

# INNEHÅLL

10	RADAR	3
10.1	Allmänt	3
10.1.1	Räckvidd	4
10.1.2	Mätning av avstånd, riktning och hastighet	5
10.1.3	Speciella egenskaper	7
10.2	Markradar	10
10.2.1	Användning	10
10.2.2	Spaningsradar	11
10.2.3	Höjdmätande radar	11
10.2.4	Väderradar	13
10.3	Flygburen radar	13
10.3.1	Allmänt	13
10.3.2	Utrustning	14
10.3.3	Terräng- och väderekon	15
10.3.4	Manuell jämförelse mellan karta och radarbild	16
10.3.5	Fixtagning	17
10.3.6	Radarfyrrar	17
10.3.7	Automatisk jämförelse radarbild/kartbild	18
10.3.8	Hinderindikering och terrängföljning	18
10.4	Sekundärradar och igenkänningsutrustning	19

## 10 RADAR

### 10.1 ALLMÄNT

Radars princip kan definieras som en princip att med hjälp av radiovågor upptäcka och lokalisera föremål (i fortsättningen kallade mål). En anläggning som arbetar enligt denna princip kallas radarstation eller i förkortad form radar. Ordet »radar» är en sammandragning av begynnelsebokstäverna i det amerikanska uttrycket »radio detection and ranging» vilket i översättning betyder »upptäckt och avståndsmätning med radio». Benämningen kom till inom den amerikanska flottan under andra världskriget. Det var också under andra världskriget som den moderna radartekniken fick sitt genombrott till följd av det intensiva forsknings- och utvecklingsarbete som bedrevs inom detta område i främst England och USA.

I våra dagar är radartekniken en välutvecklad och avancerad teknik med många tillämpningar i såväl civila som militära sammanhang. Övervakning av luftrummet, styrning av vapen, navigering och trafikövervakning är några exempel på radarns användningsområden. Gemensamt för alla tillämpningar är att man utnyttjar någon eller några av radarns egenskaper att kunna upptäcka mål och mäta avstånd, riktning och hastighet. Radarns stora värde ligger i att dessa funktioner kan erhållas även under sådana besvärliga förhållanden som vid mörker, dis, dimma, regn och snö. Under dylika betingelser är radarn idag oöverträffad.

Radarns principiella uppbyggnad och funktion illustreras av bild 10.1. Som syns består en radar väsentligen av en sändare och en mottagare, vilka är kopplade till var sin antenn. I praktiken förekommer dock nästan uteslutande endast en antenn, som då utnyttjas för både sändning och mottagning, men under skilda tidsintervall. I princip fungerar radarn så att sändaren via antennen utstrålar radiovågor, som utbreder sig i olika riktningar. När radiovågorna träffar ett mål, reflekteras de så att en del återvänder tillbaka mot radarn och uppfångas av antennen. I mottagaren detekteras och analyseras sedan den reflekterade strålningen, det s k målekot, varigenom information (t ex avstånd, riktning och hastighet) om målet kan utvinnas.

Alla mål, som reflekterar elektromagnetisk strålning, kan i princip upptäckas med radar. Upptäcktsmöjligheterna är emellertid beroende av olika faktorer som målets storlek, form och material samt den bakgrund som målet uppträder mot. Exempelvis ger ett stort mål för det mesta ett kraftigt måleko medan

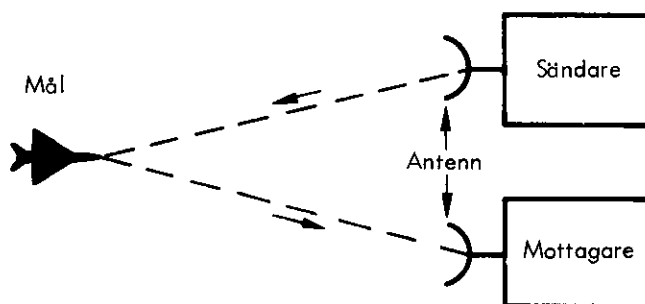


Bild 10.1 Radarns uppbyggnad och funktion

målets form i allmänhet medför att ekots styrka varierar med strålningens infallsriktning. Vidare ger mål av metall upphov till kraftigare ekon än icke-metalliska mål. Detta utesluter dock inte att mål som t ex byggnader av trä, regnmoln eller terräng av olika slag lämnar ekon, som kan detekteras med radar. I vissa radartillämpningar utgör dylika ekon ett störande inslag i form av bakgrundsekon, t ex när man vill upptäcka mål på marken.

Ytterligare en faktor av betydelse för upptäcktsmöjligheterna är radiovågornas utbredningsförhållanden. Under vägen till målet och åter dämpas nämligen radiovågorna i atmosfären (se kap 3). Vid förekomst av nederbörd av olika slag kan utbredningsdämpningen bli mycket stor och leda till en avsevärd försämring av radarns prestanda.

### 10.1.1 Räckvidd

Med en radars räckvidd avses det största avstånd för vilket det är möjligt att detektera ett mål. Räckvidden är beroende av faktorer som kan hänföras till målets, radarns och radiovågornas egenskaper. Dessa beroenden uttrycks matematiskt i radarekvationen, som brukar användas för beräkning av radarräckvidder. Radarekvationen behandlas ej här. Den intresserade hänvisas till litteraturreferensen [10:1] eller annan lärobok i radarteknik.

Ekvationen ger ett samband mellan radarns sändareffekt och räckvidd. Ett fjärderotsförhållande råder mellan effekten och räckvidden, vilket innebär att en fördubbling av sändareffekten endast ger en ca 20 % räckviddsökning.

Av den från målet reflekterade strålningen återkommer en del till mottagaren. Den mottagna signalens styrka är beroende av målets reflektionsegenskaper, atmosfärsdämpningen, antennegenskaperna, osv. För att signalen skall kunna detekteras i mottagaren måste den kunna urskiljas bland de störande onyttiga signalerna. Dessa är t ex oönskade reflektioner från föremål vid sidan om målet samt i mottagaren alstrat brus.

Mottagarens känslighet, vilken är den minsta detekterbara signalen, begränsas av brus. Brus uppträder i alla elektroniska system, och utgörs av oregelbundna signaler. Förutom brus förekommer även störande signaler som härrör från målets omgivning, t ex terräng, nederbörd och liknande. Dessa signaler tenderar, liksom mottagarbruset, att maskera nyttiga ekosignaler. Genom lämplig konstruktion av mottagaren kan viss förmåga att skilja nyttsignalerna från dylika störande signaler erhållas. Förekomsten av störande signaler bidrar dock generellt till att radarns räckvidd minskar.

En ytterligare faktor att beakta är den räckviddsbegränsning, som radarhorisonten utgör. Radarn kan endast upptäcka mål som ligger över denna horisont. Mål på låg höjd och stort avstånd ligger då i radarskugga, enligt bild 10.2.

Man kan visa att den horisontbegränsade räckvidden (se avsn 3.6.3) är

$$R_h \approx 4,1 (\sqrt{h_s} + \sqrt{h_m}) \quad [\text{km}]$$

där

$$h_s = \text{radarns (sändarens) höjd} \quad [\text{m}]$$

$$h_m = \text{målets höjd} \quad [\text{m}]$$

Denna räckvidd är något större än den geometriska beroende på att radiovågorna avböjs av atmosfären.

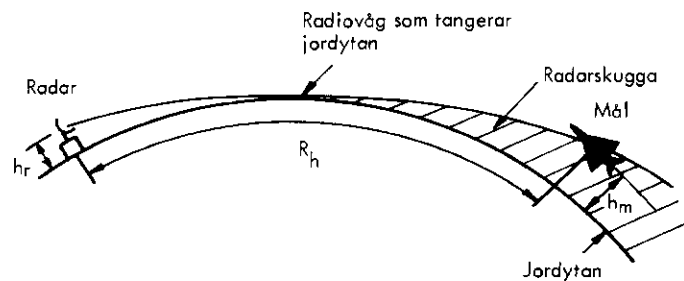


Bild 10.2 Horisontbegränsad räckvidd

### 10.1.2 Mätning av avstånd, riktning och hastighet

I praktiskt taget alla radartillämpningar är man utöver målupptäckt intresserad av att lokalisera målet, dvs mäta avstånd, riktning och hastighet.

Avståndsmätning, som förmodligen är radarns viktigaste funktion, grundar sig på radiovågornas utbredningshastighet. Avståndet till ett mål bestäms genom att man mäter tiden mellan utsändning av en signal och mottagning av ekot. Eftersom den elektromagnetiska vågen färdas med ljusets hastighet erhåller man

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

där

R = avståndet till målet  
 c = ljusets hastighet =  $3 \cdot 10^8$  m/s  
 t = uppmätt tid

Den utsända signalen måste moduleras på något sätt för att man skall kunna känna igen den vid mottagandet. Den utan jämförelse vanligaste modulationsformen är pulsmodulering (se avsn 3.6.1), som innebär att signalen sänds i form av korta pulser. Antalet pulser per sekund är radarns pulsrepetitionsfrekvens (prf) (= 1/periodtiden). Bild 10.3 visar avståndsmätning enligt pulsradarprincipen.

Den utsända pulsen reflekteras av målet och återvänder vid en tidpunkt som bestäms av målavståndet. För entydig mätning fordras att pulsens totala gångtid är kortare än tiden mellan två pulser, periodtiden.

Radarns entydiga mätavstånd kan då skrivas

$$R_{\text{entyd}} = \frac{c \cdot T}{2} = \frac{c}{2 f_p} \quad [\text{m}]$$

där

T = periodtid  
 $f_p$  = pulsrepetitionsfrekvensen

En markspaningsradar (avsn 10.2) med t ex  $f_p = 300$  Hz har ett entydigt mätavstånd på 500 km. Motsvarande avstånd för en flygburen radar (avsn 10.3) med t ex  $f_p = 1000$  Hz är 150 km.

Förutom det entydiga avståndet är radarns förmåga att skilja mellan olika mål av betydelse. Radarns upplösningsförmåga m a p avståndet sätts av pulslängden

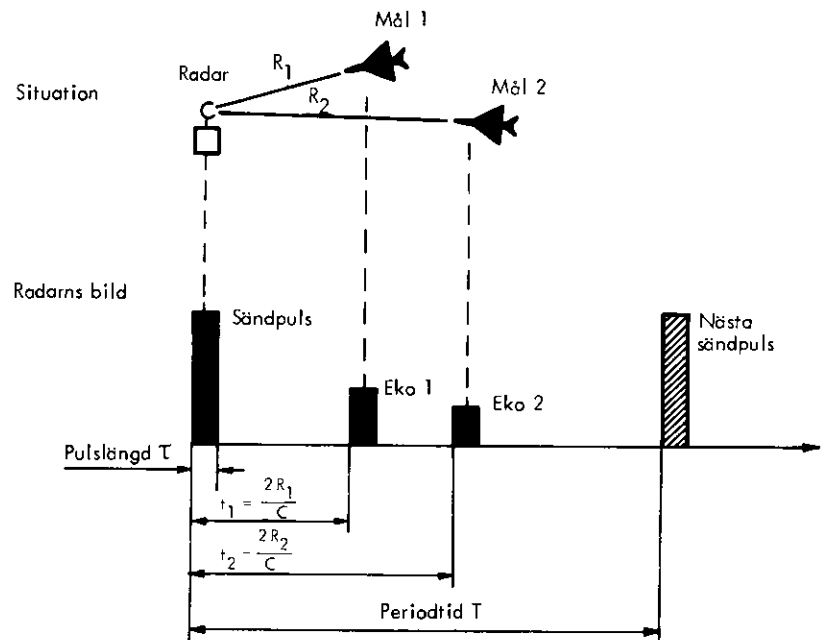


Bild 10.3 Avståndsmätning enligt pulsradarprincipen

$\tau$ . Om ekon från två mål inträffar i radarmottagaren med kortare tidsmellanrum än  $\tau$  kommer de nämligen att uppfattas som enda eko. Avståndsupplösningen  $\Delta R$  uttryckt i meter kan därför tecknas

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2}$$

vilket anger den minsta avståndsskillnad som erfordras, för att radarn skall kunna särskilja två mål. För en markspaningsradar med  $\tau = 4 \mu\text{s}$  är avståndsupplösningen 600 m, medan en flygradar med  $\tau = 0,1 \mu\text{s}$  har motsvarande upplösning 15 m.

Vid sidan av pulsradar förekommer även radartyper, som utnyttjar kontinuerliga signaler vid avståndsmätning. En modulationsform, som därvid fått en viss användning, är frekvensmodulering (se avsn 3.6.1). Den grupp av radar, där denna modulationsform utnyttjas, går under benämningen FM-radar.

Avståndsmätningen grundar sig på periodisk modulation av frekvensen. Eftersom ekosignalen är tidsförskjuten i förhållande till den utsända signalen, kan man, ur frekvensskillnaden mellan de två signalerna få ett mått på målavståndet (jfr radarhöjdmätaren avsn 8.8).

Mätning av riktning sker i radarsammanhang med hjälp av riktantenner. De viktigaste egenskaperna hos en riktantenn visas av bild 10.4 som visar hur strålningen från en riktantenn fördelar sig i olika riktningar.

Bilden visar ett snitt genom det tredimensionella strålningsdiagrammet. Största delen av den till antennen inmatade effekten utstrålas genom huvudloben medan resten utstrålas via sidolober och baklob.

Radarns vinkelupplösningförmåga i ett plan beror av lobvinkeln i samma plan. Den minsta skillnad, som måste finnas mellan riktningsvinklarna i detta plan till två mål för att de inte skall presenteras som ett enda, är lika med lobvinkeln. Lobvinkeln är även ett mått på radarns vinkelmättnoggrannhet. I allmänhet är lobvinkeln av storleksordningen  $1-3^\circ$ .

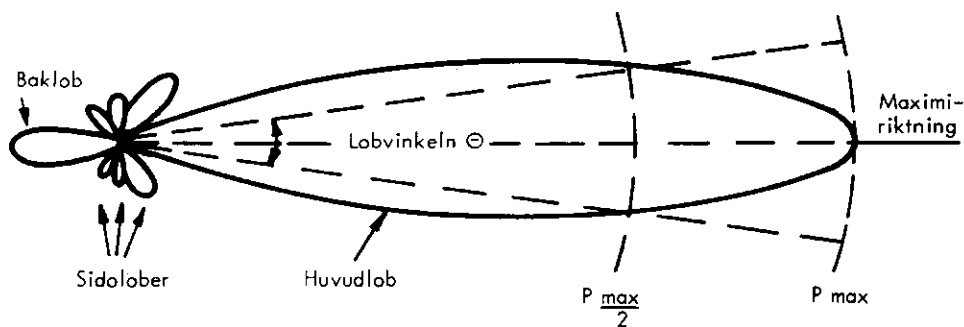


Bild 10.4 Strålningsdiagram för en riktantenn

Hastighetsmätning med radar baserar sig främst på dopplereffekten. En signal av en viss frekvens erhåller som bekant en annan frekvens efter reflektion mot ett mål i rörelse. Frekvensändringen eller dopplerförskjutningen är proportionell mot målets hastighet enligt uttrycket (jfr avsn 8.7).

$$f_d = \frac{2v}{\lambda}$$

där

- $f_d$  = dopplerförskjutningen [Hz]
- $v$  = målets (radiella) hastighet [m/s]
- $\lambda$  = våglängden [m]

Dopplerförskjutningen är positiv för mål som närmar sig och negativ för mål som avlägsnar sig.

En radar som utnyttjar dopplereffekten för att antingen bestämma målhastighet (t ex vid hastighetsradar) eller särskilja mål med olika hastighet (t ex för att undertrycka ekon från icke önskat mål) kallas dopplerradar. I radarmottagaren mäts hastigheten i allmänhet med hjälp av dopplerfilter. Varje dopplerfilter släpper igenom dopplerfrekvenser som svarar mot ett visst hastighetsintervall, vilket bestämmer radarns hastighetsupplösningsförmåga.

Det förekommer ofta att avstånds- och hastighetsmätning utförs med samma radar. Den vanligaste radartypen är pulsdopplerradarn (PD-radarn) men även den frekvensmodulerade dopplerradarn (FMD-radarn) förekommer.

Hastighetsmätning kan emellertid även ske utan att dopplereffekten utnyttjas. Med varje radar, som kan bestämma ett måls position, har man nämligen möjlighet att ur successivt uppmätta positioner beräkna målets förflyttning och hastighet. Detta är ett vanligt förfarande bl a i luftövervakningssammanhang.

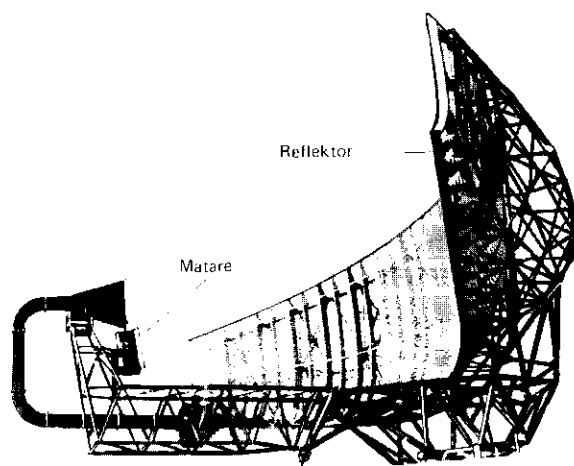
### 10.1.3 Speciella egenskaper

Som framgått förekommer olika funktionstyper av radar. Den schematiska uppbyggnaden enligt bild 10.1 är dock allmängiltig.

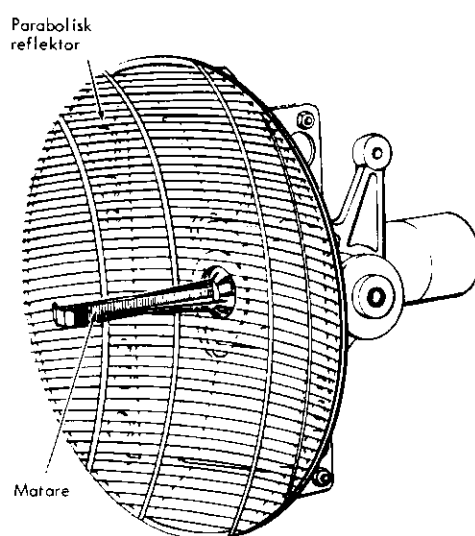
Den vanligtvis förekommande antenntypen är den s k reflektorantennen. En reflektorantenn består av en välvd metallyta, reflektorn, som reflekterar och koncentrerar strålningen från en liten primärstrålare, mataren. Stora reflektorer utförs alltid av finmaskigt trådnät, för att vindpåkänningen inte skall bli för stor.

Som skydd mot väder och vind förekommer även radomer, dvs höljen av material som släpper igenom radarstålningen.

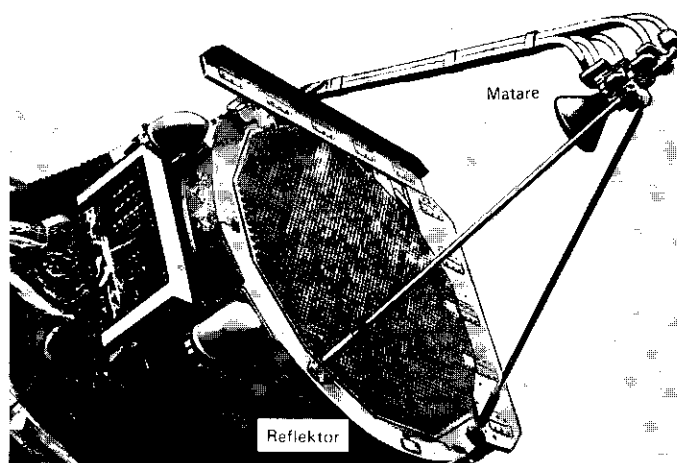
Ett par exempel på vanliga antennutföranden visas på bild 10.5.



a. Markspaningsradar



b. Eldledningsradar



c. Flygburen radar med elektroniskt styrd antenn

*Bild 10.5 Olika typer av radarantenn*

Antennen i bild 10.5 a används i markspaningsradar. Den har liten lobvinkel i horisontalplanet men stor lobvinkel i vertikalplanet. Med en sådan skivlob kan endast målets bäring mätas. Den andra antennen, i bild 10.5 b, utnyttjas i ledningsradar och har en rotationssymmetrisk pennlob med små lobvinklar, vilket möjliggör mätning av både sid- och höjdvinklar till målet.

I de flesta tillämpningar har radarn till uppgift att söka efter mål inom ett stort område av luftrummet. Antennen är därför rörlig kring en axel så att loben kan orienteras i olika riktningar. Hos sk elektriskt styrda gruppantennor (ELSA) kan lobriktningen och även lobbredden varieras på elektronisk väg. Bild 10.5 c visar en flygburen radar med en elektriskt styrd antenn. Jämför med bild 10.10.

Presentationen av målinformation kan ske på olika sätt. I allmänhet presenteras ekosignalen med lämpliga referenser visuellt med hjälp av katodstrålerör. Indikatorerna indelas i olika typer efter den information de ger. De flesta indikatorerna har ursprungligen erhållit bokstavsbezeichnungar.

Den vanligaste typen är den planpolära indikatorn (PPI), bild 10.6 a. Med den presenteras avstånd och sidvinkel till målet i ett polärt koordinatsystem. På indikatorskärmen startas ett avståndssvep i radiell riktning vid varje utgående sändarpuls (pulsradar). Avståndssvepet åstadkoms med hjälp av en svepstörning från svepgeneratoren, vilken startas av samma styrpuls som modulatorens. Ett måleko i form av en videopuls ger en ljuspunkt på skärmen under avståndssvepet. Avståndet mellan skärmens centrum och ljuspunkten blir då ett mått på målavståndet. I takt med antennens rörelse bringas avståndssvepet att vridas runt så att sidvinkelinformation erhålls. Eftersom skärmen är belagd med ett fosforescerande material med viss efterlysning, erhåller man en kartliknande bild av omgivningen.

I radarsystem där antennloben sveper fram och tillbaka över en sektor om  $30-90^\circ$  har ofta indikatorn samma form. Detta är t ex fallet i en (flygburen) attackradar där en indikator kallad sektor-PPI (bild 10.6 b) förekommer. I en jaktradar används emellertid hellre en B-indikator (bild 10.6 c), som ger avstånd och sidvinkel till målet i ett rätvinkligt koordinatsystem.

En A-indikator (bild 10.6 d) används för presentation av målavstånd. Målekona återges här som taggar på ett rakt svep.

Med en C-indikator (bild 10.6 e) ges information om sidvinkel och höjdvinkel till målet i ett rätvinkligt koordinatsystem.

Den indikatorbild som presenteras för radarobservatören är normalt behäftad med brister, som försvårar tolkningen av den. En radarutrustning är därför i allmänhet försedd med ett antal speciella funktioner, som gör det möjligt för observatören att göra indikatorbilden tydligare.

Bland de enklare medlen kan nämnas användningen av olika avståndsområden. I allmänhet är det varken nödvändigt eller önskvärt att utnyttja radarns maximala räckvidd. Man låter därför operatören ha möjlighet att välja lämpligt avståndsområde, så att indikatorn utnyttjas optimalt och för situationen bästa upplösning erhålls. Indikatorerna är ofta försedda med koncentriska avståndsringar eller andra avståndsmarkeringar, så att avståndet kan avläsas direkt. Liknande uppgift fyller de vinkelgraderingar som förekommer på indikatorerna.

Många indikatorer är försedda med en markör med vilken operatören kan utmärka mål på indikatorskärmen t ex för vidare befordran av målets koordinater till en dator. Markören kan ibland vara mekanisk, men för det mesta genereras den på elektronisk väg, precis som radarbilden.



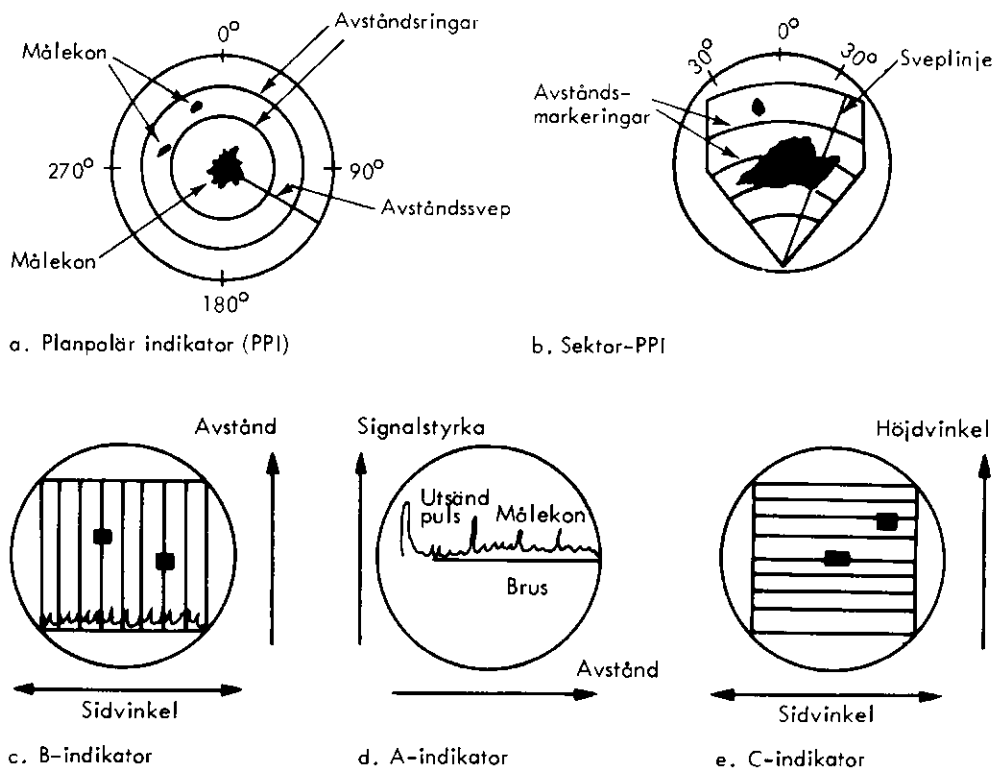


Bild 10.6 Radarindikatorer

Närbelägna mål ger starkare ekon än mål på större avstånd, vilket kan leda till svårigheter vid inställningen av förstärkningen. Detta problem kan elimineras om förstärkningen görs avståndsberoende vilket innebär att ekon från närbelägna mål förstärks kraftigare än ekon från avlägsna mål. Avståndsberoende förstärkning medger även en viss reducering av de kraftiga markekon, som kommer från en radarstations omedelbara närhet. Ibland kan dessa markekon vara så kraftiga att det blir nödvändigt att helt strypa mottagaren för ekon från närzonen.

Eliminering av markekon är likaså syftet med MTI (Moving Target Indication), som är en mottagarteknik för undertryckning av ekosignaler från fasta mål. Mottagaren filtrerar bort alla ekon som inte är dopplerskiftade. På indikatorn presenteras endast ekon från rörliga mål. Denna teknik underlättar upptäckt av rörliga mål, t ex lågtflygande flygplan, i närvaro av markekon.

## 10.2 MARKRADAR

### 10.2.1 Användning

Den i flygsammanhang viktigaste användningen av markbaserade radarsystem torde vara för övervakning av luftrummet. Från att ursprungligen ha varit en nästan enbart militär angelägenhet har luftrumsövervakning numera fått mycket stor betydelse även på det civila området, där radar utnyttjas för övervakning och ledning av flygtrafiken. Den militära sidan av övervakningen omfattar upptäckt och varning för fiendliga flygplan och robotar, inmätning och följning av dessa samt ledning (stridsledning) av egen flygverksamhet. Både den civila och den militära övervakningen av luftrummet ombesörjs av stora spaningsradar-

stationer av varierande utföranden, i allmänhet kompletterade med någon form av höjdmätande radar. I detta sammanhang talar man även om primärradar och sekundärradar. Med primärradar avses då radar, som endast utnyttjar från målet reflekterad strålning, medan benämningen sekundärradar syftar på radar, som utnyttjar automatiskt återutsänd strålning från en radarsvarare i målet. Återutsändningen kan, utom normal radarinformation, innehålla ytterligare information, t ex identitet och flyghöjd (jfr avsn 10.4).

En annan viktig användning av markradar i flygsammanhang är landningsradarn.

Även den markbaserade väderradarn kan anses vara av betydelse för flygverksamheter. Med dess hjälp kan meteorologerna kartlägga väderleksläget, t ex nederbördsområden och molnförekomster, över vidsträckta områden.

Förutom de ovan uppräknade tillämpningarna för markradar, som är av särskilt intresse i flygsammanhang, förekommer markbaserade radarsystem på många områden av vilka vapenstyrning torde vara det viktigaste. I detta avsnitt begränsas emellertid redogörelsen till radartyper, som förekommer i ovannämnda sammanhang, med undantag för landningsradarn, som beskrivs i avsn 15.2.4.

### 10.2.2 Spaningsradar

Spaningsradarn är ett viktigt hjälpmedel för övervakning av luftrummet. Den har till uppgift att ombesörja upptäckt och lokalisering av flygande mål, dvs huvudsakligen flygplan och robotar.

Den vanligaste typen av spaningsradar presenterar på en PPI en översiktsbild av luftrummet i likhet med en karta, dvs situationen ses ovanifrån med radarn i bildens mitt. Omfånget av det område eller luftrum, som kan övervakas, bestäms av radarns räckvidd, som varierar upp till 500 km.

Kännetecknande för spaningsradarstationer är att de arbetar med mycket höga avgivna sändareffekter. Pulseffekter av storleksordningen flera megawatt (MW) är således inte ovanliga. Dessa höga uteffekter är betingade av kravet på stor räckvidd, vilket också medfört att de lägre radarfrekvenserna utnyttjas. På dessa frekvenser är atmosfärsdämpningen förhållandevis låg. Av detta skäl arbetar de flesta spaningsradarstationerna vid våglängder omkring 10–20 cm. Beträffande våglängdsband se avsn 3.6.2.

Den information om målet som erhålls från spaningsradarn skall i regel utnyttjas för flygtrafikledning eller stridsledning. Dessa funktioner utförs normalt i centraler dit radarinformationen från flera radarstationer matas via (mikrovågs) länkar. Från samma central kan därmed stora områden övervakas.

Då en spaningsradar används för flygtrafikledning kallas den *primärradar*. Jfr sekundärradar i avsn 10.4.

### 10.2.3 Höjdmätande radar

Informationen från en vanlig spaningsradar saknar, som påpekats ovan, uppgifter om målets höjd. Målhöjden bestäms därför i regel med en separat höjdmätningssradar. Med en sådan radar mäts höjdvinkeln till målet samt lutande avståndet. Ur dessa storheter kan sedan målhöjden beräknas.

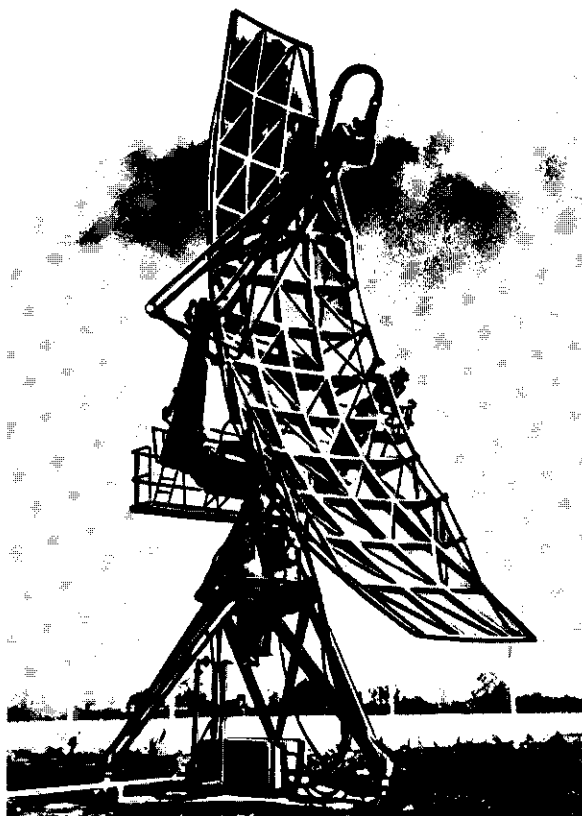


Bild 10.7 Nickande höjdmätare

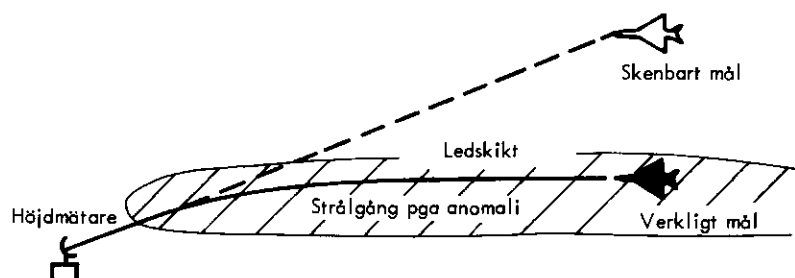


Bild 10.8 Höjdfel p g a anomal utbredning

För bestämning av elevationsvinkeln utnyttjas en skivlob med horisontal utsträckning, vilket erfordrar en antenn med stor utsträckning i vertikalled men relativt liten utsträckning i horisontalled. Höjdmätaren visas normalt av en spaningsradar till målets bäring, och sveper sedan med loben upp och ned tills den funnit målet. Denna typ av höjdmätare kallas därför nickande höjdmätare. Ett exempel på en dylik visas på bild 10.7.

Det har också blivit allt vanligare att förse spaningsradarstationer med särskilt utformade antennlobsystem, för att de skall kunna utföra höjdmätning. Dessa radarstationer går under benämningen trekoordinatradar (eller 3D-radar) eftersom de lokaliserar mål i tre koordinater.

Genom tillkomsten av elektriskt styrda gruppantennor har nya möjligheter för höjdmätning skapats. Tack vare den snabba lobstyrning som är möjlig, kan tredimensionella sökprogram åstadkommas. Exempelvis kan elektronisk svepning av en pennlob försiggå i vertikalled medan antennen på mekanisk väg spanar horisonten runt.



*Bild 10.9 PPI-bild av molninformationer*

I radarsammanhang påverkas vågutbredningen ofta av horisontala skiktningar i atmosfären, så kallat ledsikt. Den så kallade anomala vågutbredningen, som därvid uppstår, yttrar sig bl a i onormalt stora räckvidder på låg höjd för spaningsradarstationer. Effekten av den normala utbredningen är emellertid särskilt kännbar i höjdmätningssammanhang, där felet i höjdangivelse kan bli mycket stort. Ett exempel på en sådan mätsituation visas på bild 10.8.

#### 10.2.4 Väderradar

Tidigare har påpekats att en av radarns främsta egenskaper är förmågan att »se» under besvärliga väderleksförhållande. Denna förmåga är dock inte oberoende av väderleken och för radarstationer, som arbetar vid de högre radarfrekvenserna, är vädrets inverkan högst märkbar. Detta förhållande utnyttjas därför i en speciell typ av radar, kallad väderradar, som begagnas för meteorologiska ändamål.

Till sin uppbyggnad och funktion kan väderradarn närmast jämföras med spaningsradarn. Dess huvuduppgift är emellertid att detektera olika väderekon. För detta syfte har frekvenser på X-bandet (ca 3 cm våglängd) visat sig vara bäst lämpade. Typiska räckvidder för väderradarstationer är 15–30 mil. Inom detta område kan förekomst av moln, regn, snöfall, m m kartläggas och uppskattning av nederbörds mängder göras. Vanligtvis presenteras den samlade informationen över väderlekssituationen på en PPI. Flyg och andra verksamhetsgrenar, som är beroende av vädret, kan på detta sätt få noggranna prognoser över väderleksläget. Bild 10.9 visar en PPI-bild över molninformationer som upptagits med en väderradar.

### 10.3 FLYGBUREN RADAR

#### 10.3.1 Allmänt

I detta avsnitt diskuteras egenskaper och tillämpningar speciella för flygburen radar. Avsn 10.3.2–3 behandlar utrustningen och miljöns egenskaper, varefter övriga avsnitt ägnas åt tillämpningar. Bland tillämpningar av flygburen radar märks

- navigering genom manuell jämförelse radarbild/karta
- precisionsnavigering vid företag på låg höjd
- fixtagning
- navigering genom automatisk jämförelse radarbild/karta («mapmatching»)
- platshållning
- terrängföljning och hinderindikering
- vädervarning
- målspaning och målföljning vid jaktuppdrag
- avståndsmätning mot mark- eller sjömål
- spaning
- stridsledning från flygplan

En och samma utrustning kan givetvis inte användas för alla dessa ändamål (vissa flygplan har flera utrustningar för att kunna täcka fler funktioner). I det följande behandlas endast funktioner väsentliga för navigeringen.

### 10.3.2 Utrustning

Antennen är vanligen placerad i flygplanets noskon som därvid fungerar som radom (bild 10.10). Jämför med bild 10.5 c. Denna antennplacering kallas ibland FLAR (Forward Looking Airborne Radar). Vid kartritning genereras en i azimut smal och i elevation relativt vid lob (bild 10.11). I andra sammanhang (t ex målföljning) används en sk pennlob med ungefär samma utsträckning i azimut och elevation och i åter andra (t ex vissa hinderindikerande system) en lob med stor azimut- och liten elevationsutsträckning. Antennen kan bringas att samverka med flygplanets attitydreferens så att flygplanets rörelser i roll- och tippel ej påverkar antennens inriktning.

En helt annan antennprincip används i en sk *syntetisk-aperturradar*. För att få en god upplösning hos en radarbild av terrängen krävs en liten lobbredd (i azimut), vilket i sin tur kräver en stor antenn. Samma verkan som av *en stor* antenn kan erhållas genom samordnad behandling av informationen från *flera små* antenner. Detta kan i sin tur åstadkommas med *en enda liten antenn* under förutsättning att denna *förflyttar sig*. Man samordnar då behandlingen av information som erhållits då antennen befunnit sig på olika punkter i rummet. Förflyttningen åstadkommes givetvis av flygplanets rörelse.

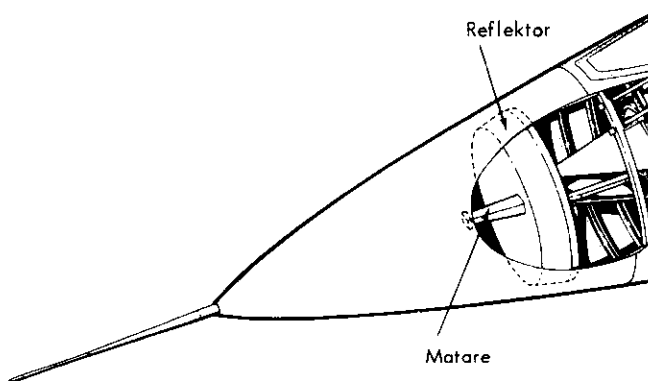


Bild 10.10 Antenn till flygburen radar

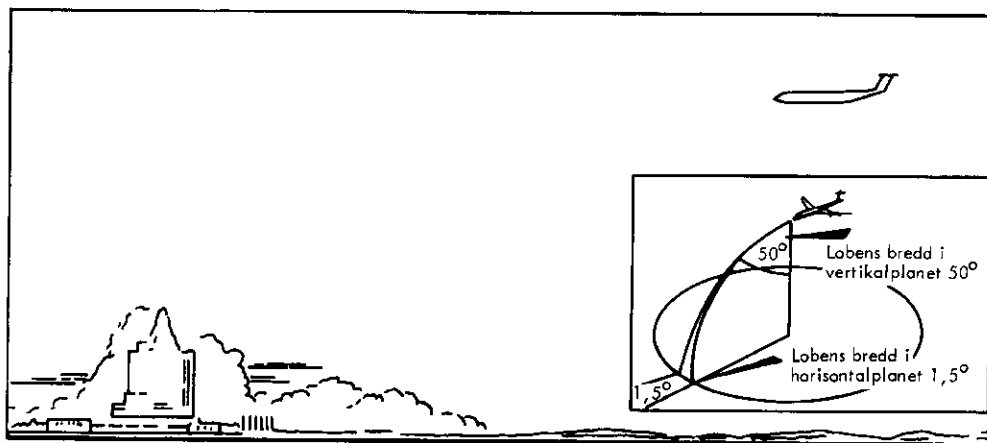


Bild 10.11 Radarlob vid kartritning

I princip kan man på detta sätt ofta erhålla en ekvivalent antenndiameter om flera flygplanlängder i flygriktningen. Upplösningen förbättras med denna metod i *flygplanets rörelseriktning*. I den andra riktningen som då blir *tvärs* rörelseriktningen bestäms upplösningen av pulstiden. Härav inses att en syntetisk-aperturradar måste riktas tvärs flygplanets längdaxel och alltså generera en kartbild av ett område vid sidan av flygplanet. Denna radartyp kallas därför ofta för *sidstrålände radar*, SLAR (Side Looking Airborne Radar). Riktningsegenskapen gör att den främst utnyttjas för spaning.

Den närmast antennen belägna reflektionsobjektet är i allmänhet en punkt omedelbart eller snett under flygplanet. Det första ekot som kan uppenbara sig på indikatorn kommer därför från detta. När ekot anländer till mottagaren har dock svepet redan rört sig en sträcka motsvarande åtminstone flygplanets höjd på indikatorn. Resultatet blir att det på indikatorn uppträder ett sektorformat, obelyst *höjdhål* med radie svarande mot flygplanets höjd. Utanför hålet avbildas terrängen nedanför flygplanet mer eller mindre distorderad. För att eliminera denna olägenhet kan man införa en höjdfördröjning på svepet så att detta inte startar förrän efter en tid svarande mot dubbla gångtiden från flygplanet till marken rakt eller snett under flygplanet.

### 10.3.3 Terräng- och väderekon

Ekon från olika typer av terräng har speciella särdrag. För flera av radarnas användningsområden är det grundläggande att operatören har god kännedom om hur de uppträder på indikatorn.

*Slätmark* (t ex vägar, flygfält) ger i allmänhet relativt svaga ekon, dels på grund av viss speglingseffekt, dels på grund av absorption av strålningen.

*Skog, åker* och annan oregelbunden terräng ger starkare ekon.

*Berg* ger vanligen starka ekon eftersom infallsvinkeln är liten. Ekot kommer emellertid helt och hållet från den sida av berget som vetter mot flygplanet. Den andra sidan ligger i radarskugga och bildar därför ett mycket ljussvagt område på skärmen. Risk finns för att detta förväxlas med sjöar som också ger svaga ekon. Den väsentligaste skillnaden mellan dem är att skuggan ändrar form, storlek och läge medan flygplanet rör sig, vilket sjön inte gör (se även nedan).

*Stränder.* Vatten ger på grund av speglingseffekt svagare ekon än land, varför kontrasten mellan dem blir skarp. Sjöar på radarbilden ser mindre ut än i verkligheten. Till detta kan också ev branta bortre stränder bidra. Dessa ger starka ekon som flyter ut i sjön. Närbelägna stränder blir däremot mindre skarpt markerad. (Detta innebär ytterligare en skillnad mot bergsskuggan ovan; den sistnämnda är ljusare vid den hitre skuggkanten än vid den bortre). Även *is* och *snö* ger av samma skäl som för vatten relativt svaga ekon, dock inte så svaga som vatten.

*Bebyggelse* ger i allmänhet starka och för navigatören värdefulla ekon. Eftersom många stadsplaner är baserade på parallellitet mellan gatorna blir ekona ofta särskilt stora i vissa för den givna bebyggelsen speciella väderstreck där loben träffar en stor mängd byggnader under rätt vinkel (*kardinalpunktseffekt*).

*Hydrometeor.* Regn, moln och dimma ger radarekon (se även avsn 10.2.4). Deras reflektionsförmåga ökar starkt med frekvensen och blir av stor betydelse på X-bandet och högre frekvenser.

Reflektionen ökar också med vattenpartiklarnas storlek. Åskmoln kan ofta ge mycket starka ekon beroende på att vertikala luftströmmar håller relativt stora vattendroppar svävande i dem. På det hela taget kan sägas att ekots intensitet är ett mått på »hårdheten» hos det väder som ger upphov till det. Moln- och regnekona har också betydelse därför att de skuggar för navigatören värdefulla markekon. Molnekona kan identifieras på grundval av följande kännetecken:

- variationer i ekots ljusstyrka
- ekots kanter är i allmänhet diffusa
- typiska terrängkaraktäristika nämnda ovan uppträder ej
- molnet kastar (liksom berg) en skugga, om ingen radarstrålning förmår att tränga igenom det
- ekot försvagas ej om infallsvinkeln ökas, vilket är fallet med markekon
- ekon uppträder i höjdhålet (se ovan) om höjdfördröjning ej används

#### 10.3.4 Manuell jämförelse mellan karta och radarbild

Operatören kan kontinuerligt hålla reda på flygplanets position genom att förlöpande jämföra kartan och radarbilden i enlighet med de tolkningsregler som skisserats i de föregående avsnitten.

Metoden är mycket lik visuell navigering. Vissa skillnader finns dock. Vid visuell navigering utnyttjas väsentligen terrängdetaljer inom några km avstånd som referenspunkter. Radarns upplösningsförmåga är sämre än ögats och antalet möjliga referenspunkter i flygplanets närhet minskar därför. Detta kan emellertid kompenseras av att radarns räckvidd är avsevärt längre än ögats. Terrängdetaljer på flera tiotal km avstånd kan utnyttjas.

En fördel som radarnavigering har framför visuell navigering är att radarbilden i motsats till den visuella observationen visar terrängen i praktiskt taget samma perspektiv som kartan, vilket underlättar jämförelser. Radarn kan vidare göra tillförlitligare vinkel- och avståndsuppskattningar än ögat.

De speciella problem som är förknippade med radarbildens identifiering gör också att de kvantitativa kriterierna på säker identifiering blir annorlunda än

vid visuell navigering. I det sistnämnda fallet är i allmänhet frånvaron av en väsentlig och framträdande terrängdetalj ett tillräckligt kriterium på att man är vilse. Omvänt räcker det i allmänhet med att känna igen ett fåtal landmärken för att säkerställa en positionsbestämning. På radarn kan man å andra sidan alltid räkna med att några »väntade» ekon saknas. För att säkerställa positionsuppfattningen bör man också alltid notera närvaron av *flera* lätt igenkännliga ekon.

De bästa landmärkena för en radarnavigatör är land/sjögränser, som ger god kontrast samt tätortsbebyggelse som ger starka ekon. Om mottagaren inte är försedd med en logaritmisk förstärkare, måste operatören räkna med att flitigt manövrera förstärkningskontrollen för att hitta användbara kontraster.

Vid karta/radarnavigering är det ofta lämpligt att *azimutstabilisera* bilden. Indikatorn är då kopplad till kursgivare så att norr på radarbilden alltid ligger i samma riktning. Härigenom kan jämförelse med kartan underlättas.

### 10.3.5 Fixtagning

Om navigatören känner positionen av ett givet mål (*fixpunkt*) på marken och på indikatorn avläser riktning och avstånd till detta, kan han beräkna sin egen position om han dessutom känner flygplanets kurs. Positionen kan beräknas manuellt eller automatiskt (i dator, varvid t ex punktens koordinater är lagrade i datorns minne). Vid automatisk beräkning märker föraren ut målets eko med markören, samt beordras systemet att beräkna avstånd och riktning till denna punkt. Ett flertal faktorer samverkar till att ge ett fel i den beräknade positionen:

- lobbredd, pulstid och ljuspunktsstorlek, se avsn 10.1
- kursfel, se avsn 8.5
- fel i fixpunktens position; kan försummas, se avsn 6.2.3
- radomfel; refraktion i radomen kan ge fel av storleksordningen  $0,1^\circ$  i bäring
- höjdfel; lutande avstånd mäts, felet kan lätt korrigeras i datorn
- fel i antennens orientering; av storleksordningen  $0,3^\circ$

Totalt kan man med typiska utrustningar räkna med ett fel om 2–3 % av avståndet till fixpunkten. I dessa siffror är dock ej inräknade grova fel (felidentifiering av fixpunkt).

### 10.3.6 Radarfyrrar

I s k *frågemod* samverkar den flygburna radarn med en på marken belägen *radarfyrr*. Flygplanradarn sänder ut ett antal pulser modulerade på visst sätt så att de kan identifieras som frågepulser av fyren. Fyren sänder sedan ut svarspulser som tas emot i flygplanet. Svarspulsernas bärfrekvens är något förskjutet i förhållande till frågepulsernas. Motsvarande frekvensändring görs även i mottagarkretsarna. Resultatet är att radarn inte uppfattar några terräng-ekon utan endast det förstärkta ekot från fyren.

Svarspulserna är *kodade* så att fyren kan identifieras av operatören. Den första pulsen som anländer till flygplanet visar avstånd och riktning till fyren (bild 10.12). De efterföljande pulserna ger upphov till en ekokombination på indikatorn med vars hjälp man kan identifiera fyren. Jfr de i kap 9 nämnda *radiofyrrarna*.



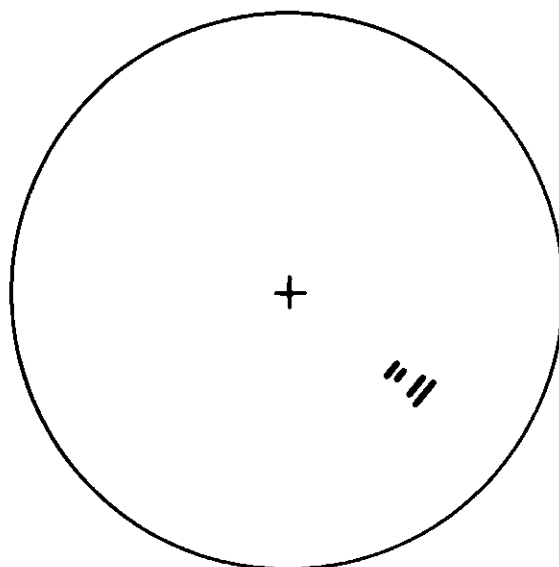


Bild 10.12 Ekon från radarfyr. Ekot närmast skärmens mittpunkt ger avståndet

### 10.3.7 Automatisk jämförelse radarbild/kartbild

Det är möjligt att med hjälp av en s k optisk *korrelator* göra en automatisk jämförelse mellan radarbilden och en karta eller ett flygfoto. Korrelatorn »låser in» radarbilden på motsvarande bild på kartan. Med kännedom om latitud och longitud på den senare kan man då få en kontinuerlig uppfattning om flygplanets position. Positions uppskattningen blir försedd med ett relativt stort stokastiskt fel, som emellertid är begränsat i motsats till felet hos olika ABR-system. Systemet ställer givetvis höga krav på den karta eller det flygfoto som används vid jämförelsen. Liknande system som enbart jämför höjdprofilen med en lagrad höjdprofilskarta (erhållen från karta), tidigare överflygningar etc, är under utveckling. Denna teknik, som benämns Terrain Contour Matching (TERCOM), kan i flygplanssammanhang komma att användas för stöttning av TN-system, se vidare avsn 14.4.

### 10.3.8 Hinderindikering och terrängföljning

Hinderindikerande och terrängföljande radar används vid flygning på låg höjd.

Vid *hinderindikerande* radar visas på indikatorn endast sådana terränghinder som höjer sig över en given höjd. Denna kan av operatören väljas godtyckligt, vanligen mellan 0 och 1000 m under flygplanet, se bild 10.13. Med ledning av bilden på indikatorn kan piloten nu styra flygplanet i vertikal- eller horisontalplanet så att terränghindren undviks.

Vid *automatisk terrängföljning* är radarn kopplad direkt till flygplanets styr-automat. När ett hinder uppträder i flygplanets väg, stiger det automatiskt och flyger över hindret. För att en säker höjdminskning skall kunna genomföras sedan hindret passerats krävs att även en *radarhöjdmätare* (avsn 8.8) ingår i systemet.

Vid *halvautomatisk terrängföljning* genereras styrorder i höjddled på t ex siktlinjesindikatorn så att föraren på konventionellt sätt kan styra flygplanet så att det följer terrängen. Denna metod möjliggör lugnare flygning i turbulent luft än den automatiska metoden.

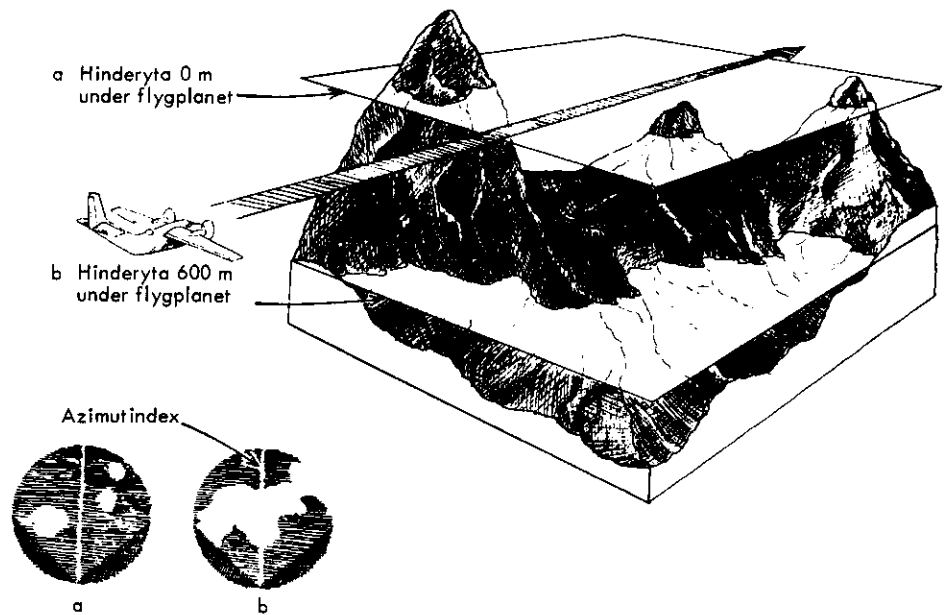


Bild 10.13 Hinderindikerande radar. PPI-bilderna visar terrängen över en viss nivå, 0 m (a) och 600 m (b) under flygplanet

#### 10.4 SEKUNDÄRRADAR OCH IGENKÄNNINGSUTRUSTNING

Under andra världskriget utvecklades ett identifieringssystem, som möjliggjorde särskiljning av egna och fiendliga flygplan. Ur detta system har nuvarande sekundärradarsystem (SSR) vuxit fram. SSR betyder Secondary Surveillance Radar. Numera har SSR internationellt accepterad status genom ICAO och är ett betydelsefullt komplement till flygtrafikledning med radar. Se kap 12. Primärradarn, som i princip är en vanlig markradar, kräver manuell identifiering vilket är mycket arbetskrävande när trafikintensiteten är hög. Med SSR har identitetsproblemet vid radarövervakning lösts och den har möjliggjort en högre grad av automatisering i systemen för flygtrafikledning. Automatisering med hjälp av datorer har blivit en nödvändighet med den allt tätare flygtrafiken.

Identifiering av flygplan har alltid varit av militärt intresse. I SSR-systemet finns utrymme för militärflygets behov av speciella identifieringsfunktioner. Vissa länder har egna IK-system för sin militära flygtrafik, men tendensen är en ökad integrering mellan civil och militär flygtrafikledning. Detta medför även integration av identifieringsfunktionerna inom SSR systemets ram med vederbörlig hänsyn tagen till militära sekretessönskemål.

Sekundärradarn består av en frågestation på marken (eng interrogator) och en flygplanburen svarssändare, *transponder*. Den utsända frågesignalen utlöser en aktiv svarssignal från transpondern. Svaret tas emot och signalbehandlas på marken och ger uppgift om flygplanets identitet. Vissa flygplan har en omvandlingsutrustning ansluten mellan höjdmätaren och transpondern och kan då även ge sitt höjdläge kodat i svaret.

De utsända frågepulserna har olika utformning beroende på vilken mod som skall aktiveras i transpondern. Moderna, som är standardiserade av ICAO, är 1, 2, 3 (= A), B, C och D. Mod 1 och 2 är avsedda för identifiering av militär

trafik, mod 3/A för identifiering av militär eller civil trafik och mod B för enbart civil identifiering. Mod C används för att ge höjdläget och mod D har ännu ingen uppgift (reserverad för framtida bruk). Transponderns svar kan koda i 4096 koder (mod 1, 2 och 3 dock endast 64 koder) per mod vilket exempelvis innebär att 8192 civila flygplan kan ges identitet samtidigt. För de flygplan, som kan lämna höjduppgift aktiveras transponderns mod C. Höjden digitaliseras och koda i transpondersvaret med en upplösning av 30 m (100 fot).

Flygföraren kan på transpondern även ställa in särskilda larmkoder, vilka i förekommande fall anmäler radiofel eller nödsituation (exempelvis kapning).

Frågestationen sänder ut upp till 450 frågor per sekund. Frekvensen är 1030 MHz. Huvudloben har en bredd av ungefär  $4^{\circ}$  och antennen roterar normalt med ca 10 varv/min. Räckvidden kan vara 1 n m – 200 n m (1,8 km – 370 km). Upplösningen i avståndsindikeringen är ca 3 km. Den största elevationsvinkeln ett mål kan ha för att kunna inmätas är ca  $45^{\circ}$ . Detta medför att en blind zon uppstår ovanför stationen.

Med en radar mäts det »lutande avståndet» till ett mål och felet i avståndsangivelsen blir större då avstånden är små. I SSR-systemet finns det dock möjlighet att korrigera det lutande avståndet till ett avstånd i horisontalplanet, eftersom information om flyghöjden i vissa fall är given.

Sekundärradarn samplaceras i allmänhet med en primärradar. Placeringen i förhållande till det flygintensiva kontrollområdet blir i allmänhet en kompromiss eftersom primärradarn bör stå nära (den skall ge täckning på låg höjd) och sekundärradarn på längre avstånd.

Svaret från transpondern utsänds med signalfrekvensen 1090 MHz. Svaret behandlas och den utvunna informationen om identitet och ev höjdläge presenteras i anslutning till eller på primärradarindikatorn (ett PPI). Transpondersvaret lämpar sig väl för datorbehandling och medger därmed en betydande avlastning i radartrafikledningens arbetsuppgifter. Därtill kommer fördelarna säkrare och bättre identifiering, bättre presentation och minskat behov av radiokommunikation.

Sekundärradarsystemet förutsätter emellertid att alla flygplan inom kontrollområdet är utrustade med transpondrar. I Sverige krävs transponderutrustning endast inom begränsade flyghöjder i de delar av landet som är täckta av sekundärradar.

Det finns en del problem förknippade med SSR, exempelvis:

- (1) Falsa frågor från interrogatorns sidlober,
- (2) Sammanblandning av transpondersvar (eng garble),
- (3) Transpondersvar på frågor från andra interrogatorer (eng fruit) och
- (4) Deformerade svar

(1) En sekundärradarantenn ger givetvis upphov till såväl en huvudlob som sidlober. Sidloberna är mindre än huvudloben men den svaga sidlobssignalen kan ändå tolkas som en fråga av flygplan i rätt belägenhet. Då svarar transpondern och förorsakar ett måleko med ett felaktigt sidläge på indikatorn. För att komma till rätta med detta undertrycks sidloberna. Se bild 10.14. Interrogatorn sänder en extra puls  $P_2$  2  $\mu$ s efter den första frågepulsen  $P_1$ . Frågepulserna  $P_1$  och  $P_3$  sänds från den riktade roterande antennen och puls  $P_2$  utsänds från rundstrålande antenn. Som framgår av bilden är effektnivån hos  $P_2$  tillräckligt stor för att täcka sidloberna. I transpondern mäts den relativa amplituden mellan  $P_1$  och  $P_2$ . Om  $P_1 > P_2$  svarar transpondern men om  $P_1 < P_2$  svarar den inte. På detta sätt erhålls enbart svar på frågor från sekundärradarns huvudlob.

(2) Sammanblandning av transpondersvar uppkommer när två flygplan ligger inom samma antennlobvinkel, så att svarssignalernas pulser blandas med varandra och det resulterande svaret blir meningslöst. Se bild 10.15.

Ett resulterande svar enligt bilden kan ej utvärderas och den enda information som erhålls är positionen. Med vissa typer av sammanblandningen mellan svar kan de enskilda svaren detekteras. Då krävs att överlagringen ej sker exakt i pulspositionerna, och att en sofistikerad avkodare finns att tillgå. För att komma ifrån problemet med överlagrade svar kan man minska lobvinkeln eller ge frågesignalerna en adressering så att endast en transponder åt gången avger svar.

(3) »Fruit» definieras som svar från transpondrar som ej har frågats av den egna interrogatorn. Om två SSR-stationer med sina frågor når ett flygplan, kan svaret från transpondern på en fråga från *en* station tas emot av båda. Det innebär att SSR-mottagaren på marken växelvis får olika svar om läget för detta flygplan. På indikatorn förefaller flygplanet hoppa mellan olika avstånd till stationen, vilket resulterar i en brusfylld bild.

För att motverka »fruit» måste antalet frågestationer begränsas. Med en »defruiter», som i princip fungerar som en MTI (se avsn 10.1), kan minskning av »fruit» uppnås. En »defruiter» lagrar alla svar under en frågeperiod för att sedan jämföra dessa och avståndsmätningen med nästa svarssekvens och avståndsmätning. Endast om avståndsjämförelsen förefaller korrekt accepteras svaret och presenteras. Det nya svaret jämförs med nästa svar och avstånd osv.

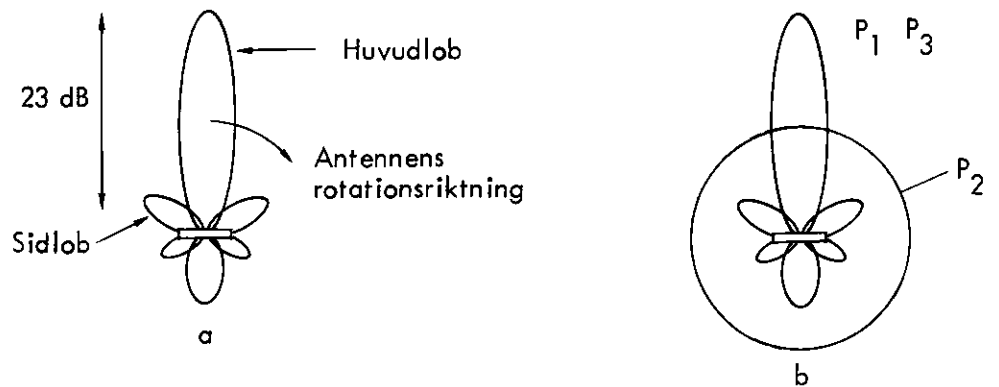


Bild 10.14 Antennediagram SSR  
a) utan sidlobsundertryckning  
b) med sidlobsundertryckning

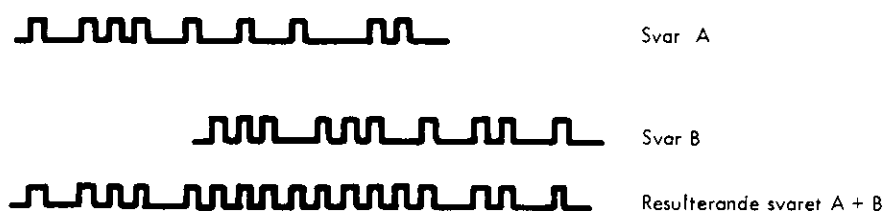


Bild 10.15 Sammanblandning av transpondersvar

(4) Ett svar från en transponder kan deformeras genom att signalerna reflekteras mot föremål, byggnader och terräng och går olika vägar och därefter sammanblandas. Detta förhållande kan motverkas genom att man förbättrar stationens placering och ändrar antennlobens utformning. Dessa åtgärder kan även motverka falska svar, som uppstår genom signalreflektioner.

