara effektiva.

På flygplan vill man helst inte alls ha rörliga antenner.

Problemet med tvetydigheten kan lösas med hjälp av ett rundstrålande antenn-element. Se bild 9.6. Strålningsdiagrammet blir kardioidformat med ett distinkt minimum.

Om två fasta ramantenner placerade i rät vinkel elektriskt kopplas samman i en *goniometer*, se bild 9.7, kan man undvika rörliga antennelement. Goniometern har två par fasta magnetlindningar och en rörlig spole, som ansluts till presentationsinstrumentet. Goniometern överför det mottagna radiofältet från antennramarna till ett miniatyrmagnetfält, där den rörliga spolen känner av det.

9.2.2 Markpejl

Det markpejlsystem som i huvudsak används kan pejla på de internationellt godkända flygradiobanden 118–136 MHz och 225–400 MHz. Eftersom frekvensbanden huvudsakligen ligger inom VHF-området, benämns pejlen VDF (Very High Frequency Direction Finder). Som pejlobjekt används den vanliga flygradion.

Markpejlstationerna kan ha olika utseende och egenskaper och det skulle föra för långt att i detalj gå in på detta. De problem som man har att lösa är dels att med korta tidsmellanrum kunna pejla olika flygplan i olika riktningar på olika frekvenser, dels att eliminera inverkan från reflexioner i terrängen runt om pejlen. Det första problemet är ett kapacitetsproblem och det andra ett noggrannhetsproblem. Hur bra en markpejlstation behärskar dessa problem beror på utförandet och den omgivande terrängen. Det är värdefullt för en navigatör eller flygförare att i förväg försöka få reda på vilka egenskaper de pejlar har som han normalt betjänas av.

Numera används ofta så kallade automatpejlar där trafikledaren endast behöver välja frekvens och förvissa sig om att flygplanet sänder på denna frekvens. En automatpejl har i regel ett fast antensystem vars signalmönster styrs elektroniskt. I modernt utförande är detta en så kallad dopplerpejl. Riktningen till ett flygplan bestäms automatiskt mycket snabbt och presenteras för trafikledaren på ett lämpligt instrument t ex radarskärm, visarinstrument eller sifferindikator.

Utöver automatpejlen finns vid flygplatserna en manuell pejlsystem med vridbar antenn placerad i anslutning till kontrollcentralen. Det tar betydligt längre tid att pejla med den manuella pejlen än med automatpejlen.

Markpejlens uppgift är inte att fungera som ett navigeringshjälpmedel utan som ett flygtrafikledningshjälpmedel. Saknas radarövervakning är markpejlen trafikledarens enda egna möjlighet att få information om flygplanets position. Informationen är dock knapphändig eftersom endast bäringen till flygplanet blir känd.

I flygplan där positionsuppfattningen av någon anledning är dålig kan viss navigeringshjälp erhållas i form av uppgifter om pejlriktningar via radio. Två eller flera riktningar nästan samtidigt, dvs två eller flera ortlinjer, ger en fix. Noggrannheten beror på avståndet till pejlarna och pejlriktningarnas skärningsvinkel samt på pejltyp och terrängens utseende runt pejlen. Pejlfel har ofta en konstant komponent för vissa pejlriktningar. Riktningfel i storleksordningen 2° är realistiska med modern utrustning.

9.2.3 Flygburen pejlsystem ADF

Den flygburna pejlsystemen, radiokompassen eller ADF (Automatic Direction Finder) som den också kallas, har länge använts som flygnavigeringshjälpmedel. ADF är ett värdefullt komplement till andra navigeringshjälpmedel. ADF är ett värdefullt komplement till andra navigeringshjälpmedel.

Frekvensområdet 150 kHz – 1605 kHz, dvs långvåg och mellanvåg kan utnyttjas av en modern ADF. Pejlingen sker mot olika typer av radiofyrar och radiostationer t ex NDB-fyrar (Non Directional Beacon) i luftleder och terminalområden, lokaliseringsfyrar för inflygning LO och LI, sjöradiofyrar, rundradiostationer etc. Det finns således många objekt att pejla mot, vilket förklarar att ADF fortfarande har stor betydelse trots uppenbara nackdelar. Bland de väsentligaste nackdelarna och problemen kan nämnas:

- platsfel för antenner p g a distorsion från flygplanstrukturen
- rymdvågsinverkan
- identifieringssvårigheter
- överföringsfel mellan antenn och goniometer

Platsfelet är systematiskt till sin karaktär och kan till största delen kalibreras bort. Kalibreringen blir dock exakt bara för en frekvens och en viss flygplanattityd. Kalibreringen gäller också endast för en polarisationsriktning.

Pejlingen sker på markvågen från sändaren. Under nattförhållanden får man på längre avstånd interferens från rymdvågen. God markvågsutbredning har man då endast till ett avstånd av ca 300 km vid 200 kHz och 80 km vid 1600 kHz. Åskväder kan ytterligare reducera räckvidderna. Rymdvågen ändrar polarisationsriktningen samt vågfrontens riktning. Detta kan ge riktningfel på 30° eller mer.

Eftersom antalet stationer är stort är det svårt att få tillräcklig geografisk separation mellan stationer på samma eller närbelägna frekvenser. Vid pejling är det därför väsentligt att noga identifiera stationen och kritiskt pröva uppmätta pejlbärningar innan de accepteras.

Den antenntyp som numera är praktiskt taget helt dominerande har fasta korsade antenslingor och en motordriven goniometer som är en del i det servosystem som automatiskt presenterar bäring i förarkabinen. Fördelen jämfört med en fysikaliskt roterad antenslinga är att alla rörliga delar utom indikatorn är i mottagarenheten vilket förenklar underhållet.



Bild 9.8 RMI (Radio Magnetic Indicator)

Flygburna pejlar presenterar bäringen till sändaren relativt flygplanets symmetri-axel. Presentationen måste utom vid homing (dvs anflygning mot fyren) således kombineras med en magnetkompass eller annan kursreferens. Ett sådant kombinerat instrument kallas ofta RMI (Radio Magnetic Indicator). Bild 9.8.

Riktning noggrannheten i ett ADF-system är i storleksordningen 2° förutom de fel som beror på inverkan från flygplanets struktur och på rymdvägsinverkan. Även då rymdvägen inte inverkar ger olika attityder och kurser vid normal flygning så varierande fältförhållanden att det resulterande felet efter kalibrering är ca 5° .

Det kan nämnas att man även försökt med flygburen pejl på högre frekvensområden. Rymdvägsinverkan i området 3–30 MHz och svårartade platsfel på högre frekvenser har dock omöjliggjort praktisk användning.

9.2.4 Homing, Anitafyrar

Den allra enklaste formen av pejling är att använda fasta antenner och rikta in hela flygplanet mot pejlobjektet, dvs den sändare man vill pejla mot. För positionsbestämning vid godtycklig flygning är denna form av pejling alltför tids- och manöverkrävande för att vara praktiskt genomförbar. Är syftet däremot att förflytta flygplanet till den punkt där pejlobjektet är så är metoden fullt användbar. Ofta finns det en radiofyr av något slag i anslutning till den bas eller det övningsområde dit man vill förflytta flygplanet. Anflygning mot en sådan radiofyr då inriktningen av flygplanet sker med hjälp av signalerna från fyren kallas efter motsvarande engelska uttryck för *homing*.

Radiokompassen kan användas för homing, även då kursreferens saknas.

En speciell form av homing används mot flygvapnets speciella DME-fyrar (se även avsn 9.4.3), de s k Anitafyrarna. De flygplan som kan använda dessa fyrar har två fasta riktantenner placerade symmetriskt på flygplanet med strålningsdiagrammet i huvudsak riktat snett framåt. Bild 9.9. Genom att man jämför amplituden för signalerna från de båda antennerna och riktar in flygplanet så att amplituden är lika kan homing ske mot Anitafyren. En förutsättning för att

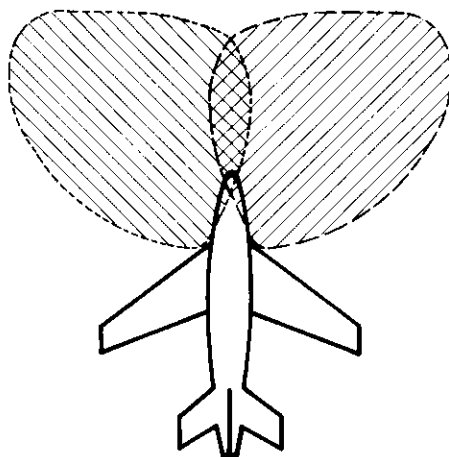


Bild 9.9 Diagram för homingantennerna

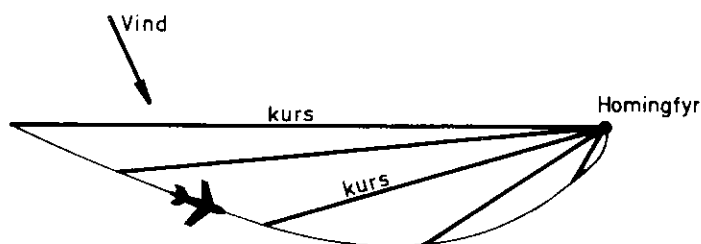


Bild 9.10 Hundkurva vid homing, kursen förändras successivt

kursen skall bli riktig är att de båda antennerna har spegelvända strålningsdiagram i förhållande till flygplanets symmetrilinje samt att förstärkningen innan jämförelsen är lika. Inriktningen brukar kunna ske med en noggrannhet av ca 3° .

Även andra typer av radionavigationssystem, t ex VOR och TACAN, kan fungera som homingsystem. När dessa system används som homingsystem utnyttjas emellertid inte all tillgänglig information.

Vid homingflygning i kraftig sidvind driver flygplanet i sidled. Då flygplanet inte håller upp mot vinden förändras kursen successivt varigenom flygplanet kommer att följa en sk hundkurva. Bild 9.10. I praktiken spelar detta ofta inte någon större roll utom för långsamma flygplan, där vägsträckan och därigenom bränsleförbrukningen kan öka ganska mycket.

9.3 SYSTEM FÖR BÄRINGSMÄTNING

9.3.1 Allmänt

Vid pejling är det nödvändigt att i flygplanet ha tillgång till en i sammanhanget tillfredsställande kursreferens. Saknas kursreferens kan man inte bestämma någon ortlinje och enda möjligheten är att genom homing och platstagnation över radiofyren bestämma positionen. Även då man har tillgång till en kursreferens är pejl-noggrannheten så dålig att osäkerheten i ortlinjen på större avstånd från pejl-objektet blir alldeles för stor. Det finns alltså önskemål om radiosystem som dels kan ge bäring utan hjälp av flygplanets kursreferens, dels har betydligt bättre noggrannhet än pejlen.

Det har under årens lopp utvecklats ett antal radiosystem som mer eller mindre väl uppfyller önskemålen. Vi skall här betrakta fyra system:

- Talfyrar
- Consol
- VOR
- TACAN

Talfyrarna uppfyller endast kravet på att ge bäringsinformation utan kursreferens. Noggrannheten blir inte bättre än med pejl. De övriga systemen ger däremot bättre bäringsnoggrannhet än pejl.

9.3.2 Talfyrar

Flygvarpet har som ett navigeringshjälpmedel s k talfyrar. De arbetar på VHF-bandet 108–118 MHz och kan avlyssnas med VOR-mottagare med kontinuerlig avstämning eller med vanlig VHF-mottagare. En röst anger i jämna eller udda totala grader den magnetiska bäringen till fyren. Bild 9.11 visar antenndiagrammet från en talfyr. Antennen vrider sig $1\frac{3}{4}$ -varv/min. Bäringsinformation erhålls två gånger per varv, dvs var 17:e sekund.

För att förhindra falska bäringsangivelser från sidolober sänds en täcksignal i alla riktningar utom huvudlobernas. Täcksignalen är sammansatt av flera toner och till sin karaktär pulsad. Den är även amplitudmodulerad med en morsekodad identifieringssignal ungefär var 30:e sekund.

Täcksignalsändarens bärfrekvens är 300 Hz förskjuten i förhållande till bäringsändarens. Därför hörs även en interferenston med en frekvens av 300 Hz, starkast på ömse sidor om rätt bäringsangivelse.

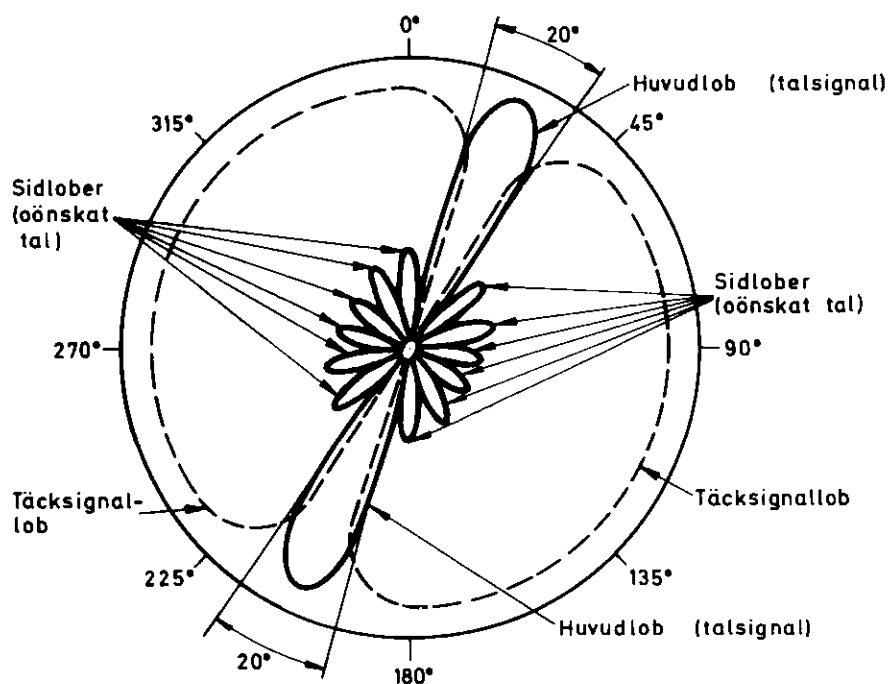


Bild 9.11 Antenndiagram för talfyr

Då man befinner sig mellan de utsända bäringarna kan man höra två riktningar och får av ljudstyrkan avgöra i vilken riktning man befinner sig. Ett ex:

Vid bäring	hörs
200°	TVÅA-NOLLA enbart
205°	TVÅA-NOLLA starkt och TVÅA-TVÅA svagt
210°	TVÅA-NOLLA och TVÅA-TVÅA lika starkt
215°	TVÅA-NOLLA svagt och TVÅA-TVÅA starkt
220°	TVÅA-TVÅA enbart

Den noggrannhet som kan uppnås med en talfyr kan uppskattas till $\pm 5^\circ$ eller sämre.

9.3.3 Consol

9.3.3.1 Allmänt

I Consolsystemet erhålls storcirkelbäringen från en markstation till flygplanet. För att kunna utnyttja systemet krävs endast en kommunikationsmottagare för frekvensbandet 190–370 kHz. Systemet utnyttjas på lång- och mellandistans. Dess räckvidd kan under gynnsamma förhållanden uppgå till 2500 km, men är nedåt begränsat till ungefär 40 km från sändarna. På kortare avstånd växer felen och under 20 km erhålls ingen bäringsinformation.

Consol är en vidareutveckling av navigeringssystemet Sonne som utvecklades i Tyskland under 2:dra världskriget. Det kan användas för både fartygs- och flygnavigering och befintliga stationer täcker delar av Europa, Nordamerikas ostkust samt Nordatlanten. En särskild variant av systemet, Consolan, finns utvecklad i USA. Dess räckvidd är dock kortare än Consolsystemets.

Med Consol erhålls bättre noggrannhet vid fixtagning än vad som ges av flygburen pejl. En fördel är att rymdvågen kan användas. Systemet torde även framtida komma att ha viss användning som reserv för annan radionavigeringsutrustning.

9.3.3.2 Funktionsprinciper

En Consolstation består av en sändare med tre antennmaster (se bild 9.12) och är en sorts roterande radiofyr som ger bäringen från fyren till flygplanet inom

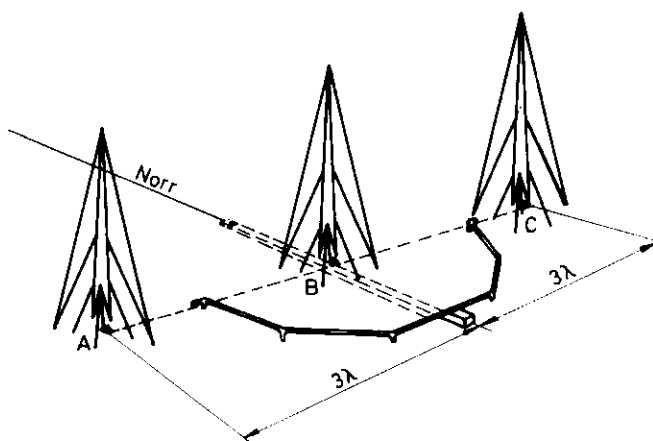


Bild 9.12 Consolstation

två 120° -sektorer på vardera sidan om fyren. Bäringsinformationen är dock mångtydig på $10-15^{\circ}$ när. Bestämning av i vilken sektor fartyget befinner sig kan antingen ske med andra navigeringshjälpmedel, t ex dödräkning eller genom pejling mot Consolstationen. Stationen sänder nämligen i en cykel med två perioder. I den första, ungefär under 55 sek, sänds i en rundstrålande antenn stationens identifieringssignal och en omodulerad ton, som kan användas för pejling. Efter ett avbrott på 2,5 sek följer bäringsändningen under 60 sek. Den riktningensberoende sändningen åstadkoms genom att ett bestämt samband råder mellan signalernas amplitud och fas i de tre sändarantennerna. Bild 9.13 visar det statistiska antenndiagrammet. Den utsända signalen består av morsetecken. I varannan lob sänds 60 st prickar och i varannan 60 st streck.

Antenndiagrammet vrids en sektorbredd under bäringsändningen. Mottagaren kommer därvid att uppfatta ett signalmönster enligt bild 9.14. Växlingen mellan prickar och streck, den s k likasignallinjen, avgör var inom sektorn man befinner sig. Genom att räkna antalet prickar eller streck före likasignallinjen kan man avgöra var i sektorn denna är. Efter en bäringsperiod har antenndiagrammet uppnått ursprungsläget. Av antenndiagrammet på bild 9.13 framgår att den användbara bäringsinformationen är begränsad till två 120° -sektorer på vardera sidan om stationens baslinje.

Likasignallinjerna består i själva verket av hyperbler, men på de avstånd från stationen som systemet utnyttjas kan de approximeras med sina asymptoter, som är räta linjer.

Till hjälp för ortlinjebestämningen används i regel särskilda Consolkort med övertryckta bäringslinjer, se bild 9.15. Det finns också tabeller där för varje antal räknade prickar och streck ges storcirkelbärningen från sändarstationerna.

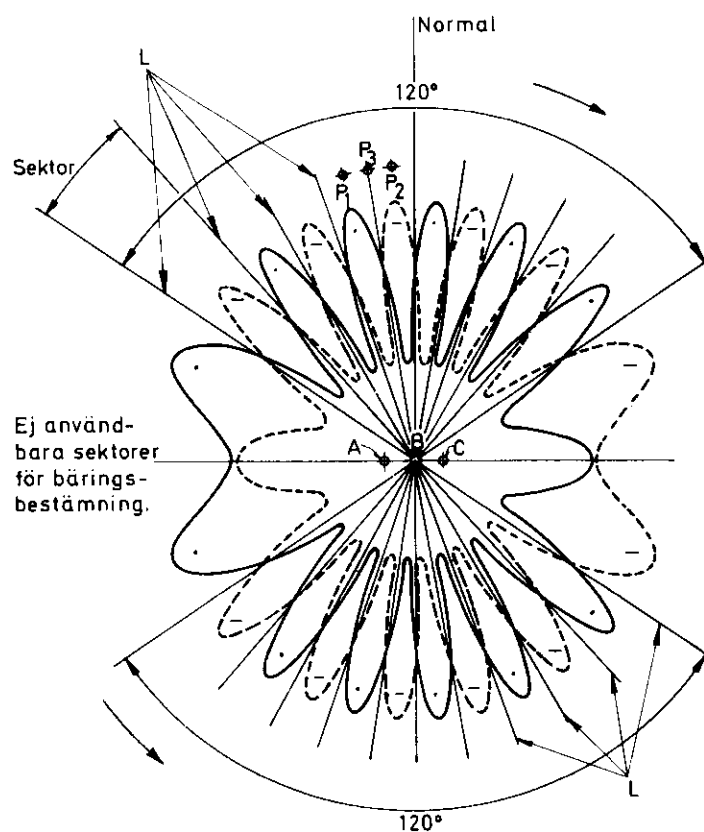


Bild 9.13 Consolstationens antenndiagram (statiskt)

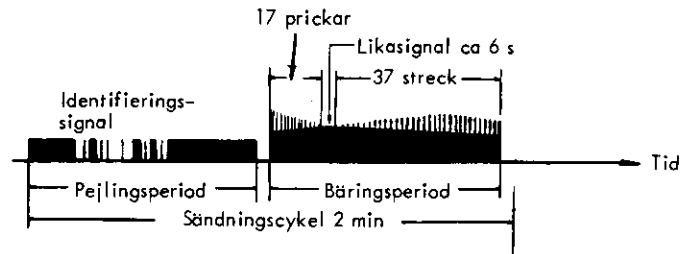


Bild 9.14 Consol, signalmönster

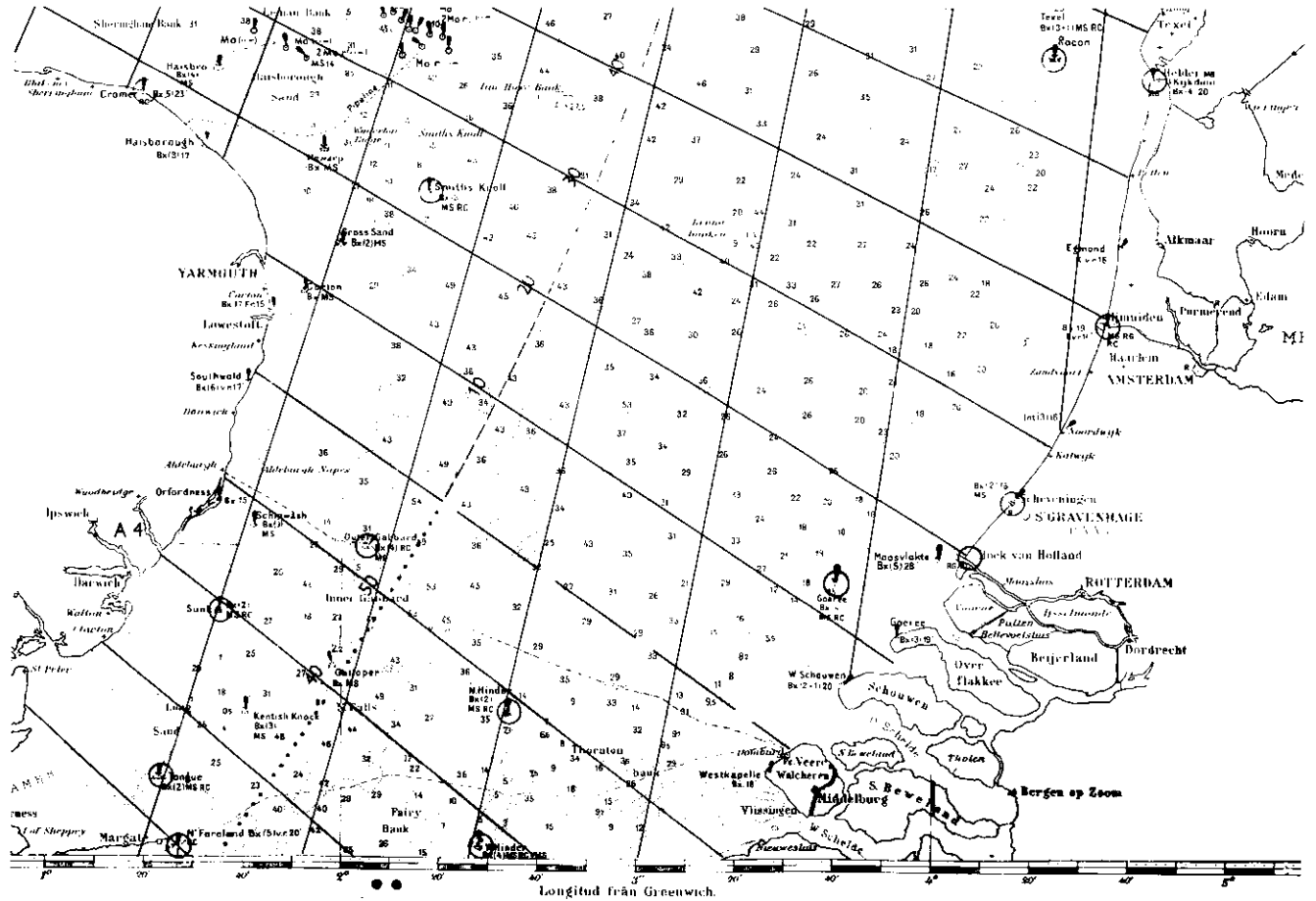


Bild 9.15 Consolkort med övertryckta bärlinjer

9.3.3.3 Egenskaper

Consolstationerna använder frekvenser i bandet 190–370 kHz. På dagen dominerar markvägen och på natten erhålls med rymdvägen en utökad räckvidd. Räckvidden är beroende av signalernas styrka relativt det atmosfäriska brusets som råder vid mättillfället och vilken mottagarutrustning som används. Med en smalbandig mottagare minskas inverkan av det atmosfäriska brusets och störningar från andra sändare på bandet. Signalstyrkan är beroende av om vågutbredningen skett över land eller hav. Räckvidden varierar därför starkt beroende på omständigheterna. Följande ungefärliga siffror uppges i olika källor:

Räckvidd i km	dag	natt
över hav	1200–2000	1600–2700
över land	900–1300	1300–2000

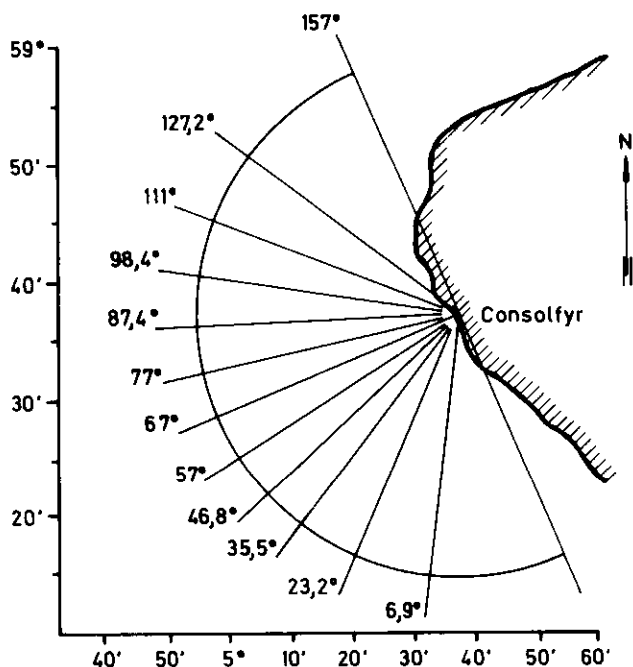


Bild 9.16 Consolstationen i Stavanger, sektorer

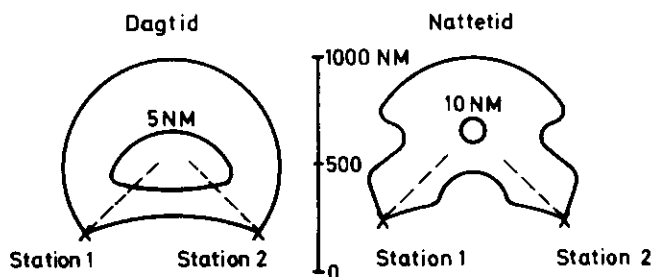


Bild 9.17 Noggrannhetskonturer vid positionsbestämning med Consol (95 %-värden)

Noggrannheten i bäringsmätningen påverkas av om vågutbredningen sker över land eller vatten samt mark/rymdvågsförhållandet. Noggrannheten är också beroende av sektorbredden som ökar successivt från normalen med åtföljande minskning av noggrannheten. Bild 9.16 visar stationen i Stavanger. Bästa vinkelnoggrannheten erhålls under dagtid.

På natten erhålls med ökande avstånd från stationen ett växande fel. I det område där mark- och rymdvåg har samma styrka erhålls de största vinkelfelen. På större avstånd med enbart rymdvåg ökar vinkelnoggrannheten åter. De systematiska felen är i allmänhet små och brukar därför inkluderas i de slumpvisa felen. På korta avstånd är felet ungefär $0,6^{\circ}$ och på natten i det sämsta området, 500–800 km från stationen, är felet $3,5^{\circ}$.

Bild 9.17 visar vad detta betyder i positionsfel.

9.3.4 VOR

VOR (Very High Frequency Omnidirectional Radio Range) är civilflygets mest använda radiohjälpmiddel för att erhålla bäring. VOR-fyrar finns i praktiskt taget

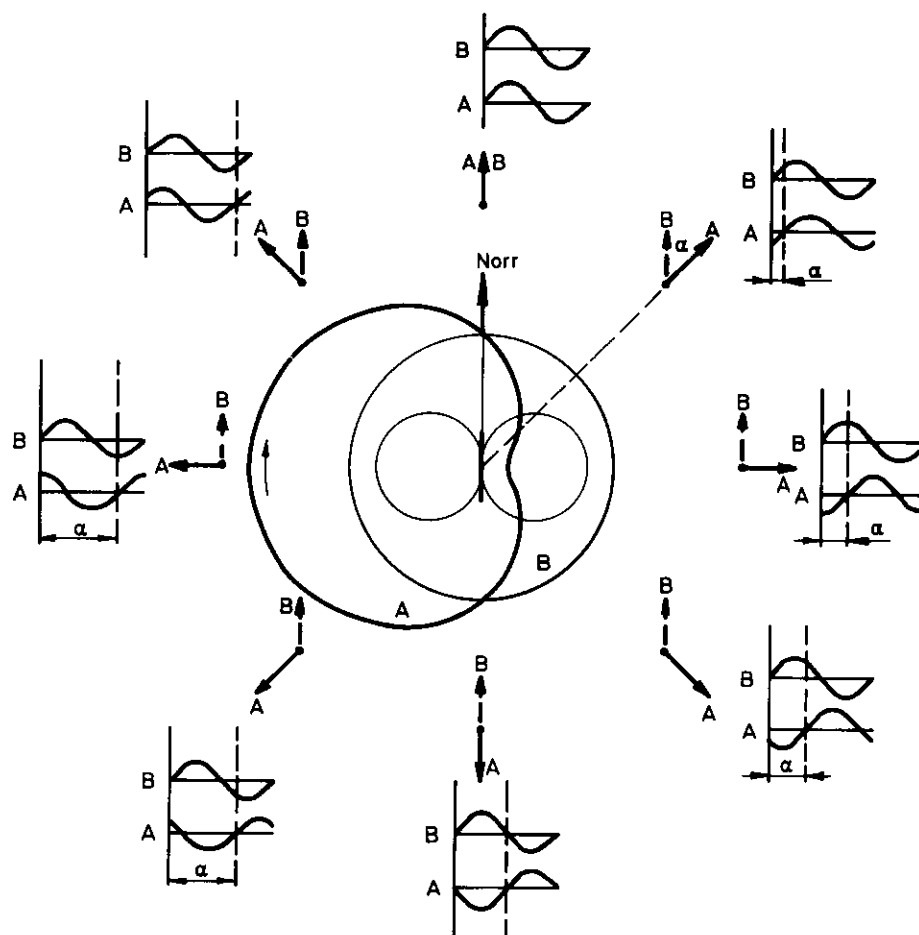


Bild 9.18 VOR-signaler i olika riktningar

alla luftleder och terminalområden i USA och Västeuropa. Civilt används systemet för närvarande i huvudsak så att man flyger på bestämda riktningar, radialer från en VOR-fyr till en annan. All trafik i luftlederna koncentreras därigenom över VOR-fyrarna.

VOR kombineras i allt större utsträckning med DME. Detta kombinerade system VOR/DME ger fullständig positionsinformation genom mätning mot en gemensam plats.

VOR utnyttjar frekvensområdet 108–118 MHz. Kanalseparationen är 100 kHz men en förändring till 50 kHz håller på att genomföras. Antalet tillgängliga kanaler fördubblas därigenom från 100 till 200. I praktiken kan dock inte alla kanaler utnyttjas eftersom ILS-kurssändare arbetar på samma frekvensområde.

Principen för VOR är fäsjämförelse av två 30 Hz-signaler. Markstationen sänder ett kardioidformat signalmönster som roterar med 30 perioder/sek. Detta ger en 30 Hz sinusvåg i den flygburna mottagaren, (signal A, bild 9.18). Markstationen sänder också en i alla riktningar likformig signal som moduleras med en 30 Hz referenssignal (signal B, bild 9.18). Fasskillnaden mellan de två signalerna varierar direkt och entydigt med flygplanets bäring. Signalerna är i fas i stationens referensriktning som i regel är magnetisk nordriktning. Utsända signaler är horisontalt polariserade.

Hur man genererar de två 30 Hz-signaler beror på om VOR-stationen är av standardtyp eller dopplertyp. I båda fallen gäller dock att den ena 30 Hz-signalen amplitudmodulerar en bärvåg och den andra 30 Hz-signalen frekvensmodulerar en annan bärvåg 9960 Hz från den första.



Bild 9.19 Kursindikator (VOR presentation)

För identifieringsändamål sänder man också en morsekodad 1020 Hz-signal modulerad på den rundstrålade bärvågen. Identifieringssignalen består av två eller tre bokstäver och sänds en gång var 30:e sekund.

På den rundstrålade bärvågen kan även moduleras en talkanal.

VOR-informationen presenteras normalt på flygplanets kursindikator (bild 9.19) eller på RMI-indikator (bild 9.8). Det finns även separata VOR-indikatorer. Den uppmätta bäringen, som ju utgör en ortlinje, kan naturligtvis också matas in i en digital dator och användas för beräkning av position och annan navigeringsinformation.

VOR-systemet är ett VHF-system, vilket innebär att räckvidden praktiskt taget begränsas av horisonten. Ur bild 9.20, ser vi att räckvidden varierar kraftigt med höjden. Med en 200 W VOR-sändare erhålls som exempel följande räckvidder:

Höjd	Räckvidd
300 m	90 km
1500 m	170 km
6000 m	320 km
9000 m	390 km

Systemnoggrannheten i bäringsinformationen beror av flera faktorer. De viktigaste är följande:

- utrustnings- och antenninriktningsfel hos markstationen
- reflexioner av utsänd signal i terrängen nära sändaren
- utrustningsfel i den flygburna mottagaren
- fel hos presentationsinstrumentet
- interferenser med andra VOR-stationer

För standard-VOR är fel på grund av reflexioner i terrängen helt dominerande då andra stationer inte interfererar. Övriga felkällor ger tillsammans ett fel om ca 1° (2σ) vilket i huvudsak hänförs till onoggrannhet hos presentationsinstrumentet.

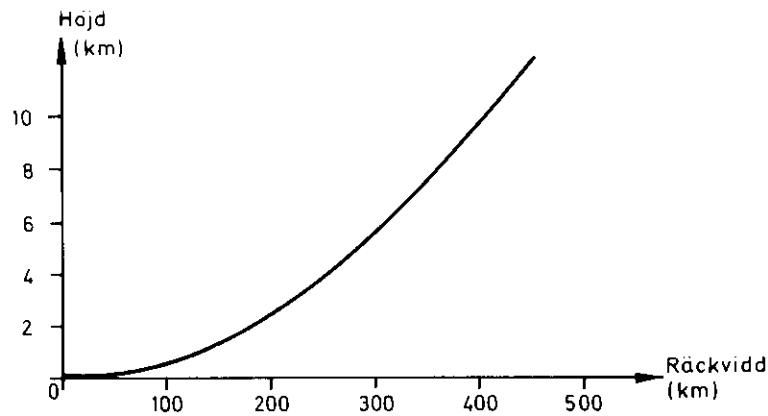


Bild 9.20 Ungefärlig räckvidd för VHF och UHF radionavigeringssystem. Effektivt utsänd effekt i storleksordningen 100 W -- 1 kW

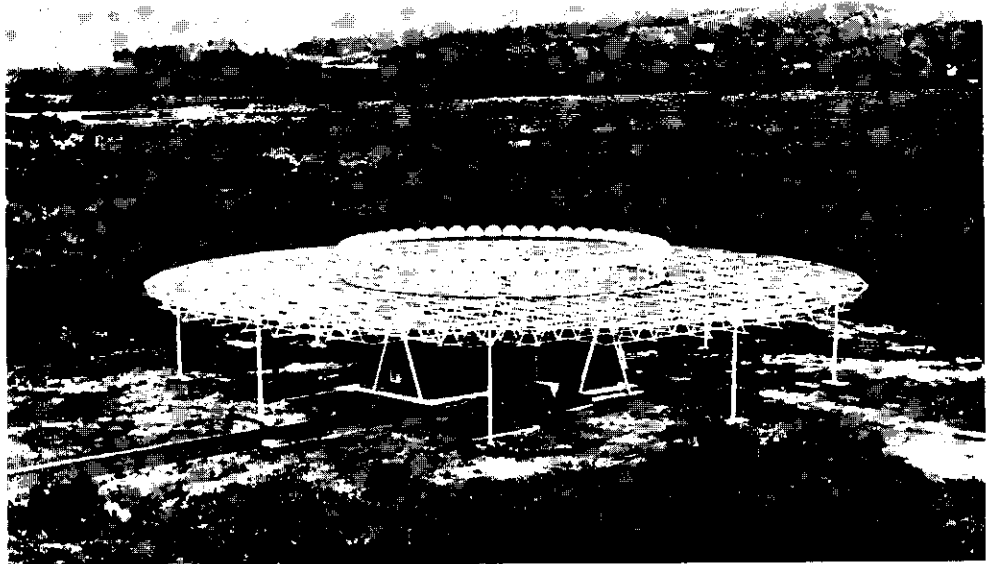


Bild 9.21 Doppler-VOR

Reflexionsfelen varierar i hög grad beroende på hur terrängen ser ut i närheten av VOR-stationen och i vilken riktning flygplanet befinner sig. I plan terräng utan träd eller stenar på avstånd upp till 500 m från VOR-sändaren blir den totala noggrannheten 2° (2σ) eller bättre. I bergig terräng, med träd i närheten eller där byggnader finns nära VOR-sändaren kan fel på 10° eller mer förekomma. Det är väsentligt att användaren av VOR-informationen vet hur noggranna de olika VOR-stationerna är och i vilka riktningar runt stationerna som noggrannheten är dålig.

I allmänhet har varje VOR-station ett speciellt täckningsområde (exempelvis längs en luftled) där signalerna garanteras. För standard VOR-stationer i Sverige torde man kunna räkna med en noggrannhet av ca 3° eller bättre inom täckningsområdet. De VOR-stationer som är sämst kommer successivt att utbytas mot doppler-VOR.

Doppler-VOR. Det skulle föra för långt att förklara hur doppler-VOR fungerar rent tekniskt. Principen är dock att man har en antenn i centrum och ett antal (39 eller 52) antenner runt denna i en cirkel med drygt 12 m diameter. Bild 9.21.

De yttre antennerna matas i tur och ordning för att simulera rotationen hos en stor antenn. På grund av den stora antennaperturen kommer reflexerna från de olika antennelementen inte att adderas till signalen (de kommer att vara ur fas), vilket medför att noggrannheten ökar. I praktiken torde doppler-VOR-stationer medföra att noggrannheten i huvudsak bestäms av instrumentfel hos presentationsinstrumentet och alltså är i storleksordningen 1° .

I de delar av världen där flygtrafiken är tätast, dvs i delar av USA och Västeuropa, kan det vara svårt att separera VOR-stationer på samma frekvens så långt att de inte interfererar vid flygning på hög höjd. En flygförare eller navigatör måste vara medveten om detta och noggrant bestämma vilken station som utnyttjas med hjälp av identifieringssignalen. Vid automatisk användning av VOR-information måste man noga se till att det inte finns någon risk för interferens i de områden och på de höjder där man mäter mot en VOR-fyr.

9.3.5 TACAN

TACAN (Tactical Air Navigation) utvecklades i USA under slutet av 1940-talet och var hemligstämplat till 1954. TACAN har genom sin enkla entydiga information i form av bäring och avstånd till en på marken placerad fyr kommit att bli det dominerande kortdistansnavigeringshjälpmedlet inom NATO. Avståndsfunktionen är identisk med den som finns i det av ICAO standardiserade civila DME-systemet. För avståndsfunktionen hänvisas därför till avsn 9.4.2.

TACAN utnyttjar 126 frekvenskanaler (1 MHz breda) i frekvensområdet 960–1215 MHz. Systemet är alltså liksom VOR horisontbegränsat. TACAN-systemet består av en flygburen sändar-mottagarenhet och en markbaserad fyr som för avståndsfunktionen fungerar som transponder. Både marksändaren och den flygburna sändaren är pulsmodulerade med en pulskod i form av dubbelpulser. Pulserna är formade så att frekvensspektrat skall bli så smalt som möjligt eftersom varje kanal endast är 1 MHz bred. Avståndet mellan två pulser var i det ursprungliga 126-kanalsystemet $12 \mu\text{s}$. Man har ökat antalet kanaler till 252 och har därvid även fått pulsavstånd på 30 och $36 \mu\text{s}$ i systemet.

Markstationen sänder upp till 3600 pulspar per sekund. Ca 2700 utgör i tiden slumpvisa pulspar medan återstående 900 är regelbundet återkommande referensgrupper för bäringsbestämningen.

För att förklara bäringsmätningen är det tillräckligt att betrakta marktranspondern som sändare och flygplanutrustningen som mottagare. Den andra signalriktningen med sändare i flygplanet och mottagare på marken har endast betydelse för avståndsmätfunktionen.

Marksändaren matar sin antenn med den pulsmodulerade signalen. Antennen sänder ut ett roterande diagram enligt bild 9.22. Signalen i en viss riktning är alltså amplitudmodulerad med två sinussignaler med frekvenserna 14 Hz och 135 Hz. Moduleringen erhålls i regel genom rotation av parasitelement runt den centrala antennen. Bild 9.23.

Varje gång 15 Hz-sinussignalen i bäring 0° elektriskt passerar 0° sänds en särskild markering i form av en kod med pulspar. På samma sätt sänds särskilda och olika markeringar de åtta gånger då 135 Hz-signalen i bäring 0° är 0° elektriskt och 15 Hz signalen är 40° , 80° . . . 320° elektriskt. Genom att i flygplanets mottagare mäta fasen hos de två sinussignalerna vid markeringarna kan man bestämma riktningen till marksändaren. Bild 9.24. 15 Hz-signalen används därvid till att bestämma inom vilken 40° -sektor som flygplanet befinner sig. Fasen hos 135 Hz-signalen, som har 9 gånger bättre upplösning, ger sedan riktningen inom sektorn.

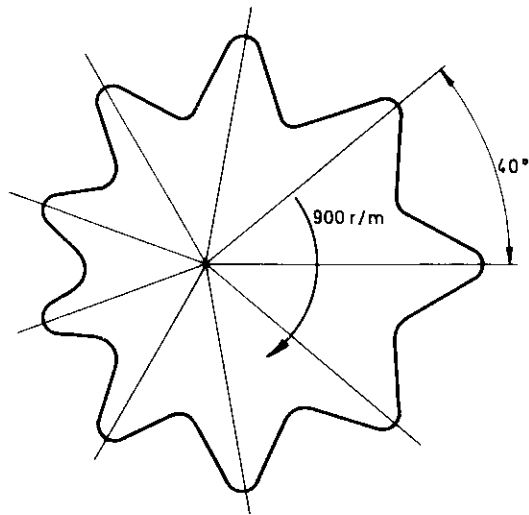


Bild 9.22 Antennendiagramm för markstation, huvudlobfrekvens 15 Hz (900 r/m), överlagrad lobfrekvens 135 Hz (9 x 15 Hz)

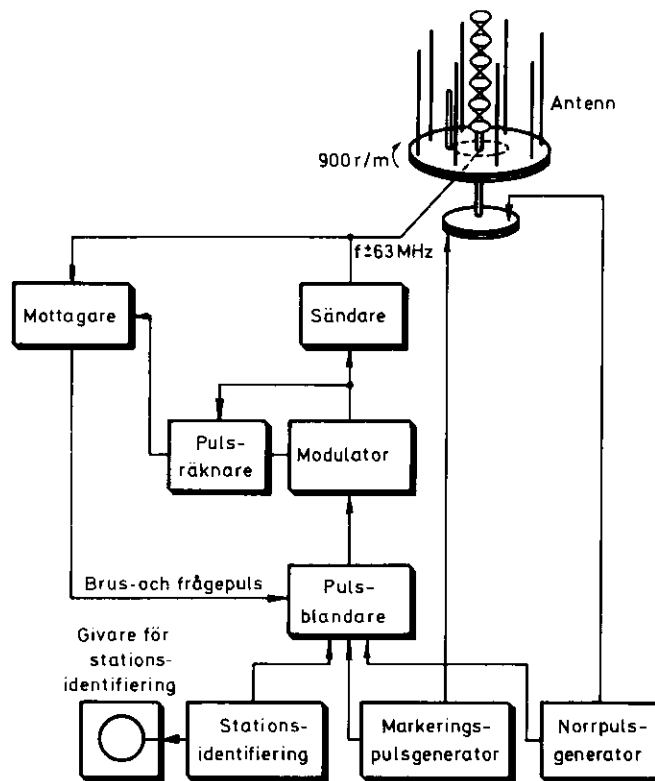


Bild 9.23 Markstation, blockschema

Den erhållna bäringsinformationen kan presenteras på samma sätt som VOR-bärning. Digital presentation förefaller att bli ett alternativ. Informationen kan givetvis också utnyttjas av en digital dator.

Flygföraren eller navigatören har möjlighet att identifiera den TACAN-station som utnyttjas genom att en morse-signal sänds var 30:e sekund.

Noggrannhet. Liksom hos VOR-systemet bestäms bäringsnoggrannheten i stor utsträckning av hur terrängen ser ut runt markstationen. På grund av den högre frekvensen och av att systemet är pulsat är dock inverkan mindre. Med en ideal

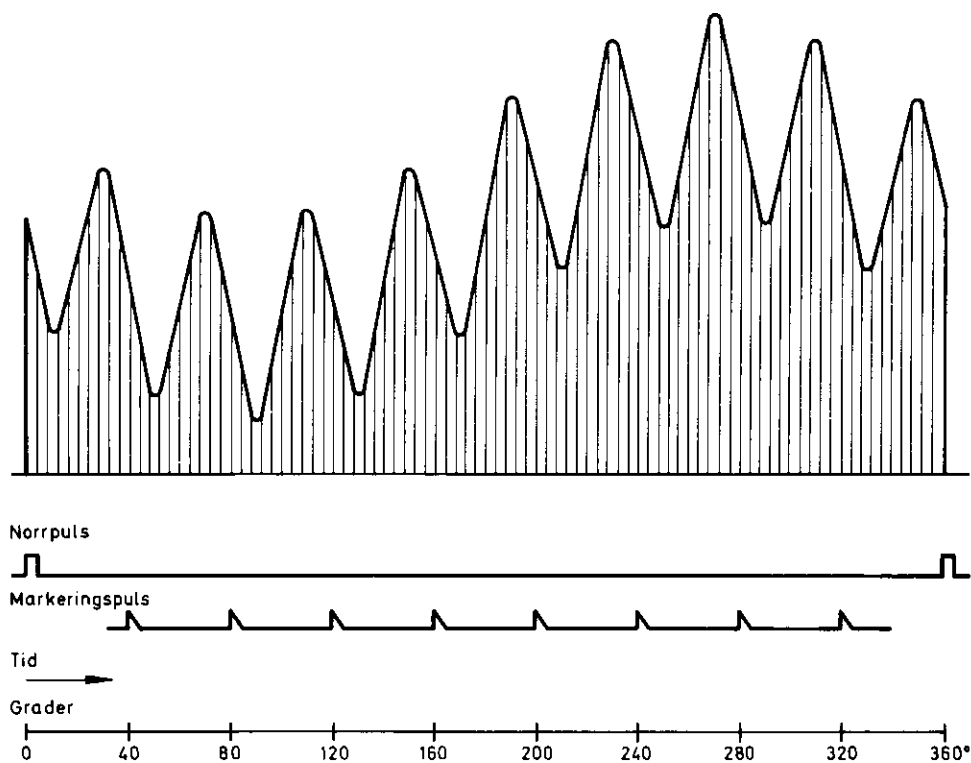


Bild 9.24 Demodulerad signal i flygburen mottagare

plats för markstationer utan reflexer kan felet exklusive fel i presentationsinstrumentet bli så litet som $0,2^\circ$. Ett analogt presentationsinstrument är knappast bättre än 1° och för en station med besvärlig terräng blir felet 2° eller något mer.

Jämfört med VOR är TACAN noggrannare än standard-VOR men sämre än doppler-VOR.

9.4 AVSTÄNDSMÄTNING

9.4.1 Allmänt

Avståndsmätning med hjälp av radiosystem grundar sig på att den elektromagnetiska strålningen utbreder sig med praktiskt taget konstant hastighet. Genom att mäta utbredningstiden eller motsvarande storhet kan man alltså bestämma avståndet. Principen för avståndsmätning framgår ur formeln

$$R = t \cdot c$$

där R är avståndet mellan sändare och mottagare, t är utbredningstiden och c är utbredningshastigheten för radiovågor (ungefär 300.000 km/s).

Vid tvåvägsutbredning är R lika med dubbla avståndet mellan farkost och referenspunkt. För att litet avståndsfel skall erhållas måste t bestämmas noggrant. Ett tidsfel av $1 \mu\text{s}$ motsvarar vid tvåvägssystem 150 m och vid envägsutbredning 300 m. Metoderna för att mäta utbredningstiden varierar och vi skall här se på några olika metoder.

De flesta avståndsmätningssystem är *tvåvägssystem*, dvs avståndet bestäms av tiden för en radiosignal att färdas fram och tillbaka till en punkt. Är emellertid

den exakta tidpunkten då en signal sänds ut känd kan avståndet bestämmas även för *envägsutbredning*. I punkten där avståndet bestäms behövs endast en mottagare och noggrann tidsreferens.

Ett tvåvägssystem kan utnyttja antingen en passiv reflexion av radiosignalen i någon lämplig punkt eller en aktiv återutsändning av en mottagen signal genom en transponder. Vanlig radar är ett exempel på den passiva varianten medan t ex TACAN är ett exempel med transponder.

Signalen som används kan vara antingen pulsad eller kontinuerlig. I pulshade system mäts tiden mellan utsända och mottagna pulser. I kontinuerliga system jämförs fasen mellan utsänd och mottagen signal. Kontinuerliga system blir mångtydiga med avseende på lika fasskillnad, dvs för tvåvägssystem kan avståndet endast mätas på en halv våglängd när. Flertydigheten kan dock lösas på olika sätt; ett är att använda flera frekvenser.

Avståndsmätning med radiosystem har många tillämpningar och de avstånd som mäts är högst varierande. Vanliga avståndssystem som DME-system (Distance Measuring Equipment) som mäter avstånd mellan 1 och 500 km är ett exempel. Radarhöjdmätare för höjdmätning upp till 1500 m är en annan. Loran som är mest känt som ett hyperbelsystem, dvs man mäter avståndsskillnader, kan även utnyttjas för envägs avståndsmätning varvid avståndet kan uppgå till ett par tusen km. Radar används inom praktiskt taget alla avståndsområden. I rymdsammanhang förekommer avståndsmätning med transponderteknik och även envägsteknik på avstånd i storleksordningen millioner km.

I detta avsnitt skall vi endast behandla ett par konventionella DME-system, nämligen TACAN och det med TACAN kompatibla civila DME-systemet samt flygvapnets DME-system med de så kallade Anitafyrarna. Radar, radarhöjdmätare, avståndsmätande Loran, avståndsmätning med satelliter behandlas på andra ställen i boken. För fullständighetens skull och för att tekniken bedöms få stor betydelse behandlas i avsn 9.4.4 envägs avståndsmätning med hjälp av stabila tidsnormaler. Det kan även nämnas att i stort sett samma teknik med pulser och pulskoder som beskrivs för TACAN- och Anita-systemen i avsn 9.4.2 och 9.4.3 också är planerad för kommande satellitsystem. Se vidare avsn 9.6.

9.4.2 TACAN och DME

TACAN, (Tactical Air Navigation) är ett system som ger både bäring och avstånd. Bäringsbestämningen behandlades i avsn 9.3.5.

Det civila av ICAO standardiserade DME-systemet har uppkommit ur TACAN. Det skiljer sig från TACAN endast genom att signalerna från markstationen, transpondern, inte är amplitudmodulerade och i att de särskilda referenspulsgrupperna för bäringsbestämning har utgått. Systemet benämns ibland för DME (T står för TACAN).

TACAN och DME är helt kompatibla vad gäller avståndsfunktionen. En flygburen TACAN-utrustning kan mäta avstånd till en DME-transponder liksom en flygburen. DME kan mäta avståndet till en TACAN-fyr.

Systemet arbetar som nämnts i frekvensbandet 960–1215 MHz. De båda transmissionsriktningarna är alltid separerade 63 MHz.

Principen för avståndsmätning med TACAN och DME framgår av bild 9.25. Signalschemat, bild 9.26, illustrerar hur avståndet bestäms genom tid.

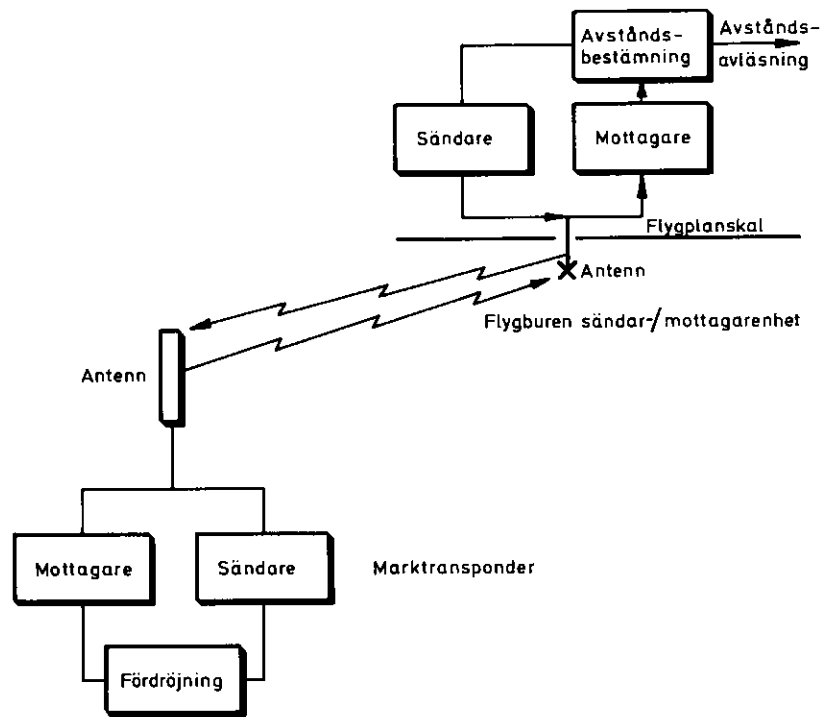
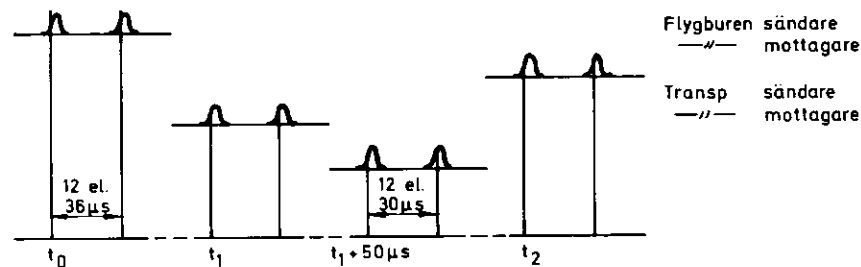


Bild 9.25 Princip för DME



$$\text{Avståndet } R = \frac{1}{2}(t_2 - t_0 - 50 \mu\text{s}) \cdot C$$

Bild 9.26 Avståndsbestämning, signalschema

Markstationen lämnar svar till många flygplan samtidigt. För att kunna identifiera egna svar utnyttjas det förhållande att endast dessa kommer synkront i förhållande till de utsända frågepulserna. Bild 9.27.

En markstation av normal typ sänder ut 2700 pulspar per sekund. De pulspar som inte utgör svar på frågor sänds ut slumpmässigt. Medelpulsrepetitionsfrekvensen hos en flygburen DME-sändare är 15–25 pulspar per sekund. En markstation kan alltså samtidigt betjäna över 100 flygplan. Om en station blir överbelastad, vilket i Sverige är osannolikt, innebär detta endast att de flygplan vars frågepulser har den lägsta signalnivån vid transpondern ej får svar. De övriga flygplanen erhåller avstånd på normalt sätt.

Då avståndsmätningen börjar mot en fyr används högre frågepulsrepetitionsfrekvens för att påskynda inläsningen mot fyren. Normalt tar inläsningen med en modern DME (tillverkad efter 1970) mindre än 1 sek. Äldre DME-utrustningar har inläsningstider i storleksordningen 20–30 sek.

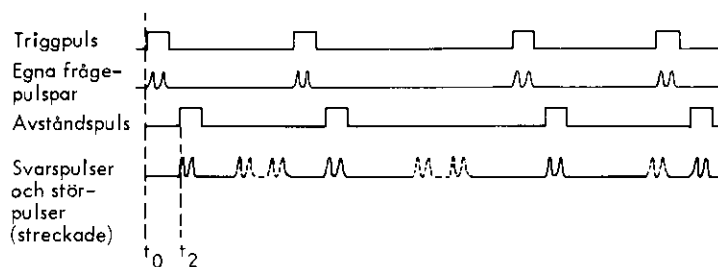


Bild 9.27. TACAM-DME, svar på egna frågepulser

Avståndsmättnoggrannheten beror av bl a följande faktorer:

- tidsfördröjningsnoggrannheten hos såväl den flygburna som markbaserade utrustningen
- noggrannheten i den automatiska förstärkningskontrollen hos transponder och mottagare
- fel i oscillatorfrekvens
- signalreflexioner i terrängen
- fel i presentationsutrustningen
- interferens mellan olika stationer på samma frekvens

Signalreflexioner torde för modern digital utrustning innebära den största felkällan. Förbättrad teknik i form av tidsbestämning på första pulsens framkant m m har dock avsevärt reducerat reflexernas inverkan. Specificerad noggrannhet (95 % sannolikhet) är 0,2 nautiska mil (370 m). Under goda signalförhållanden torde dock felet vara mindre. För äldre utrustningar är felet något större, speciellt om markstationen är utsatt för reflexer.

För TACAN-fyrar tillkommer ett mindre fel förorsakat av amplitudmodulationen och av att ett antal svarpulser uteblir på grund av bäringsreferenssignalerna. Fel överstigande 1 km torde även under svåra förhållanden vara mycket sällsynta om avståndet mäts mot avsedd DME-fyr. Med vissa typer av flygburen utrustning finns en mycket liten men dock risk för inlåsning på genom reflexion avsevärt fördröjda svar, s k ekosignaler. Vid en sådan inlåsning kan fel på flera kilometer uppstå.

Liksom för VOR existerar i delar av USA och västra Europa en viss risk för interferens mellan stationer på samma kanal vid flygning på hög höjd. I Sverige torde dock risken vara ytterst liten.

För identifieringsändamål sänds ungefär var 30:e sekund en morsekod med en tonfrekvens på 1350 Hz. Vid samplacering med VOR är identitetssignalen densamma för båda stationerna. Vid konventionell VOR/DME-navigering används ofta endast VOR-signalen för identifiering. Under vissa förhållanden, t ex flygning på hög höjd och stort avstånd från stationen, kan det därvid inträffa att avståndet mäts till en annan DME-station på samma kanal. Detta sker utan att flygföraren eller navigatören blir uppmärksam på situationen.

Avståndsinformationen presenteras i regel på en sifferindikator och anges i nautiska mil. Upplösningen är 0,1 nautiska mil. Även andra presentationsformer förekommer, t ex avståndet i km eller analog presentation på ett visarinstrument. Från moderna DME-utrustningar finns i regel en signal tillgänglig som ger flygplanets hastighet i riktning till eller från markfyren, s k »range rate». Denna typ av information har visat sig värdefull inom allmänflyget där man ofta saknar noggrann fartmätare.

Avstånd uppmätta med DME lämpar sig väl för positionsuppdatering både manuellt och automatiskt. Ortlinjerna utgör cirklar runt DME-transpondrarna och osäkerheten i ortlinjerna blir ganska liten och praktiskt taget oberoende av avståndet till transpondern.

VOR/DME. Som delvis redan nämnts eftersträvar man civilt att samplacera VOR- och DME-stationer. De utgör då ICAO:s standardiserade $\rho-\Theta$ kortdistansnavigeringssystem. Frekvenserna inom systemet är helt samordnade så att till varje VOR-frekvens hör en given DME-kanal. Systemet har idag stor användning och dess betydelse bedöms öka under det närmaste årtiondet. Antalet VOR-stationer som förses med DME ökar i rask takt.

VORTAC. I USA och några andra länder har man s k VORTAC-stationer i stället för VOR/DEM. En VORTAC-station består av en VOR samplacerad med en TACAN-fyr. VORTAC-stationen betjänar således civila användare med riktningar från VOR-sändaren och avstånd från DME-funktionen i TACAN-fyren. Militära flygplan får både riktning och avstånd från TACAN-fyren. Systemet underlättar flygtrafikledningen eftersom militära och civila flygplan har gemensamma markreferenspunkter.

9.4.3 PN-systemet (Barbro, Anita och Anna)

Svenska flygvapnet har ett speciellt DME-system, det s k PN-systemet. Det är en vidareutveckling av det s k Rebecca-Eureka-systemet som utvecklades under andra världskriget. Utnyttjat frekvensområde är drygt 200 MHz.

I systemet ingår markfyror av två typer. Den ena är landningsfyren Barbro (PN 55) som dels ger kurslinje vid landning, dels ger avstånd som tillsammans med barometrisk höjd används till att beräkna glidbanan. Se vidare kap 15. Barbrofyror har kort räckvidd (40–50 km) och kan endast utnyttjas i en begränsad sektor varför möjligheterna att utnyttja avståndsinformationen till navigeringshjälp är begränsad. Den andra fyrtypen har ett rundstrålande antenn-diagram och är en ren DME-transponder. Fyrtypen kallas för Anita eller Anna (olika sändareffekter). Anitafyror används för navigering och homing.

Den flygburna utrustningen kan ha olika tekniskt utförande men fungerar principiellt på samma sätt som sändar/mottagarenheten i ICAO DME-system. Systemet har större frekvensbandbredd och kortare pulser. Puls-koden är mera komplicerad och innehåller fler pulser. De olika stationerna särskiljs genom frekvensen, men i hög grad också genom olika pulskoder. Flygplanen är försedda med två riktantenner symmetriskt placerade, vilket möjliggör homing.

Räckvidden är i stort sett horisontbegränsad och är på hög höjd 400 km. Avståndet presenteras på ett instrument med två avståndsområden 0–40 km och 0–400 km. Noggrannheten torde vara $50\text{ m} + 1\%$ av avståndet på 40 km-området och $250\text{ m} + 1\%$ på 400 km-området. Inläsningstiden är maximalt 10 s för 40 km-området och 25 s för 400 km-området.

Positionsinformation kan erhållas genom att bestämma avståndet till två olika Anita-fyror. De långa inläsningstiderna och noggrannheten på längre avstånd medför dock att positionsfelet blir stort. Metoden är även rent praktiskt svår att utnyttja.

Riktantennerna och flygplanets kursreferens ger möjlighet att bestämma positionen med ρ/Θ metoden. Se avsn 6.2.3. Noggrannheten blir ca 5° och bestäms av hur noggrant flygplanet kan riktas in mot fyren. En praktisk begränsning är att flygplanet behöver riktas in mot fyren.

9.4.4 Avståndsmätning med stabila oscillatorer

Avståndsmätning med flygburen sändar/mottagarenhet och markplacerad transponder har, åtminstone för militär användning, uppenbara nackdelar, exempelvis den att sändaren röjer flygplanet. Hög effekt krävs vidare från den flygburna sändaren för att göra systemet någorlunda motståndskraftigt mot störning. Även rent tekniska nackdelar finns. Två utbredningsvägar kräver två sändare. Dessutom har en transponder begränsad kapacitet. Säker inlåsning kräver speciell teknik för att ske snabbt. Mottagaren i transpondern kräver ögonblicklig förstärkningskontroll eftersom de inkommande signalerna varierar kraftigt i styrka.

I princip är det tillräckligt att mäta utbredningstiden för en signal i en riktning för att bestämma avståndet. Tekniken med att använda tvåvägsutbredning tjänar endast till att för mottagaren ange när signalen är utsänd. Har man i flygmottagaren och marksändaren noggranna synkroniserade tidsreferenser samt sänder signaler på i förväg bestämda tidpunkter kan man bestämma avståndet genom att i mottagaren avläsa tidpunkterna då de utsända signalerna anländer. Tidsreferenserna på marken och i luften måste vara noggrant synkroniserade eftersom ett fel på 1 μ s motsvarar 300 m fel.

Utvecklingen av högstabla tidsnormaler både av kristalloscillatortyp och sk atomur har nått så långt att de finns tillgängliga kommersiellt till acceptabel kostnad. Se avsn 4.5 och 8.10. Eftersom de förmodligen kommer att användas inom kollisionsvarningssystem (se avsn 12.5) är det troligt att de också kommer att utnyttjas för navigering.

Med en långtidsstabilitet av 1 på 10^{11} vilket är realistiskt behöver den flygburna oscillatorn endast refereras till marksystemet en gång per dygn för att noggrannheten skall vara bättre än 300 m. Ett problem som ännu inte är helt löst är att synkronisera markstationerna om systemet inte skall utnyttja långväg.

9.5 HYPERBELSYSTEM

9.5.1 Allmänt

Hyperbelsystem grundar sig som nämnts i avsn 6.2.3 på bestämning av avståndsskillnaden till stationer på jordytan. Se bild 6.6. Det finns flera metoder att bestämma denna avståndsskillnad. De vanligaste grundar sig på utsändning av signaler från de olika stationerna.

Signalerna står i ett visst känt tidsförhållande till varandra. De kan vara utsända samtidigt eller med viss tidsfördröjning. I farkostens mottagare mäts tidsskillnaden mellan de mottagna signalerna. Tidsskillnaderna är bestämda av avståndsskillnaderna (och de kända tidsfördröjningarna) till stationerna som sänder ut signalerna. Då stationernas positioner är kända ger dessa avståndsskillnader ortlinjer i form av hyperbler, en ortlinje för varje par av stationer. På grund av jordytans krökning blir ortlinjerna för konstant avståndsskillnad inte exakta hyperbler. Detta har emellertid beaktats vid framställningen av de olika kartor med hyperbellinjerna påtryckta som används vid navigeringen.

De utsända signalerna kan mycket väl vara kontinuerliga varvid signalernas gångtidsskillnad mäts genom fasjämförelse.

Ett stort antal system som grundar sig på hyperbelprincipen har utvecklats. Vi skall i de följande avsnitten i huvudsak beskriva Decca, Loran A, Loran C och Omega.

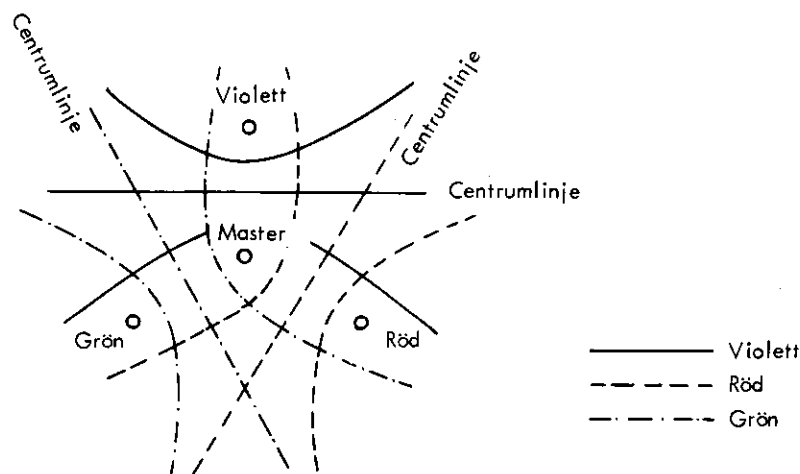


Bild 9.28 Decca-kedja

9.5.2 Decca

Deccasystemet började att användas i England under slutet av andra världskriget ombord på fartyg. Systemet har blivit mycket populärt främst för marint bruk men det har även funnit stor användning ombord på olika typer av luftfarkoster.

Decca-systemet är uppbyggt på ett antal stationskedjor. I varje kedja finns en huvudsändare benämnd *master* och två eller tre *slavstationer*. Slavstationerna brukar betecknas röd, grön och violett efter färgen på de fasmatrare, »decometrar» på vilka informationen presenteras. Bild 9.28 visar en typisk Decca-kedja. Avståndet mellan huvud- och slavstationerna är i regel i storleksordningen 100–150 km.

Decca arbetar på frekvensområdet 70–130 kHz; motsvarande våglängder är 2300–4300 m. Denna låga frekvens ger genom markvågsutbredning god låghöjdstäckning. Tyvärr får man också rymdvågsutbredning och interferensen från denna på större avstånd medför att räckvidden begränsas till 250–500 km beroende på meteorologiska betingelser. På grund av att systemet endast utnyttjar fasjämförelse är rymdvågsutbredda signaler praktiskt taget helt oanvändbara.

En typisk huvudstation har en 2 kW kristallstyrd sändare som matar en ca 100 m hög antenn. Slavstationerna har likadana sändare men dessutom mottagarutrustning för att kunna synkronisera sin utsända signal med huvudstationens.

Varje station sänder ut en stabil kontinuerlig signal som står i en bestämd relation till de övriga vad gäller frekvensen. De utsända frekvenserna är multipler av en grundfrekvens, f , på ca 14 kHz. Den exakta frekvensen varierar mellan olika stationskedjor. Om grundfrekvensen t ex är 14,047 kHz, är frekvenserna för de fyra stationerna såsom följer:

Station	Frekvens
Huvudstation (Master)	84,280 (6 f)
Röd slavstation	112,373 (8 f)
Grön slavstation	126,420 (9 f)
Violett slavstation	70,233 (5 f)

Positionsbestämning sker genom fasjämförelse mellan huvudstationens och slavstationernas signaler. Bild 9.29 visar principiellt hur mottagaren fungerar.

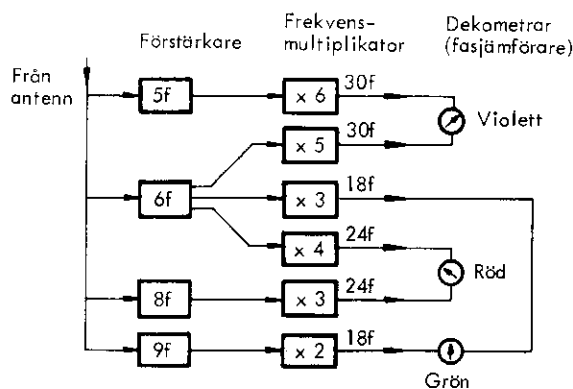


Bild 9.29 Decca-mottagare

Systemet är mångtydigt eftersom faser är lika längs flera hyperbellinjer. Utrymmet mellan två linjer med lika faser kallas på engelska för *lane*. Vid förflyttning över en lane vrider sig fasvärdet (Decometern) ett helt varv. Lanebredden varierar beroende på var i hyperbellmönstret man befinner sig samt på vilken frekvens jämförelsen sker. Kortaste avståndet finns på baslinjen (linjen som sammanbinder huvud- och slavstation). När fasjämförelsen sker på frekvensen 30 f (bild 9.29), blir lanebredden ca 350 m.

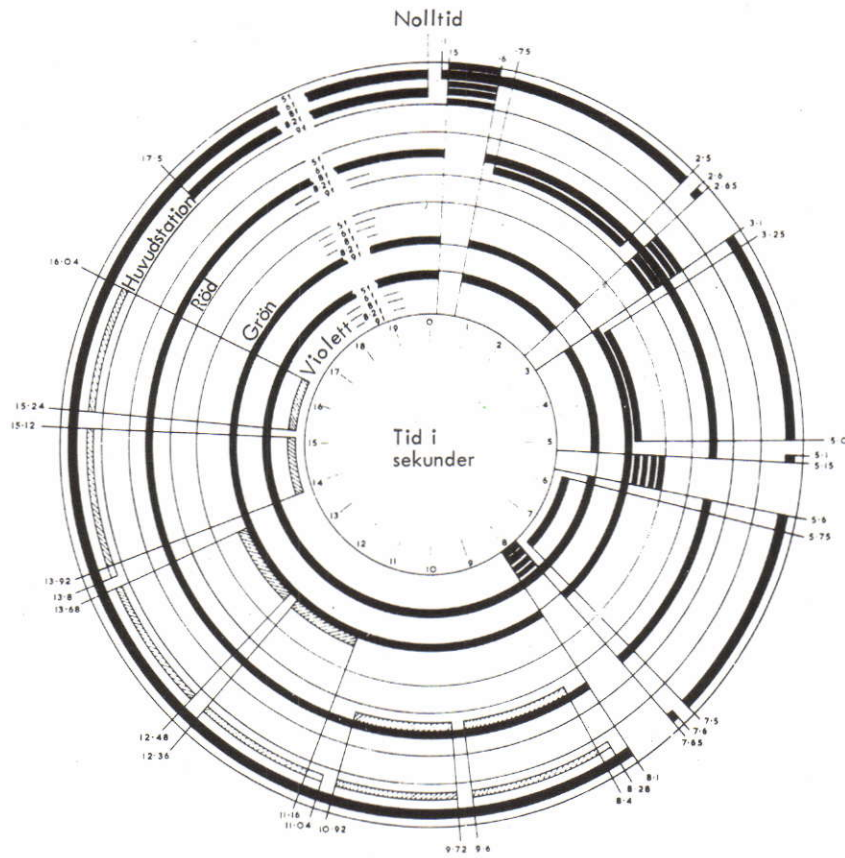
Man kan inte med full säkerhet räkna alla lanes som passeras varför risken för flertydighet i position skulle vara stor om endast det här beskrivna grundsystemet användes. För att förhindra flertydigheten sänds särskilda lane – identifieringssignaler. Dessa består i att man från de olika stationerna i tur och ordning periodvis utsänder signaler på alla frekvenser (5 f, 6 f, 8 f och 9 f) samtidigt. Signalerna möjliggör en fasjämförelse på grundfrekvensen f, varigenom identifieringen har säkrats till en zon med en bredd på ca 11 km. I snabba flygplan finns emellertid fortfarande en viss risk för zon-fel och för att eliminera denna sänds även en femte frekvens på 8,2 f, vilken möjliggör *zonidentifiering* inom grupper av 5 zoner. I praktiken är risken för flertydighet därmed eliminerad. För den intresserade visas på bild 9.30 sändningssekvensen på de olika frekvenserna.

Zonidentifieringen fanns inte i det ursprungliga Deccasystemet utan endast laneidentifiering. Detta ursprungliga system kallas i dag för Mark V medan systemet med zonidentifiering och förbättrad laneidentifiering (s k multipulsteknik) kallas för Mark X.

Deccakedjor täcker f n (1972) stora delar av Väst-Europa och finns dessutom i nordöstra Nord-Amerika vid Persiska viken, Indien och andra platser. Täckningsområdet varierar beroende på rymdvågsinterferensen liksom noggrannheten. Under dagförhållanden är noggrannheten i storleksordningen 100 m. Den varierar något beroende på avstånd till sändarna och skärningsvinkeln mellan hyperbellinjerna.

Under vinternattsförhållanden kan rymdvågen inverka så att felen uppgår till flera kilometer i de yttre delarna av täckningsområdet. Felen ökar under dessa förhållanden kraftigt med avståndet till sändarna.

För marint bruk fyller decometrarna de flesta krav på snabbhet och överskådlighet i presentationen. De avlästa värdena plottas in på särskilda sjökort med hyperbellinjerna inritade (se avsn 5.4). Man kan observera att dessa linjer är korrigerade för de systematiska variationer i vågutbredningshastighet som beror på om vågutbredningen sker över land eller vatten.



Heldragen linje = normal sändning eller landidentifiering
 Streckade områden = data och kontrollsändningar

Bild 9.30 20-sekunders sändningscykel för en 4-stationskedja

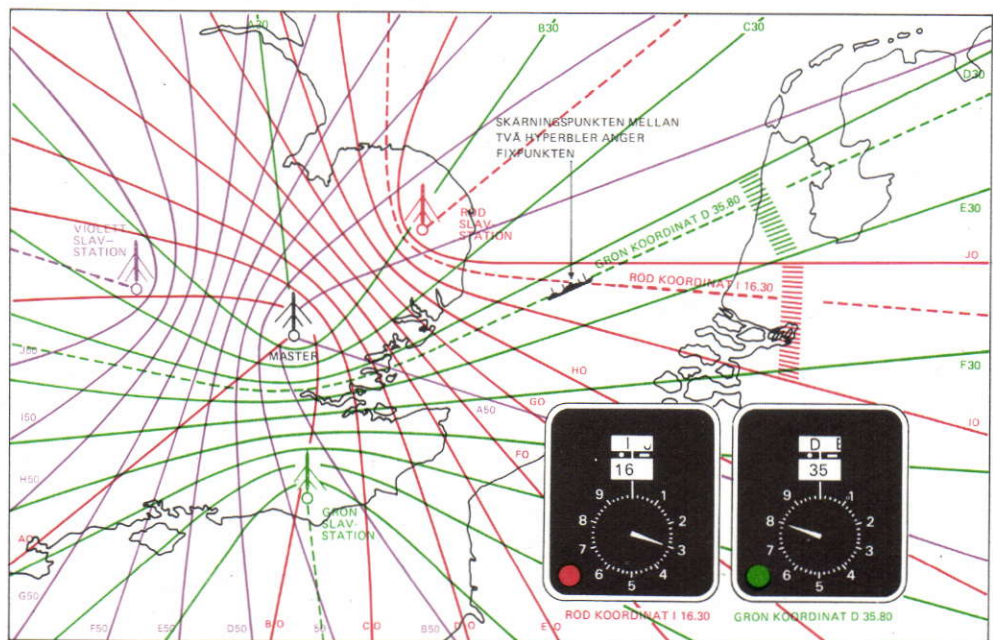


Bild 9.31 Decca karta

För flygbruk är det med hänsyn till förflyttningshastigheten praktiskt taget nödvändigt med något slag av direkt kartpresentation.

En metod att presentera Deccainformationen är att använda ett kartinstrument med rullkarta på vilken hyperblerna approximeras med räta linjer. I enklaste utförande får hyperbellinjerna skära varandra under rät vinkel. Detta medför en kraftigt distorderad karta utom i de områden där hyperblerna verkligen skär varandra under rät eller nästan rät vinkel. För att minska distorsionen finns även kartinstrument där hyperbellinjerna fortfarande approximeras med räta linjer men där skärningsvinkeln är vald så att den är representativ för hyperbellinjernas skärning inom det aktuella kartbladet. Bild 9.31 ger exempel på en sådan karta.

Distorsionen kan undvikas helt genom att hyperbelkoordinaterna i en dator omvandlas till rätvinkliga longitud/latitud-koordinater för presentation på en odistorderad karta.

9.5.3 Loran A

Loran A utvecklades liksom Decca under andra världskriget och är ett hyperbelnavigeringssystem för långa avstånd. Namnet Loran, är en förkortning av long-range navigation.

För att undvika rymdvägsinverkan används pulser. I mottagaren ombord på den farkost som utnyttjar Loran A finns som indikator ett katodstrålerör (oscilloskop) för presentation. På indikatorn presenteras den mottagna signalen varvid markvägspulsen kan skiljas från eventuellt förekommande rymdvägspuls genom sin tidigare ankomst. När systemet utvecklades trodde man inte att tillräckligt noggranna pulser kunde genereras på de låga frekvenser där markvägsutbredningen är bäst. I stället valde man såsom en kompromiss frekvenser just ovanför det amplitudmodulerade rundradiobandet omkring 2 MHz. Detta frekvensval har begränsat den operativa räckvidden. Systemet torde få minskad betydelse i framtiden till förmån för Loran C, Omega och satellitnavigeringssystem.

En Loran A-kedja består normalt av en masterstation och två slavstationer och den finns vanligen längs en ocean kuststräcka för att betjäna farkoster på eller över oceanen.

Egentligen består en Loran A-kedja av stationspar där i varje par finns en masterstation och en slav. Det som i dagligt tal kallas för masterstation i en kedja är därför egentligen två stycken oberoende stationer med vardera en slav. Liksom i Decca kallas den linje på vilken sändarna finns för baslinje. Linjen vinkelrät mot baslinjen på lika avstånd från master och slavstation kallas centrumlinje.

Slavsändarnas avstånd till masterstationen är i regel ca 300–500 km. Fyra olika bärfrekvenser (1750, 1850, 1900 och 1950 kHz) används med tjugofyra olika pulsrepetitionsfrekvenser (typiska frekvenser är 20–30 pulser/sek).

Sändningen sker så att varje puls från masterstationen tas emot vid slavstationen, som sänder sina pulser efter en fix fördröjning. Fördröjningen består dels av en halv pulsrepetitionsperiod, dels av en särskild kodfördröjning. Se bild 9.32.

Fördröjningen på en halv pulsrepetitionsperiod finns för att man på mottagare enklare skall kunna jämföra tidpunkterna då signalerna tas emot. Tidslinjen på katodstråleskärmen delas nämligen upp i två lika delar som presenteras med

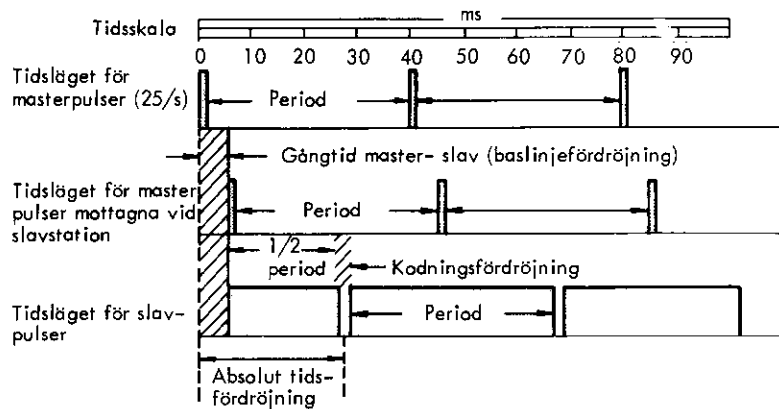


Bild 9.32 Loran A

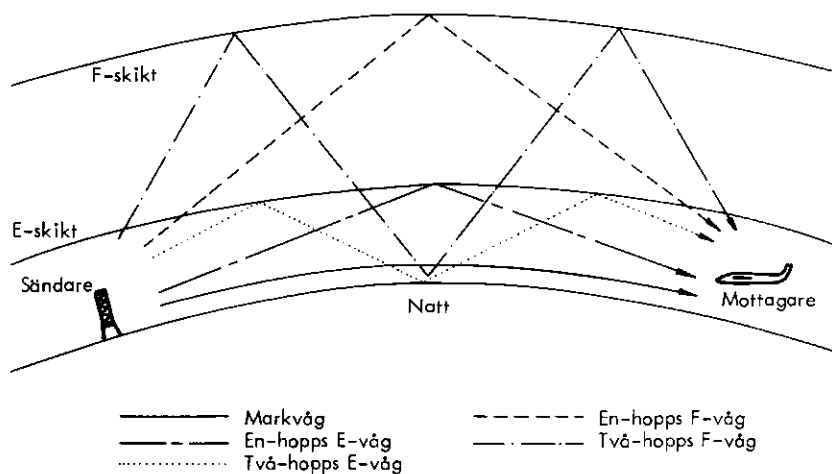


Bild 9.33 Både markvåg och rymdvåg kan tas emot med Loran A

den ena halvan ovanför den andra. Fördröjningen medför att de båda pulserna alltid kan presenteras på olika halvor.

Kodfördröjningen är till för att öka tidsdifferensen mellan avläsningarna så att pulsen från masterstationen alltid kommer före pulsen från slavstationen. (Vid denna diskussion bortses från fördröjningen på en halv pulsrepetitionsperiod som enbart syftar till att underlätta presentationen). Med mottagaren i farkosten mäts tidsskillnaden mellan masterpulser och slavpuls. Varje tidsskillnad definierar en ortlinje i form av en hyperbel. Skärningen mellan de två ortlinjer som erhålls från en kedja med två slavar ger en fullständig positionsbestämning.

Systemet lider inte av de flertydighetsproblem som finns i Decca-systemet. Avläsningsmöjligheten påverkas däremot av rymdvågsinverkan. Bild 9.33 visar vilka olika vågutbredningar som utöver markvågen kan förekomma. Man bör helst använda markvågen. Men om denna inte finns tillgänglig så kan sk Ett-hopps E-vågor utnyttjas vilket dock ger avsevärt sämre noggrannhet. Markvågen är starkast under dagen medan rymdvågorna är starkast på natten. På större avstånd är markvågen under natten så svag jämfört med rymdvågen att den inte kan utnyttjas för mätning. Gränsen för hur långt markvågen kan utnyttjas är under dagen ca 1000–1500 km och under natten 600–1000 km. Dessa räckvidder gäller för utbredning över hav. Över land minskar räckvidderna avsevärt, ofta till mindre än hälften. Förväxling mellan markvågspulser och rymdvågspulser kan medföra ortlinjefel på 20 km eller mer.

Ortlinjenoggrannheten är annars i storleksordningen 300–1500 m beroende på avståndet från sändarna. Noggrannheten i en fix beror dessutom liksom för alla system på vinkeln i ortlinjesskärningen och varierar därför mellan 600 m och mer än 10 km vid räckviddsgränsen 1500 km bort.

Det finns ca 25 Loran A-kedjor i operativ drift, huvudsakligen längs Nord-Amerikas, Europas och Ost-Asiens kuster. Systemet används mest av handelsfartyg och trafikflygplan över oceanerna. Det vanligaste sättet att utnyttja systemet är genom observation av tidsdifferensen på den oscilloskopskärm som alltid finns på mottagaren följd av en manuell inprickning på en karta på vilken hyperbellinjerna är övertryckta. Dessa linjer är delvis korrigerade för fasta vågutbredningsfel. På kartorna finns även angivet vilken korrektion som skall användas om rymdvågspulser används för mätningen.

9.5.4 Loran C

I Loran C-systemet som utvecklats senare än såväl Decca som Loran A har man försökt undvika nackdelarna med respektive system, dvs flertydigheten hos Decca och den dåliga noggrannheten och räckviddsbegränsningen hos Loran A. Loran C började användas 1960 och är ett hyperbelsystem med långa räckvidder. Systemet är liksom Decca ett långvågssystem. Systemets fördelar har inte erhållits gratis. Ganska höga mottagarkostnader och mycket dyra och komplexa markstationer har hittills orsakat förseningar i utnyttjningen.

Alla Loran C-stationerna sänder på en fix frekvens av 100 kHz. Systemet är liksom Loran A pulsat men på grund av den låga frekvensen och krav på smalbandighet får pulserna ett avrundat utseende enligt bild 9.34. Radiofrekvensen inom varje puls är koherent med pulsrepetitionsfrekvensen vilket är en förutsättning för finlägesbestämning genom fasjämförelse. Sändarna har hög effekt. pulstoppeffekten kan vara upp till 4 MW. Antennerna är vertikala och kan vara upp till 350 m höga.

Eftersom systemet skall ha oceantäckning finns stationerna ofta på olika öar. Avståndet mellan masterstation och slavstationerna är i regel i storleksordningen 900–1300 km. Antalet slavstationer i varje kedja varierar mellan två och fyra.

Masterstationen sänder sina pulser i grupper om nio med en frekvens på mellan 10 och 25 grupper per sekund. Frekvensen varierar mellan olika kedjor. Tidsavståndet mellan pulserna i en grupp är $1000 \mu\text{s}$. Slavstationerna sänder i tur och ordning efter masterstationen ut sina pulsggrupper med åtta pulser i varje grupp. Se bild 9.34. Varje puls inom en grupp kan ha sin radiofrekvens i fas eller 180° ur fas med en referenssignal. Denna faskodning av pulserna används för att identifiera olika kedjor och reducera rymdvågsinverkan från egna och andra signaler.

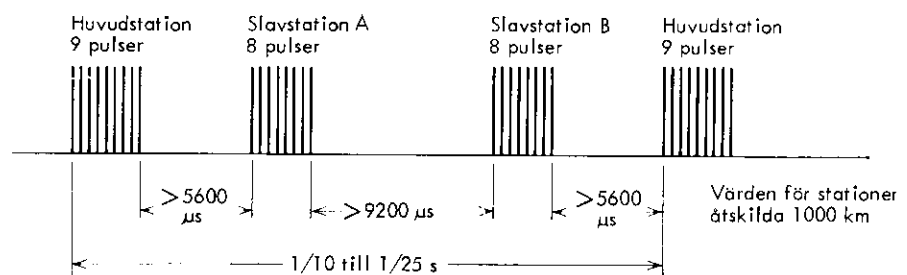


Bild 9.34 Loran C signalmönster

Konstruktionen av goda Loran C-mottagare har inneburit stora problem. Vid mottagningen av signalerna kan man, om högsta noggrannhet eftersträvas, endast använda de första tre radiofrekvenscyklerna i varje puls. Det är nämligen endast dessa som alltid är fria från rymdvågsinverkan. Ett annat problem är att den signal som man önskar använda kan ligga dold i atmosfäriskt brus som är 20 decibel högre när man tar i betraktande den 20 kHz breda mottagarbandbredden.

Andra interfererande stationer kan ha signaler som är upp till 35 dB starkare än den önskade. Lägg därtill att signalstyrkan från den önskade stationen kan variera med 120 dB. Mottagaren måste därför ha mycket hög selektivitet.

Det är den teknik som krävs för att lösa dessa problem som har medfört de nämnda höga kostnaderna. Den höga selektiviteten innebär också att inläsning tar lång tid, upp till tio minuter i vissa fall. Accelerationer hos farkosten kräver antingen en temporär reduktion av känsligheten (breddning av bandbredden p g a dopplerfrekvensändring) med åtföljande upplåsningsrisk eller att mottagarens frekvensservosystem stöts med en accelerationssignal från en tröghets-sensor.

De grundläggande inläsnings- och följeoperationer som en Loran C-mottagare skall utföra är att:

- söka efter en mastersignal och identifiera den utgående från repetitionsfrekvensen och faskoden
- faslåsa en lokal referensoscillator på mastersignalen
- låsa på slavsignaler och bestämma tidsdifferenser i förhållande till mastersignalen

Det finns mottagare av olika utformning bl a beroende på om de skall handhas av en särskild operatör eller om de automatiskt skall fullgöra sina uppgifter. För en Loran C-mottagare som skall användas av en operatör finns liksom på Loran A-mottagare ett katodstrålerör till hjälp vid identifiering och inläsning av signalerna. Den slutgiltiga inläsningen och följningen sker med hjälp av elektromekaniska eller digitala servosystem. På de helautomatiska mottagarna har dessa servosystem förbättrats.

För att klara av stark interferens från starka CW-stationer såsom Decca och kommunikationssändare krävs smala bandspärrfilter som dämpar signalen. Automatiska mottagare söker själva upp storkällornas frekvenser och placerar bandspärrfilterna över dessa.

Ofta presenteras endast de olika tidsdifferenserna varefter navigatören eller flygföraren har att översätta dessa till motsvarande hyperbellinjer på en karta.

Det blir emellertid allt vanligare att tidsdifferenserna matas in i en digital dator i vilken finns lagrade uppgifter om stationsplatser och koder. Datorn beräknar positionen som presenteras i longitud- och latitudkoordinater eller på ett kartinstrument.

Loran C kan ingå som ett delsystem i ett integrerat navigeringssystem, se kap 14. Systemet är särskilt lämpligt att utnyttjas tillsammans med ett tröghetsnavigeringssystem eftersom selektiviteten hos Loran C-mottagare därvid kan göras mycket hög.

Loran C finns i en särskild taktisk variant under beteckningen Loran D. I en Loran D-kedja är baslinjerna mellan masterstationen och slavstationerna kortare samt den utsända effekten avsevärt lägre. Signalmönstret är något annorlunda men mottagarna är kompatibla även om en Loran C-mottagare inte kan utnyttja alla finesser i Loran D-systemet.

Loran C har ett täckningsområde (1972) som består av följande delar, Nordatlanten, Medelhavet, Nordamerikas östkust, Hawaii, norra och östra Stilla Havet. De utbyggnadsplaner som existerar ger systemet ökad attraktion som flygnavigeringshjälpmedel.

Den noggrannhet som kan uppnås med Loran C-systemet växlar med avståndet från sändarstationerna. Om rymdvägsinverkan kan undvikas är vanligen noggrannheten bättre än 500 m.

9.5.5 Omega

Omeegasystemet är fortfarande i ett uppbyggnadsskede men skall, då det står klart 1976, ge världstäckning med endast åtta stationer. Detta möjliggörs med rymdvägsutbredning med signalfrekvenserna 10–14 kHz. Eftersom frekvensen är så låg, kan inte samma pulsteknik användas som för Loran. I stället sänds under tidsperioder om ca 1 s kontinuerliga signaler vilka upprepas var 10:e sekund. Signalmönstret för Omeegasystemet åskådliggörs på bild 9.35.

Funktionsmässigt är Omega och Decca baserade på samma princip nämligen den att fasskillnader mellan olika signaler mäts och ur resultatet utvärderas positionen.

Från varje station sänds i tur och ordning frekvensen 10,20, 13,60 och 11,33 kHz i följd, se bild 9.35. Omegamottagaren har ett fasminne, som gör det möjligt att jämföra fasan hos signaler som inkommer vid olika tidpunkter. Eftersom fasan i samtliga åtta sändningsintervaller är synkroniserad, utgör fasskillnaden mellan ett godtyckligt par av stationssignaler ett stationärt mönster av hyperblar eller ortlinjer. Omeegasystemets stationsgeometri har bestämts så att det är möjligt att motta minst fyra stationers signaler på varje punkt på jordytan. Detta innebär att det, varhelst mottagaren är placerad, alltid finns ett antal ortlinjer till vilka positionen kan refereras.

Som konstaterats tidigare har system som baseras på mätning av fasskillnad nackdelen med mångtydighet. En viss fasskillnad återkommer efter en period. Bredden på en lane (se avsn 9.5.2), då enbart frekvensen 10,2 kHz används, är ungefär 15 km. Med två frekvenser 10,2 och 13,6 kHz ökas lane-bredden till 45 km, beroende på att man då utnyttjar skillnadsfrekvensen 3400 Hz, som ger ett hyperbelnät med längre avstånd mellan hyperblarna. Om även tredje frekvensen 11,33 kHz används kan man till följd av skillnadsfrekvensen få ett grövre hyperbelnät med lanebredden 135 km. Bild 9.36 visar hyperbelnätet för en tänkt konfiguration av Omegastationer.

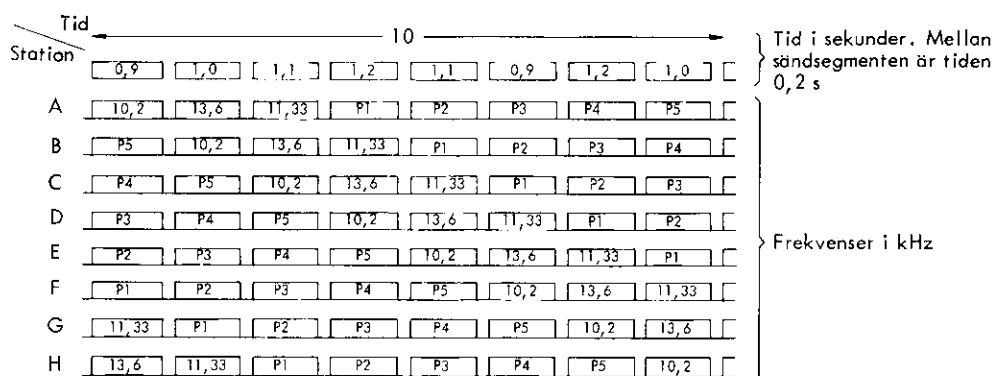
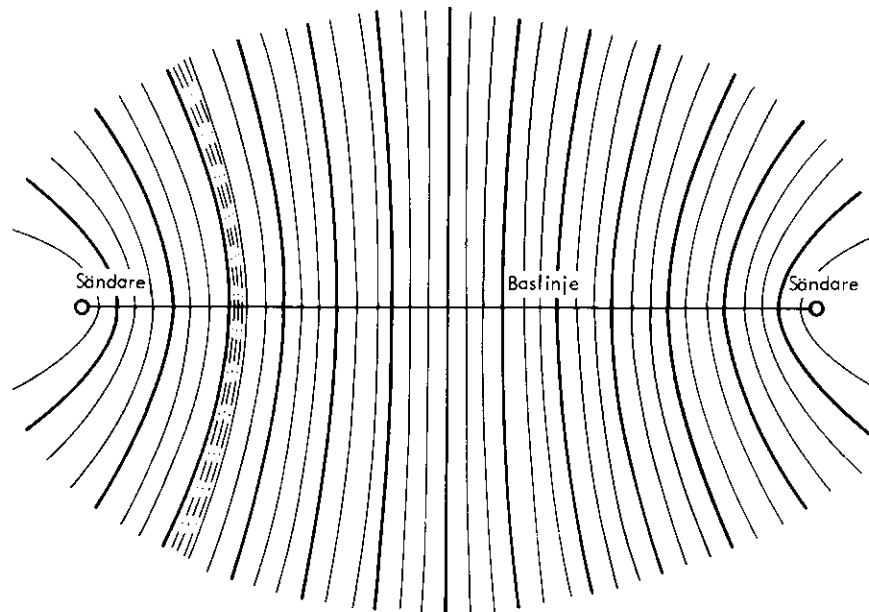


Bild 9.35 Signalmönster för Omeegasystemets 8 stationer (A–H)



Hyperbelnät med 15 km lanebredd, $f = 10,2$ kHz
 Hyperbelnät med 45 km lanebredd, $f = 13,6 - 10,2$ kHz
 Hyperbelnät med 135 km lanebredd, $f = 11\frac{1}{3} - 10,2$ kHz

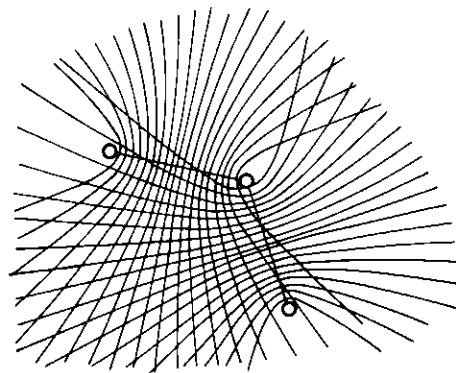


Bild 9.36 Omega hyperbelnät bildat av tre stationer

Under den tid varje station ej sänder någon av de tre frekvenserna 10,2, 13,6 och $11\frac{1}{3}$ kHz sker transmission av andra signaler. Enligt bild 9.35 sker detta vid tidsperioderna P1, P2, P3, P4 och P5. På bild 9.37 återges de för varje station karakteristiska frekvenserna, som sänds enligt signalmönstret. Med dessa signaler ombesörjs synkroniseringen mellan stationerna. Likaså kan viss form av driftövervakning möjliggöras stationerna emellan eller från särskilda driftkontrollstationer. Under de tidsperioder på bild 9.37 för vilka ej obligatorisk signal angivits, sänds i allmänhet stationsfrekvenserna FS1 och FS2 i ett valfritt mönster som bestäms av respektive station.

De utsända Omegasignalerna utbredds i rymden som mikrovågsfrekvenser i en sfärisk vågledare, där jorden och jonosfärens D-skikt är begränsningsytorna. Se kap 3. Denna rymdvåg påverkas av dygnsvariationerna och årstidsvariationerna i D-skiktet, vilket medför att den mottagna signalen uppvisar fasvariationer. Se bild 9.38. D-skiktets rörelser och tillstånd är dock relativt stabilt och förutbestämt, vilket innebär att särskilda rymdvågskorrekationer i tabellform kan utges och möjliggöra korrigering av mottagen signal. Dylrika tabeller med rymdvågskorrekationen som funktion av tiden och ungefärlig position utges regelbundet.

Station	FS1 (kHz)	FS2 (kHz)	Signalmönster vid:	P1	P2	P3	P4	P5
A	12,10	12,35	Stationsövervakning	FS1				FS2
B	12,00	12,25						
C	11,55	11,80	Tidskontroll	FS1				
D	12,85	13,10						
E	12,05	12,30	Viloläge	FS1	FS1	FS1	FS1	FS2
F	12,90	13,15						
G	12,75	13,00						
H	12,80	13,05						

Bild 9.37 Signalmönster för sidofrekvenser i Omegasystemet

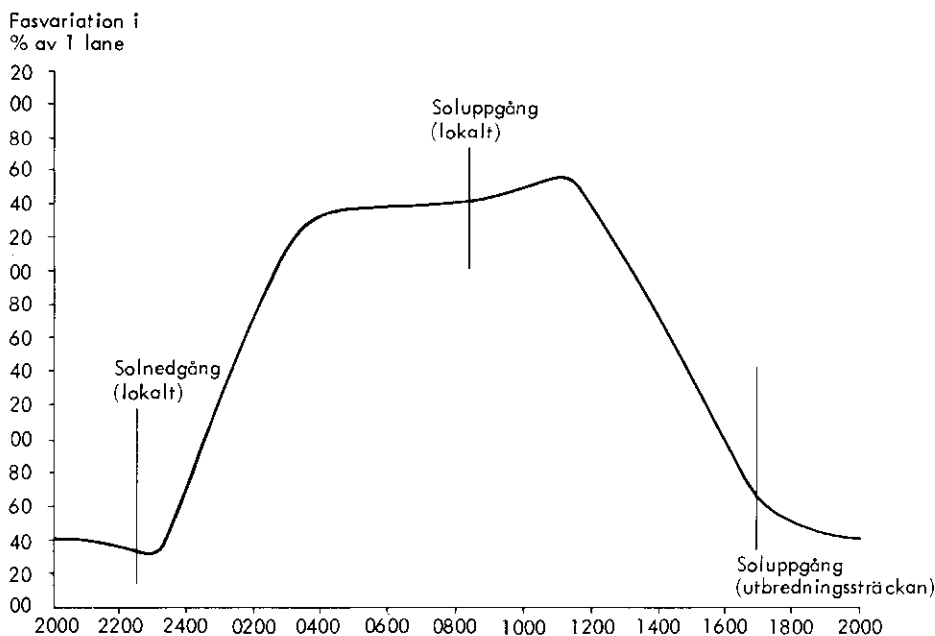


Bild 9.38 Typiska fasvariationer som funktion av dygntiden för vågutbredning på Omegafrekvenser

Som lämpliga områden för placering av de åtta Omegasändarna har valts Norge, Trinidad, Hawaii, North Dakota, La Reunion (Indiska Oceanen), Argentina, Australien och Japan. Fyra av dessa stationer har under några år fungerat som försöksstationer och arbetat med reducerad sändareffekt.

Från användarsynpunkt är sändarens frekvensstabilitet av särskilt intresse. Varje sändare har fyra individuella Cesiumoscillatorer med en drift mindre än 10^{-11} (se avsn 4.5). Frekvensen byggs upp i fyra kanaler vilket medför jämförelsemöjligheter och redundans. Efter modulationen sker förstärkning och utsändning på långvågsantennen. Sändareffekten skall vara 10 kW.

De genom Omega erhållna hyperbelortlinjerna måste översättas till latitud- och longitudkoordinater för att positionen skall bli känd. Detta kan åstadkommas enligt tre metoder:

1. Särskilda tabeller med vars hjälp koordinaterna kan transformeras
2. Särskilda kartor (typ Decca) med hyperblar övertryckta
3. En dator, som automatiskt ombesörjer transformeringen

Omegamottagare kan utformas för en-frekvens-, två-frekvens- eller tre-frekvens-mottagning, beroende på vilken användning, kostnad och noggrannhet som önskas. De senaste mottagarna har automatisk korrektion för utbredningsvariationer beroende på jonosfärens förändringar (de predikterbara förändringarna). De nödvändiga korrektionerna varierar med tid och position, vars parametrar inmatas i systemet före start. För detta ändamål är mottagaren kompletterad med en digital dator.

För att erhålla noggrannare positionsdata från Omega kan utnyttjas ett system med fasta övervakningsstationer. Dessa placeras i närheten av en hamn eller en flygplats, där större positionsnoggrannhet önskas. Övervakningsstationerna tar kontinuerligt emot signaler från flera Omegasändare. Eftersom de exakta avstånden mellan Omegastationerna och övervakningsstationen är kända, kan den senare kontrollera eventuella skillnader mellan nominella och aktuella faslägen i signalerna. På så sätt kan korrektioner till aktuella vågutbredningsförhållanden bestämmas och sändas till intresserade Omegamottagare. Detta system kallas *differential Omega*. Korrektionerna sänds på särskilda frekvenser och medger en med 3 å 4 gånger förbättrad noggrannhet, jämfört med konventionell Omega, som uppskattningsvis har en noggrannhet om ca 1 nautisk mil.

Omegasystemet är i flygsammanhang användbart som del i integrerade navigeringssystem. Med tröghetsnavigeringssystem eller doppler ABR-system sker en feltillväxt med tiden, som kan vara besvärande vid långa flygningar. Som komplement kan då Omega användas och ge positionsuppdateringar med en noggrannhet om ca 1–2 km.

9.6 SATELLITSYSTEM

9.6.1 Allmänt

Med från jorden uppsända speciella satelliter kan navigeringshjälp erhållas. Fördelen med satellitsystem framför navigeringssystem utan satelliter är att en direkt siktlinje erhålls samtidigt från satelliten till farkosten och till en eventuell markstation. Med satellitsystem kan navigering, kollisionsvarning, övervakning och trafikledning av olika farkoster till sjöss, till lands och i luften åstadkommas. Satellitsystemen kan i vissa avseenden ses som en vidareutveckling av astronomisk navigering men där då den konstgjorda satelliten kan utrustas med sändare och mottagare som gör kommunikation och inmätning i båda riktningarna möjlig.

Satellitsystemen kan indelas i flera kategorier beroende på principen för mätningen och utvinnandet av lägesinformation, nämligen system för:

- A. Vinkelmätning
- B. Avstånds- eller avståndsförändringsmätning (R eller \bar{R})
- C. Vinkel- och avståndsmätning

Dessutom kan satelliterna användas som relästationer vid kommunikation.

All användning av satellitsystem är oberoende av vädret. Endast ett fåtal satelliter erfordras, eftersom satelliterna beskriver sin bana med stor hastighet. En särskild mottagarutrustning krävs dock hos användarna. Kostnadsfördelningen och underhållet av satellitsystemet som även innefattar särskilda markstationer kan vidare bereda juridiska och ekonomiska ansvarsproblem.

Ett satellitnavigeringssystem består av följande delsystem (se bild 9.39):

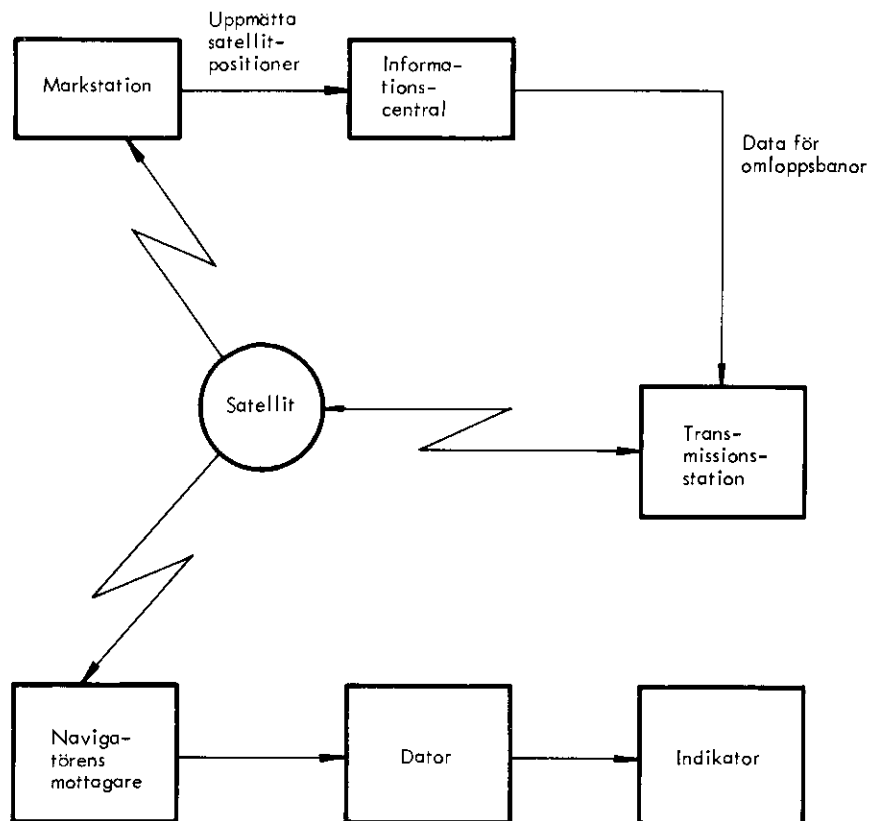


Bild 9.39 Satellitnavigeringssystem, blockschema

1. En eller flera satelliter, som utgör grundvalen för navigeringsinformationen. Satelliternas omloppsbanor och höjd bestäms av önskad navigeringsnoggrannhet, önskat täckningsområde och antal satelliter i systemet.
2. Ett antal markstationer, som följer och övervakar satelliterna. Navigeringsnoggrannheten är beroende av hur noggrant satellitbanorna kan beräknas.
3. En informationscentral, som tar emot data från markstationerna och beräknar parametrarna för omloppsbanorna. Dessa parametrar uppdateras kontinuerligt och predikteras för framtiden så långt detta är möjligt.
4. En datalänk mellan informationscentralen och navigatören, vanligtvis via satelliten. Data för omloppsbanorna sänds till satelliten, som lagrar denna information. Satelliten sänder i sin tur informationen till navigatören vid anfordran eller periodvis helt automatiskt.
5. Navigatörens mottagare och beräkningsutrustning. Mottagaren kan vara:
 - en radiosextant för ett A-system enligt ovan
 - en dipolantenn för ett B-system enligt ovan
 - en radarmottagare för ett C-system enligt ovan
 - en vanlig transponder, om beräkningarna görs i satelliten eller i informationscentralen.

Beräkningsutrustningen kan variera i komplexitet beroende på vilket system som tillämpas och vilken noggrannhet som önskas. Allt mellan tabellverk och dator är tänkbart.

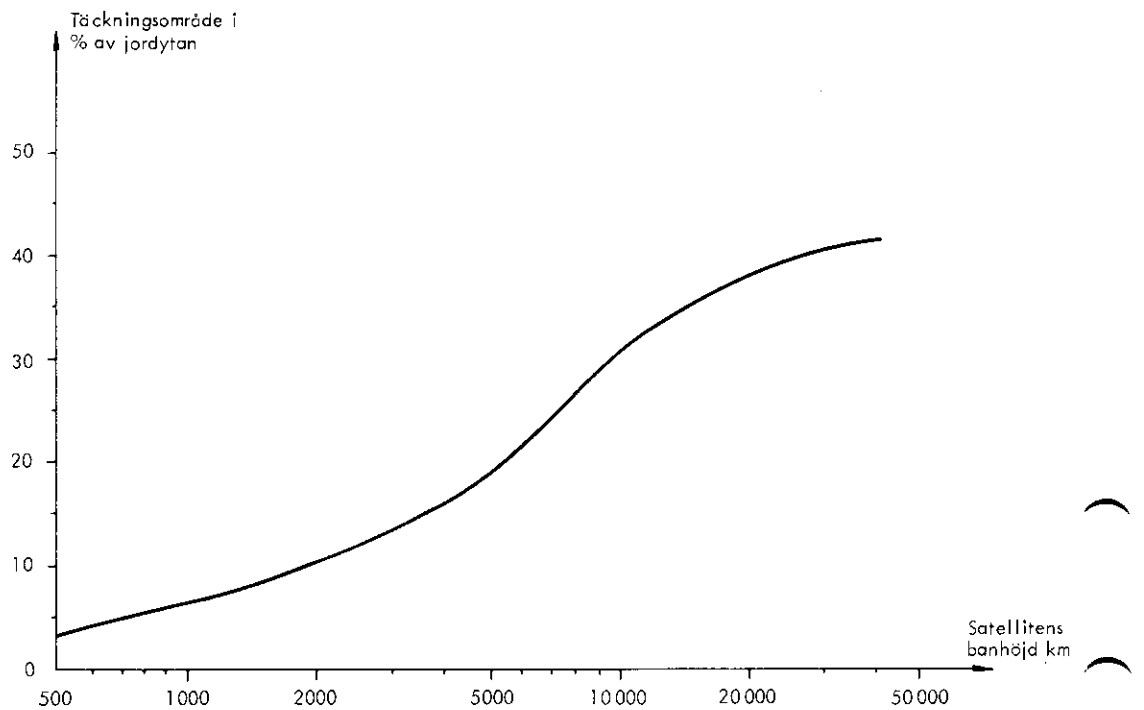


Bild 9.40 Förhållandet mellan täckningsområde och satellithöjd

Noggrannheten i positionsbestämningen är beroende av den noggrannhet med vilken man kan avgöra en satellits omloppsbana. För en satellit med banhöjden 200–1000 km har man uppskattat noggrannheten hos predikterade omloppsbanaor 12 timmar framåt i tiden till ca 200–300 m. Efter 4 dagar har felet vuxit till 5 km. Prediktionsnoggrannheten växer med ökande banhöjd.

En viktig parameter hos satelliterna i ett satellitsystem är täckningsområdet. Detta bestäms av banhöjden, effekten och mottagarstationen. Täckningsområdets beroende av satellitbanans höjd framgår av bild 9.40.

En likaledes intressant parameter är tiden för och tidsintervallet mellan satellitkontakt. Satelliter i låga omloppsbanaor har kortare omloppstider och täcker mindre jordytor under tätare tidsintervall än satelliter i höga omloppsbanaor.

9.6.2 Funktion

I ett tänkt vinkelmätande system kan elevationsvinkeln till satelliten mätas. Då erhålls en eller flera ortlinjer. Vinkelmätningen måste vara mycket noggrann. Ett fel om $0,1^\circ$ medför nämligen ett positionsfel om 8–9 km.

I ett föreslaget system sänder ett flygplan som önskar positionsuppdatering en signal. Denna tas emot av satelliten, som har antenner längst ut på fyra 15 m långa vinkelräta armar. Satelliten mäter riktningen på signalerna från flygplanet med de två paren ortogonala antenner. Vinkelinformationen meddelas därefter flygplanet (eventuellt via informationscentralen), som ur informationen utvärderar sin position.

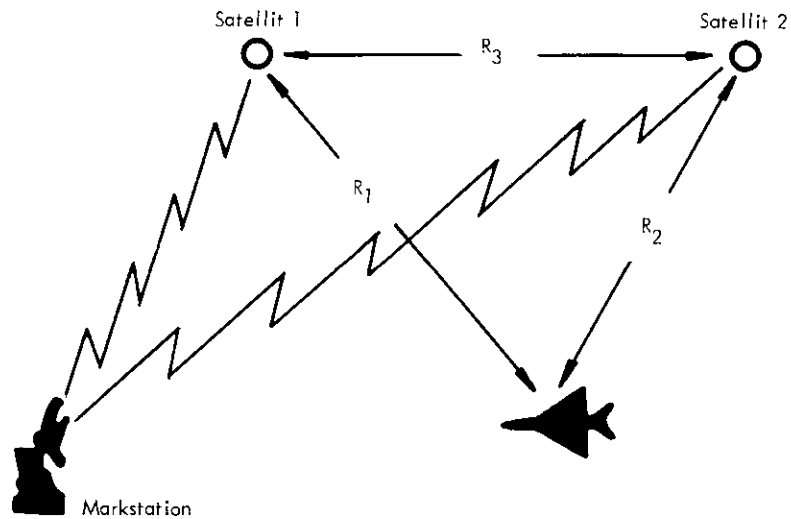


Bild 9.41 Avståndsmätande system som pulsgångtider för från markstationen utsända pulser

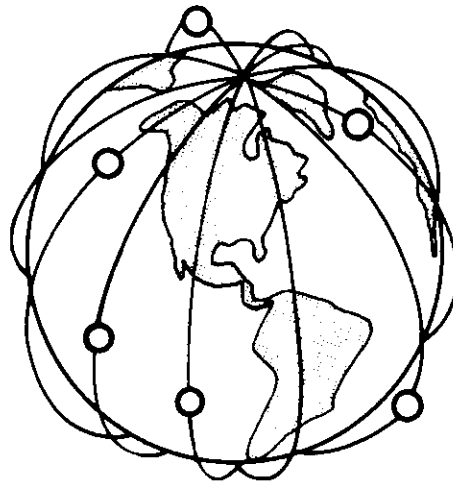


Bild 9.42 TRANSIT, satellitnavigerings-system med 6 satelliter

Avståndsmätningssystemen förutsätter minst två satelliter med en markstation för att ge täckning i ett visst område. När flygplanet kommer in i området meddelas markstationen dess identitet och hastighet. Markstationen sänder då kodade signaler till flygplanet via satelliterna. Flygplanets transponder (se kap 10) sänder tillbaka signalerna via satelliterna och markstationen utvärderar avstånden R_1 och R_2 samt bestämmer flygplanets position. Se bild 9.41. Positionen meddelas flygplanet och flygtrafikledningscentralen i området. Om även flygplanets höjd skall bestämmas erfordras tre satelliter.

System för avståndsförändringsmätning utnyttjas för mätning av dopplerfrekvensen. Denna princip är den vanligtvis använda för satellitnavigeringssystem. Ett dylikt system är »Navy Navigation Satellite System (NNSS) eller Transit, som ursprungligen utvecklades för amerikanska flottan. Med tiden har även andra intressenter såsom handelsfartyg och flygplan börjat utnyttja systemet. Transit är fortfarande det enda fullt användbara satellitsystemet (1972). Se bild 9.42

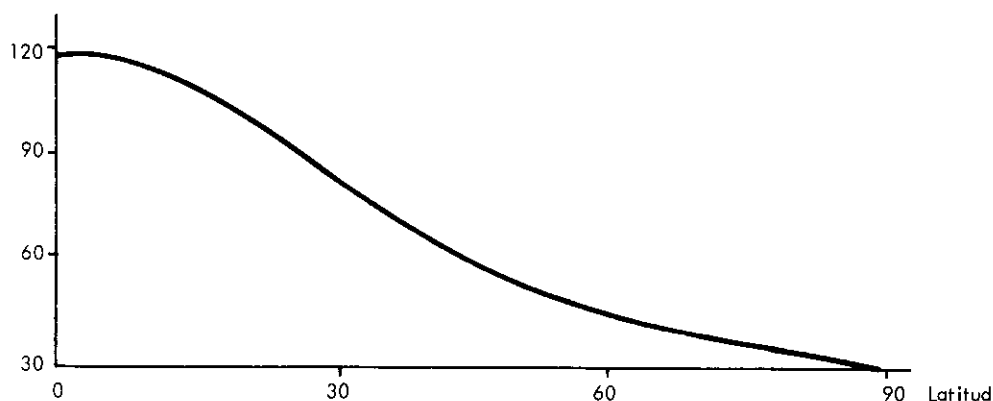


Bild 9.43 Tidsintervallet mellan fixmöjligheter i TRANSIT med 6 satelliter

Transitsystemets satelliter sänder signaler på två frekvenser som mäts dels av fasta markstationer, dels av mottagarstationer (flygplan, fartyg). Markstationerna beräknar banparametrar för kommande omloppsbanor. Denna predikterade baninformation transmitteras till respektive satellit som lagrar dessa data, för att vidareutsända dessa fasmodulerade på bärvägorna tillsammans med tidsmarkeringar. Aktuell banprediktion meddelas satelliten var 12:e timma.

En mottagarstation avkodar satellitens signal och genom dopplerfrekvensmätning på signalen utvärderas avståndsförändringen mellan satellit och mottagare. Doppler behandlas i avsn 8.7. Principerna för hur man i detalj utviner sin position med Transitsystemet redovisas ej här. Se ref [9:11, 9:12]. Systemet kräver dock en dator på mottagarsidan för de beräkningar som måste utföras. Den noggrannhet som kan uppnås kan uppskattas till bättre än 500 m.

Transitsystemet har för närvarande sex satelliter (se bild 9.42) med cirkulära omloppsbanor. Omloppstiden är 1–2 timmar. Beroende på mottagarens latitud kan positionsfix erhållas i tidsintervall mellan 2 timmar och 30 minuter, se bild 9.43.