

Radarteknikens utveckling

av

Civilingenjör Nils-H Lundquist, Stockholm



Radarteknikens utveckling

Civilingenjör Nils-H Lundquist, Stockholm

Den gängse uppfattningen av begreppet "radar" avser ett förfarande, där radiovågor emitteras från en sändare, reflekteras från vissa "mål" och uppfångas i en mottagare. För att fastställa målets karakteristika närmare, t.ex. ifråga om läge och hastighet, ställs det vissa fordringar på radarutrustningens egenskaper, såväl på sändarsidan (modulationstyp, antenn-diagram) som på mottagarsidan (brusfaktor, signalbehandling), som alla betingas av den avsedda tillämpningen.

De för alla radartillämpningar gemensamma dragen summeras i "radarekvationen"

$$r := \sqrt[4]{\frac{P_s}{NkTB} \cdot \frac{A_s A_m \sigma}{4\pi \lambda^2}}$$

där r är räckvidd, P_s sändarens uteffekt, λ sändarens våglängd, B mottagarens bandbredd,

N mottagarens brusfaktor, k Boltzmann's konstant, T temperaturen i °Kelvin, A_s sändarens effektiva antennarea, A_m mottagarens effektiva antennarea samt σ är målets effektiva reflexionsarea.

Denna ekvation visar bl.a:

att en räckviddsökning genom höjd sändareffekt måste vara mycket påkostande, effektmässigt och därför även ekonomiskt; att mottagarkänsligheten siffermässigt inverkar på samma sätt som sändareffekten på räckvidden, vilket med häusyn till teknikskillnaderna gör känsligheten till ett ekonomiskt mera tacksamt medel för räckviddsökning; att antennareans storlek påverkar räckvidden mera än de två föregående faktorerna samt att målets reflexionsarea, som varierar med många tiopotenser mellan olika tillämpningsområden, just härigenom blir av väsentlig betydelse för räckvidden.

Andra grundläggande, generella samband mellan stationsdata och egenskaper kan härledas genom diskussioner, som bygger på sammanställningar av radarekvationen med andra fundamentala teknisk-fysikaliska relationer.

Ett första hänsynstagande gäller våglängdsvalets inverkan på vinkelnoggrannheten, där man finner att kortare våglängd ger högre noggrannhet vid givna fysikaliska dimensioner. Strålbredden i vinkelgrader kan nämligen anges till $70 d/\lambda$, där d är antennens tvärdimension och λ är våglängden. Genom att tillfoga förutsättningar om hur sändareffekt (vid given rörtyp), målarea och mottagarkänslighet varierar med våglängden, kan man också få närmare underlag för optimalt våglängdsväl.

Mätnoggrannheten i avståndsled bestäms vid pulsradar i huvudsak av den använda pulslängden, som ger bandbredden, men genom en närmare diskussion av bandbreddskravet vid olika slag av modulationssystem kan man visa, att det är sändarens medeleffekt som är avgörande, och att bandbredden kan utgå som räckviddsbestämmande faktor; i stället kommer ur tillämpningssynpunkt mera primära faktorer, såsom mätnoggrannhet i avstånd och hastighet, in som dimensioneringsgrunder. För

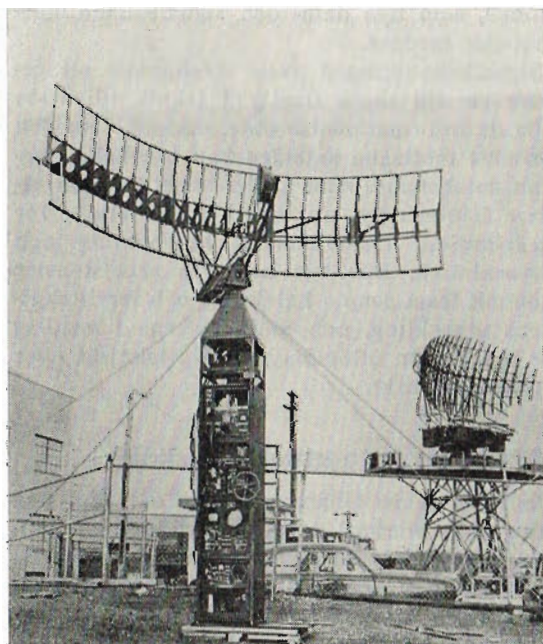


Fig. 1. I förgrunden en amerikansk transportabel L-bandsstation från kriget (TPS-1D), där bakom en modernare experimentantenn under provning.

två- eller tredimensionell spaningsradar måste mätnoggrannheten i avstånd samordnas med noggrannheten i vinkelled, och här visar en närmare diskussion av bl.a. modulations- och antennproblem, att ökad mätnoggrannhet måste köpas till priset av en lägre informationshas-tighet.

I sådana sammanhang — och även mycket mera subtila — har den teoretiska synen på radarproblemen vidgats under de senaste tio åren. De väsentligaste drivkrafterna för utvecklingen har dock varit, dels uppkomna nya operativa användningsmöjligheter, dels tekniska nyheter, som möjliggör nya apparatlösningar. Dessa två faktorer samverkar på ett så intimt sätt, att man knappast kan ange någon som den primära. Utvecklingen av t.ex. räckvidd, höjd och fart hos flygplan har skapat behov av nya funktioner för radarn, vilka har stimulerat radarteknikerna att söka nya vägar; å andra sidan har nyupptäckter i grundläggande teknik både skapat möjligheter att fylla dessa behov och ställt nya operativa uppgifter för tekniken.

Den operativa sidan härav kommer att belysas i det följande. Som inledning till detta kan det emellertid vara motiverat att peka på ett par från teknisk utgångspunkt viktiga drivkrafter i utvecklingen.

Drivande faktorer i utvecklingen

Mikrovågsteknikens utveckling har spelat en central roll i radarhistorien. Magnetronen med strukturellt inbyggda resonanskaviteter var en nödvändig byggsten i västmakternas system under andra världskriget, och sedan dess har detta tekniska grundmönster effektiviserats betydligt, framförallt genom verksamare kylningsmetoder. Klystronen är den andra hörnstenen på rörteknikens område. Den är äldre än kavitetmagnetronen men har visat lika goda möjligheter till fortsatt utveckling, framförallt när det gäller större våglängder och högre effekter.

Särskilt bör man notera utvecklingen av rör lämpliga för CW- ("Continuous-Wave") radar, som i vissa sammanhang har betydande principiella företräden framför pulsradarn. CW-radarn var vid senaste världskrigets slut praktiskt användbar i ett par speciella tillämpningar, men i övrigt endast översiktligt teoretiskt studerad. Sedan dess har man först uppmärksammat de teoretiska systemens operativa värde, därefter experimentellt upptäckt allvarliga tekniska begränsningar för dess användning, och slutligen efter hårt arbete funnit tekniska möjligheter att undanröja dessa begränsningar. Detta är ett typexempel på det nämnda samspillet mellan operativa krav och teknik som utvecklingsdrivkraft.

Utom nyheterna på rörområdet kan man också anföra betydande utvecklingsresultat i fråga om antennkonstruktioner och kretsbyggnadsteknik, inklusive sådana specialiteter som ferrit teknik för omkopplare, isolatorer m.m. Mottagartekniken har också fått ett väsentligt

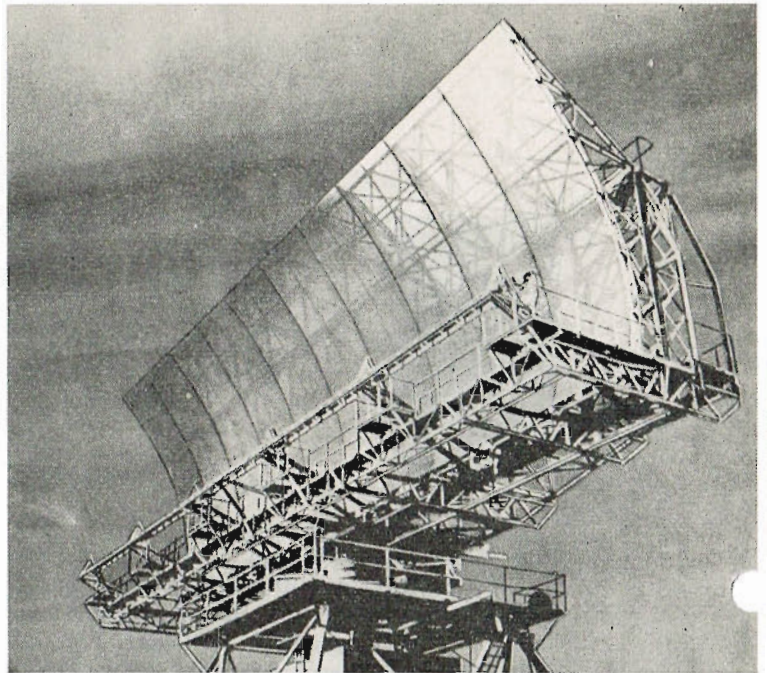


Fig. 2. En brittisk efterkrigskonstruktion för jaktstridsledning. Den 20 m breda, vågledarmatade antennen ger mindre än $1/2^\circ$ strålbred och vertikalprofilen är utformad för likahöjd-täckning. Sändarkabinen hänger under antennen och roterar med den.

nyttillskott genom maser-apparatur och parametriska förstärkare, vilket har möjliggjort en radikal sänkning av brusfaktorn, som i vissa — dock inte alla — tillämpningar har stor betydelse som räckviddsökande faktor.

Det kanske mest intressanta tekniska nyttillskottet är dock de möjligheter till kvalificerad hantering av den av radarn mottagna informationen, som nya data- och signalbehandlingsmetoder medger.

Signalbehandlingen avser möjligheter att genom en allt mera finslipad teknik tillvarata alla de informationsbärande element, som den primärt mottagna signalen kan innehålla, medan databehandlingen gäller sättet för den vidare hanteringen av denna information, för distribution, maskinmässig bearbetning och presentation. Här har helt nya arbetsformer kommit fram genom halvleder- och ferritteknikens utveckling, och möjligheterna härvidlag är långt ifrån uttömda, vare sig tekniskt eller systemteoretiskt.

Hittillsvarande utvecklingslinjer

Radarteknikens tillämpning har naturligt nog utvecklats starkast inom de militära användningsområdena. På detta, liksom på det civila området, har dock ett gemensamt drag i utvecklingen varit en tendens till differentiering i ett allt större urval av typer, avsedda för olika ändamål.

De ursprungliga huvudtyperna av militär markradar, nämligen spaningsradar och eldledningsradar, har var och en grenat upp sig

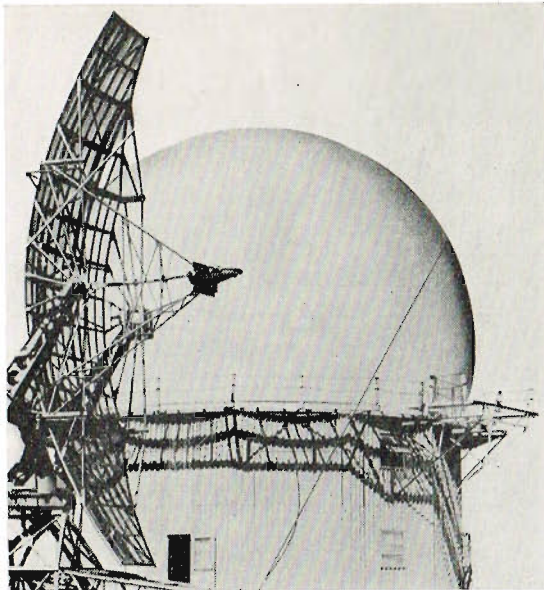


Fig. 3. FPS-6, en amerikansk höjdmätningsradar på S-bandet. Den dubbelkrökta, centralmatade antennen eliminerar vinkelfel vid frekvensdrift. I bakgrunden en ballongradom, som täcker den tillhörande spaningsradarn.

i ett antal linjer, avsedda att fylla olika slag av spanings- och eldledningssuppgifter. Härvid har särskilt robotvapnens utveckling betingat uppkomsten av ett antal speciella stationstyper med funktioner, som inte kan klassificeras efter en så enkel indelningsgrund. Den flygburna radarn kom under kriget egentligen bara till full utveckling för ett ändamål, nämligen navigering; senare har den utvecklats i olika varianter för bombfällning, spaning, jakt sikten osv. Till detta kommer också nya mera speciella tillämpningar, som granatkastarlokalisering, lokalisering av rörliga mål i terräng, dopplernavigering m.m., som här endast kan nämnas utan närmare presentation.

Bland de civila tillämpningarna utgör radar-typerna för lufttrafikövervakning resp. navigering (Tekn. T. 1960 s. 7) naturliga anpassningar av ursprungligen militära typer, men också på detta område har nya, specifika funktioner krävt särskilda apparatlösningar, t.ex. väderleksradar, radar för övervakning av markrörelser på flygfält och polisradar för hastighetsövervakning (Tekn. T. 1960 s. 878).

En annan utvecklingstendens, värd att beakta, är tendensen till integration av radarmaterielen med annan utrustning till större system. Radarstationerna betraktas inte längre som fristående hjälpmedel, som fyller en viss separat funktion, utan som komponenter i ett operativt system med ett vidare syfte.

I ett luftförsvarsrobotsystem ingår sålunda spaningsradar för att upptäcka målen, belyningsradar för att fixera målen och ge roboten styr signaler, samt en form av radarutrustning i själva roboten; samverkan mellan dessa radarfunktioner inbördes och med vapensystemets

övriga funktioner åstadkommes i en stridsledningscentral med hjälp av ett särskilt dataöverförings- och presentationssystem (Tekn. T. 1959 s. 401).

På den civila sidan är en liknande, ehuru kanske inte lika avancerad utveckling på väg ifråga om flygtrafikledningssystem, där informationen från flera radarstationer inom ett större område måste koordineras genom ett kommunikationsnät och ett databehandlingssystem, vars funktionssätt måste samplaneras med radarstationernas.

Spaningsradar mot luftmål

Historik

Radarns mest kända tillämpningsområde är spaningen mot luftmål, och här kan kanske en historiskt sammanhängande redogörelse vara på sin plats. Churchill beskriver i sin krigshistoria, hur man — med utgångspunkt från Appletons försök med jonosfärsondering — redan före krigsutbrottet i England hade etablerat en kedja av primitiva, men operativt fungerande förvarningsstationer. Dessa arbetade på så lång våglängd som 10 m och med en därav följande brist på vinkelnoggrannhet. I Tyskland var rörtekniken mera utvecklade, och den möjliggjorde — åtminstone planeringsmässigt — framtagande av radarstationer på våglängder omkring metern med bättre upplösningsförmåga i vinkel och enklare indikeringsystem; antalet operativa radarstationer vid krigsutbrottet var dock ringa.

Under kriget gick den tekniska utvecklingen vidare, på bägge sidor pådriven av behovet av större vinkelnoggrannhet och därmed kortare våglängd. I Tyskland höll man sig kvar vid den ursprungliga tekniken med trioder som sändarrör och pressade sig efterhand ned till ca $\frac{1}{2}$ m våglängd. I England arbetade man till en början också efter samma system, tills man strax före krigsslutet kunde koppla över på den helt nya 10 cm-linjen, som möjliggjorts genom utvecklingsarbeten för flygburen radar.

På de äldsta stationerna för 10 m våglängd var en ohanterlig, manuell pejling på signalminimum nödvändig för att överhuvud få en acceptabel vinkelangivelse, men man visste, att det med högre strålskärpa skulle vara möjligt att få en bättre presentationsmetod, byggd på maximipejl. Vid en presentation kallad PPI (plan-polär indikator) roterar antennen likformigt i azimutled, och synkront härmed en radiell, intensitetsmodulerad ljusstråle på ett efterlysande katoskop. Härigenom presenteras spaningsresultatet i form av en kartbild med stationen i centrum, och eventuella mål som ljusfläckar i geometriskt korrekta lägen i förhållande härtill. En viktig tillämpningsfråga härvidlag gällde, om presentationens kvalitet var sådan, att den endast kunde användas för förvarning om flyganfall, eller om den var så hög, att den kunde användas som underlag för dirigering av jaktflyget till kontakt med målen.

De tyska stationstyperna, med lägst $\frac{1}{2}$ m våglängd, gav i regel god förvarning, men blev aldrig fullt effektiva i den sistnämnda funktionen, medan engelska och amerikanska stationer (fig. 1) tack vare tillgången på kortare våglängder fick egenskaper som gjorde dem lämpliga för stridsledning. Man ser här inledningen till den differentiering mellan fjärrspanings- och stridsledningsstationer — de förra med högre effekt och längre våglängd än de senare — som i stort sett har rått intill sista tiden, då en viss systemmässig konvergens har kunnat noteras, samtidigt som utföringsformerna har differentierats allmer.

Fjärrspaning

Fjärrspaningsstationerna har huvudsakligen använt våglängder från 2—3 m och ned till 25 cm ("L-bandet"). Antennerna har genomgående varit azimutroterande, med ett vertikaldiagram som redan tidigt fick "cosec²"-form, dvs. konstruerat så att ett mål, flygande på konstant höjd, skulle ge en reflekterad signal som i möjligaste mån var oberoende av avståndet. Vinkel- och avståndsnoggrannhet har projekterats till måttliga värden, samtidigt som man utnyttjat högsta möjliga sändareffekt — underlättat av den långa våglängden — för att nå största möjliga räckvidd. Cosec²-diagrammet är emellertid oekonomiskt ifråga om effektens spridning i vertikalled, och man har därför efterhand börjat övergå till system med "hög"- och "låg"-lober, där man parallellt eller i följd använder två eller flera vertikalt arrangerade antenndiagram som var för sig koncentrerar strålningen mera och därför ger sammanlagt bättre räckvidd.

Stridsledning

På stridsledningsstationerna har vanligen kraven på lägesnoggrannhet ställts före räckviddskraven. De har därför i regel byggts för 10 cm våglängd (S-bandet), varigenom det har varit möjligt att med måttliga antenndimensioner få en azimutskärpa på antennen, tillräcklig för jaktstridsledning på 100—150 km avstånd. Ökade räckviddskrav har dock efterhand pressat konstruktionerna mot högre effekter och större antenndimensioner (fig. 2); å andra sidan leder de större räckvidderna och smalare strålarna till längre rotationstider på antennerna och därmed en lägre informationstakt, som inte är acceptabel i ett modernt stridstempo, och den fortsatta utvecklingen har därför måst följa nya vägar.

Höjdmätning

Höjdmätningsproblemet är centralt i stridsledningssammanhang, men utan motsvarighet i behovhänseende vid fjärrspaningen. Detta har hittills nästan uteslutande lösts med "nickande" höjdmätare, (fig. 3) dvs. radarstationer med ett antenndiagram som är skarpt i vertikalled, men tämligen brett i sidled, som riktas in efter en azimutangivning från spanings- (stridslednings-)radarn och som därefter me-

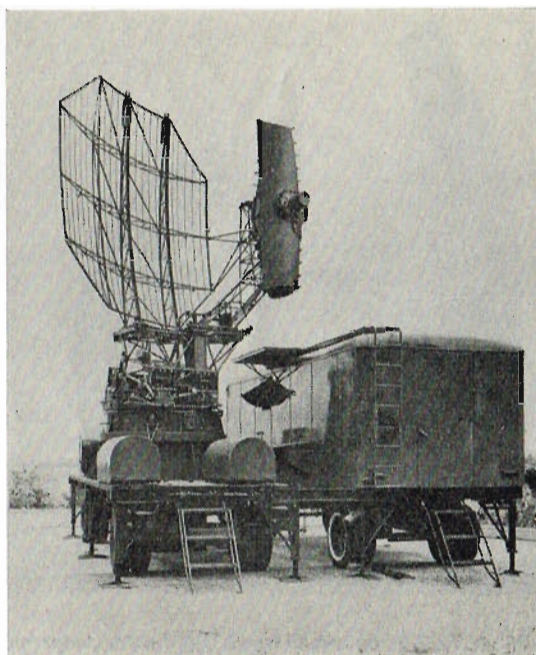


Fig. 4. En fransk "volumetrisk" höjdmätningsskannare, VPA. Matarer är en "Robinson-scanner", bestående av en deformerad planvågledare, som transformerar en roterande primärstälare till en vertikalt pendlande, fiktiv matningspunkt i matarhornets öppning.

kaniskt söker i vertikalled. Spaningsresultatet presenteras på en indikator som visar ett vertikalt plan på samma sätt som PPI visar ett horisontalplan.

En sådan höjdmätningsskannare har vissa kapacitetsmässiga och organisatoriska begränsningar: en höjdmätare måste läsas till varje mål som man vill observera någorlunda kontinuerligt, prioriteringen vid fördelning av höjdmä-

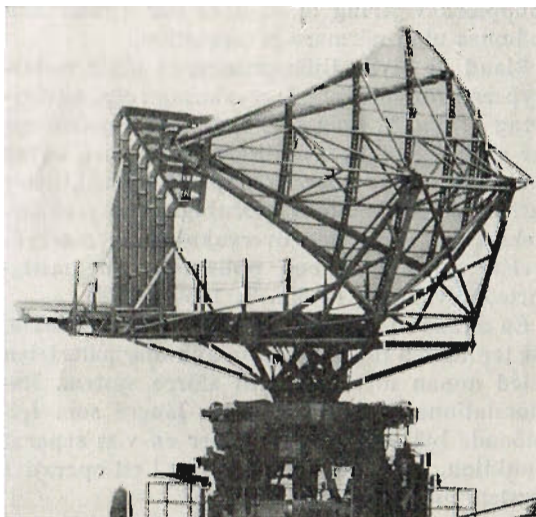


Fig. 5. Den amerikanska FPS-7 representerar en modern typ av luftspaningsradar. 7 antennlober med separata L-bandssändare i "stacked beam"-arrangemang ger såväl höjdtäckning som höjdmätningsskanningsmöjlighet.



Fig. 6. Bendix Electronic Steerable Array Radar (ESAR) är uppbyggd av flera tusen antennelement, som matas individuellt i faslägen, som styrs elektroniskt. Härigenom kan strålen skiftas mellan två godtyckliga lägen på mindre än 20 μ s.

tare mellan olika företag måste vålla vissa problem osv.

En metod som prövats för att lösa detta problem är att införa en tredimensionellt, schematiskt avsökande radar (fig. 4), men den stö-

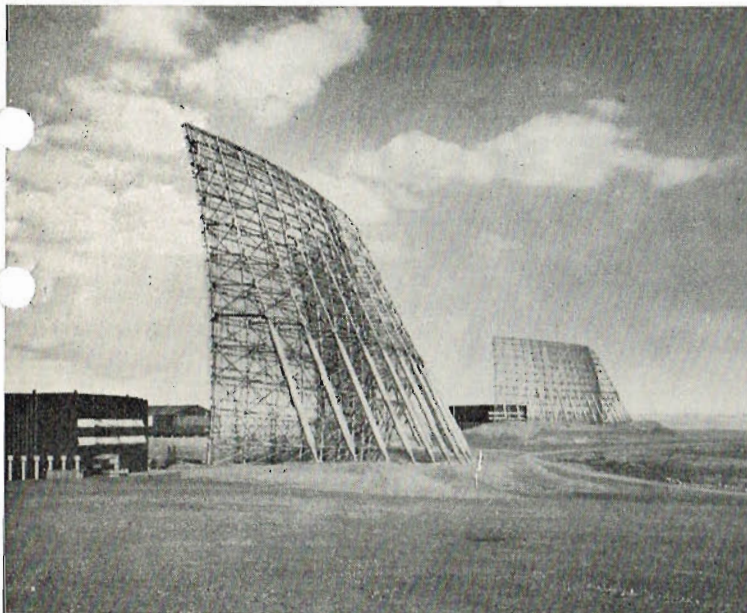


Fig. 7. En "Ballistic Missile Early Warning Station" (BMEWS) på Grönland. Antennreflektorn är ca 50 m hög och 150 m bred; kabinerna t.v. och i bildmitten innehåller sändarutrustning och primärstrålare, täckta av de två vita fönstren.

ter på samma principiella motsättning mellan vinkelskärpa och datahastighet som nyss berördes för spaningsfunktionen, fast i ännu högre grad. För att öka datahastigheten har det därför visat sig nödvändigt att använda flera samtidigt arbetande strålar i olika riktningar; strålar som kan vara arrangerade på olika sätt, men naturligen t.ex. vertikalt över varandra.

Kravet på ökad datahastighet och höjdupplösning leder fram till samma systemuppbyggnad på stridsledningsstationerna som kravet på ökad räckvidd för till hos fjärrspaningsstationerna. Samtidigt har också de längre våglängdernas försteg i effekthänseende till stor del försvunnit genom nyutvecklingen på mikro-vågsrörens område, vilket minskar våglängdens betydelse som indelningsgrund. En modern luftspaningsstation (fig. 5) är både fjärrspaningsstation, stridsledningsstation och höjdmätare i ett; man måste för att fylla var och en av dessa funktioner använda ett flertal sändare eller mottagare med skilda antennlobber, och genom en lämplig samordning kan man fylla alla funktionerna samtidigt.

På sista tiden har man också börjat gå ännu längre; man ger radarstrålen en helt elektronisk avlänkning, genom att använda antennsystem, där strålningsdiagrammets riktning och form är beroende av fas eller frekvens i matningen, se t.ex. fig. 6. Härigenom kan strålen hanteras helt fritt från mekaniskt betingade rörelsebegränsningar, vilket ger en flexibilitet i sökprogrammet, som kan användas för att rationalisera utnyttjandet av radarns sändareffekt.

Inmätning av robotar

Vad som har sagts här, har dock implicit avsett förvarning och jaktstrid mot flygplan eller luftburna robotar, där upptäcktsavstånd och inmättningsnoggrannhet har kunnat koordineras inom den aktuella teknikens möjligheter. Väsentligt svårare ställer sig problemet med inmätning av ballistiska robotar, för förvarning eller bekämpning. Här gäller fortfarande den principiella motsättningen för radarkonstruktören mellan räckvidd och precision, och om aktuella konstruktioner (fig. 7) är man nog berättigad att säga, att räckviddskravet har satts främst genom ett extremt effekt- och dimensionsuppbåd, som bl.a. innebär val av ganska långa våglängder. Inmättningsprecisionen är inte närmare känd, men det kan nog säkert antas, att förvarningsbehovet har fått bestämma räckvidden mera än vad bekämpningsmöjligheterna kan ha påverkat precisionskraven.

Eldledningsradar

Med eldledningsradar avser man vanligen en radar med uppgift att kontinuerligt följa ett visst, bestämt mål för att inhämta noggranna lägesdata om målet som underlag för vapenriktning. Den första och hittills allmännaste tillämpningen avser användning tillsammans med kanonluftvärn.

Avståndsbestämning

Det svåraste mätningsproblemet för luftvärnet var ursprungligen avståndsbestämningen till målet, som endast kunde fyllas bristfälligt med optiska hjälpmedel, medan vinkellägesbestämningen lätt kunde göras tillräckligt noggrant. Det var därför naturligt att man som första steg i radarns användning för eldledning utnyttjade den enbart för avståndsbestämning, medan vinklelementen inhämtades genom optisk mätning (fig. 8). Denna systemuppbyggnad har även sedermera tillämpats i stor utsträckning, och det finns ännu i många arméer, bl.a. den svenska, tidsenlig operativ eldledningsmateriel, som bygger på optisk mätning av vinklar och radarmätning av avstånd.

Vinkelmätning

Man började dock tidigt överväga möjligheterna att använda radarn även för vinkelmätning, för att därigenom komma ifrån begränsningen av luftvärnets insatsmöjligheter till sådana tillfällen, då målet kan siktas optiskt. Den erforderliga vinkelnoggrannheten kan inte uppnås med maxinipejl, utan man använder "lobjämförelse", dvs. antensystemet alstrar ett eller flera par av smala, inbördes något snedställda strålningslobber, och antennen dirigeras med hjälp av de mottagna signalerna så, att den ställer in sig med målet på de två lobernas symmetrilinje. Härigenom utnyttjar man den starka lutningen på antennlobens sidor som inställningskriterium och får betydligt större noggrannhet än vid uppsökandet av ett maximum.

De första försöken gjordes med ca $\frac{1}{2}$ m våglängd och en antenndiameter av ca 3 m (fig. 9). Det visade sig dock mycket snart att detta inte på långt när gav den erforderliga vinkelnoggrannheten. Man försökte att med bibehållande av våglängden öka antenndiametern till omkring 10 m, men en så föga fältmässig konstruktion vann inga efterföljare, utan framstegen kom — även här — först med införandet av centimetervågstekniken. Engelska och amerikanska modeller på S-bandet från slutet av kriget, t.ex. fig. 10, har bildat mönster för en stor del av efterkrigstidens konstruktioner. I viss utsträckning har man också gått vidare nedåt i våglängd, till X-bandet (3 cm), men de kortare våglängderna har ingalunda slagit igenom fullständigt.

Skälet till att X-bandet användes torde i själva verket inte främst vara behovet av högre vinkelnoggrannhet, utan att den medger en elegantare teknisk lösning av vinkelbestämningsproblemet. I tidigare stationstyper genererades de olika lägena av antennloben successivt genom rotation av en snedställd primärstrålar; detta leder till vissa nackdelar i form av bl.a. fluktuationsfel i vinkelvärdena, beroende på målareans tidsvariation. Genom lämpligt utförande av primärstrålaren — som lättast kan realiseras på X-bandet — kan man samtidigt alstra de två strålningslobber som skall jämföras, varvid man undviker det tidsbetingade fe-

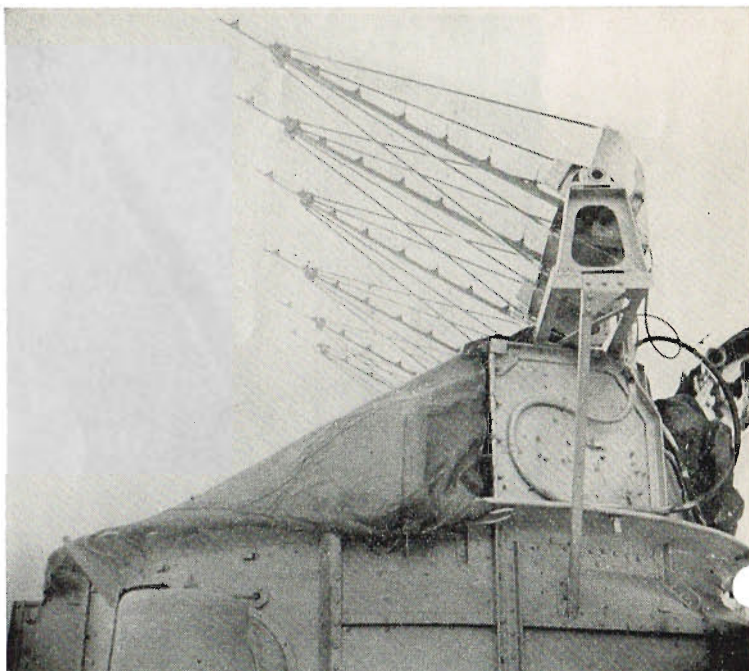


Fig. 8. Brittisk eldledningsradar typ 285 för avståndsmätning, monterad på toppen av optiskt centralsikte. Krigskonstruktion på 50 cm våglängd; Yagi-antenn.

let. En bestämning av målets vinkelavvikelse från antensystemets nollinje kan alltså ske med en enda reflekterad radarpuls, vilket gett anledning till det i övrigt inte särskilt adekvata namnet "monopuls-radar".

Även om man noterar denna nyhet, som också har andra tillämpningar, och några andra av mindre betydelse, så visar dock eldledningsradarområdet en bild av viss teknisk stagnation. Den uppenbara anledningen härtill är, att

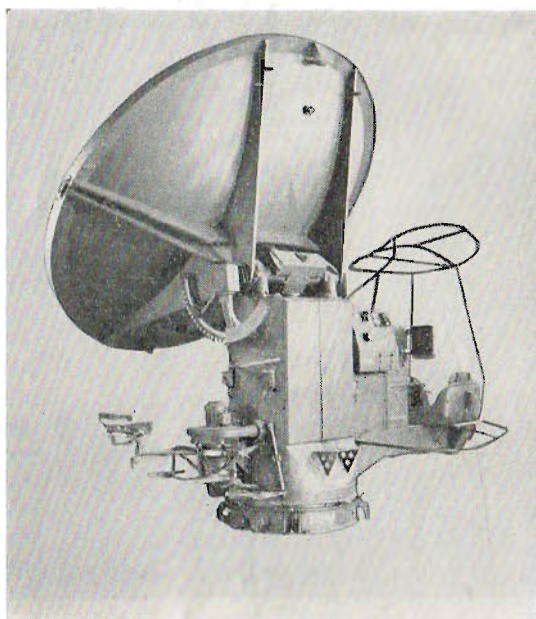


Fig. 9. Den tyska eldledningsradarn Würzburg, en pulsradar med lobrotation, med manuell avståndsföljning och inriktning i höjd och sida.

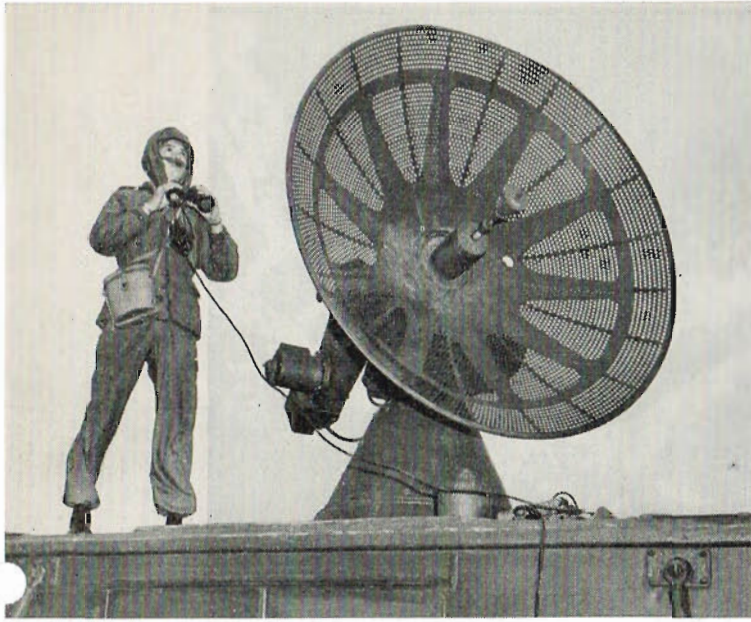


Fig. 10. Tidig amerikansk eldledningsradar för fjällluftvärn SCR-584. Radarn arbetar på S-bandet; lobrotation.

kanonluftvärnet som sådant har fått allt mera begränsad betydelse, och att dess uppgifter numera efterhand börjat övertas av luftvärnsrobotar av olika slag, som ställer andra krav på radarutrustningen.

Robottillämpningar

Den ostyrda projektibanan är en allvarlig felkälla vid kanonluftvärnet, och för att komma över denna svaghet har man genom luftvärns-

robotarna infört olika metoder att under banan kontrollera projektilens rörelse. Bland de olika metoder som kommit till användning är kommandostyrning, ledstrålestyrning och målsökarsstyrning de tre viktigaste huvudrubrikerna.

Kommandostyrning

Kommandostyrningen bygger på en inmätning av såväl robotens som målets lägen under anflygningen; av dessa mätvärden bestäms, vanligen med en hjälpkalkylator, vilka styrrörelser som roboten bör utföra för att nå målet, och order härom överföres till roboten via en radiosändare. Det amerikanska Nike-systemet är det främsta exemplet på ett sådant system. Det radartekniska inslaget i kommandostyrningen gäller målinmätningen, och den sker i princip med hjälp av två eldledningsradarstationer, som följer mål resp. robot.

Ledstrålestyrning

Vid ledstrålestyrningen alstrar man elektroniskt en "ledlinje" mellan utskjutningsplatsen och målet. Denna ledlinje följer kontinuerligt målet, och roboten är utrustad för att uppsöka och följa denna. Tekniskt sett åstadkommes ledlinjen i regel genom syftlinjen från en eldledningsradar, som följer målet; roboten kan uppsöka denna syftlinje genom att radarn, som bör arbeta med lobrotation, ges en modulation, som indikerar vilket läge strålen momentant intar relativt syftlinjen, och som kan dechiffreras genom särskilda läsorgan i roboten. US Navy's "Terrier" är ett exempel på ett sådant system (fig. 11).

Målsökarsystem

Målsökarsystemen kan vara endera aktiva, där roboten bär en fullständig radarutrustning med sig för att bestämma riktningen till målet, eller semiaktiva, där en "belysningsändare" på marken sänder ett energiflöde, som reflekteras från målet, medan en mottagare i roboten uppfångar dessa reflexer och styr mot dem. Belysningsradarn liknar i allt väsentligt en eldledningsradar för kanonluftvärn; kraven på räckvidd är dock större och på följnoggrannhet mindre, och dessutom kan det fordras vissa speciella funktioner för signalering till roboten.

Ett exempel på det semiaktiva systemet, som nu kan anses som den modernaste metoden för luftvärnsrobotstyrning, utgör Hawk-systemet, som bl.a. anskaffas för svenska armén. I detta system tillämpas CW-tekniken, bl.a. för att möjliggöra bekämpning av lågflygande mål, som i en vanlig pulsradar skulle maskeras av markekon.

Den tekniska problemställningen för styrning av jaktrobotar (luft till luft) är mycket likartad med den närmast förut skisserade; även här är den semiaktiva målsökningen, med belysningsändaren identisk med jaktplanetets siktesradar, en favoriserad lösning. Bland övriga robotsystem som bygger på radartillämpningar kan främst robotar mot sjömål nämnas. Här ligger en användning av radarmålsökare nära

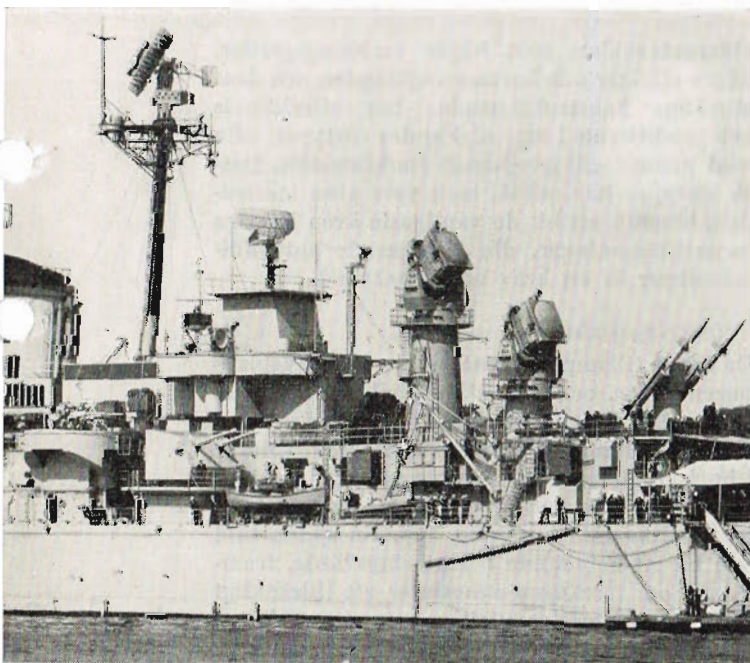


Fig. 11. "Terrier"-robotar på amerikanskt örlogsfartyg. Robotstället till höger, två ledstrålesändare i mitten. Den lilla antennen upptill genererar en grovstråle för att leda in roboten i huvudstrålen.

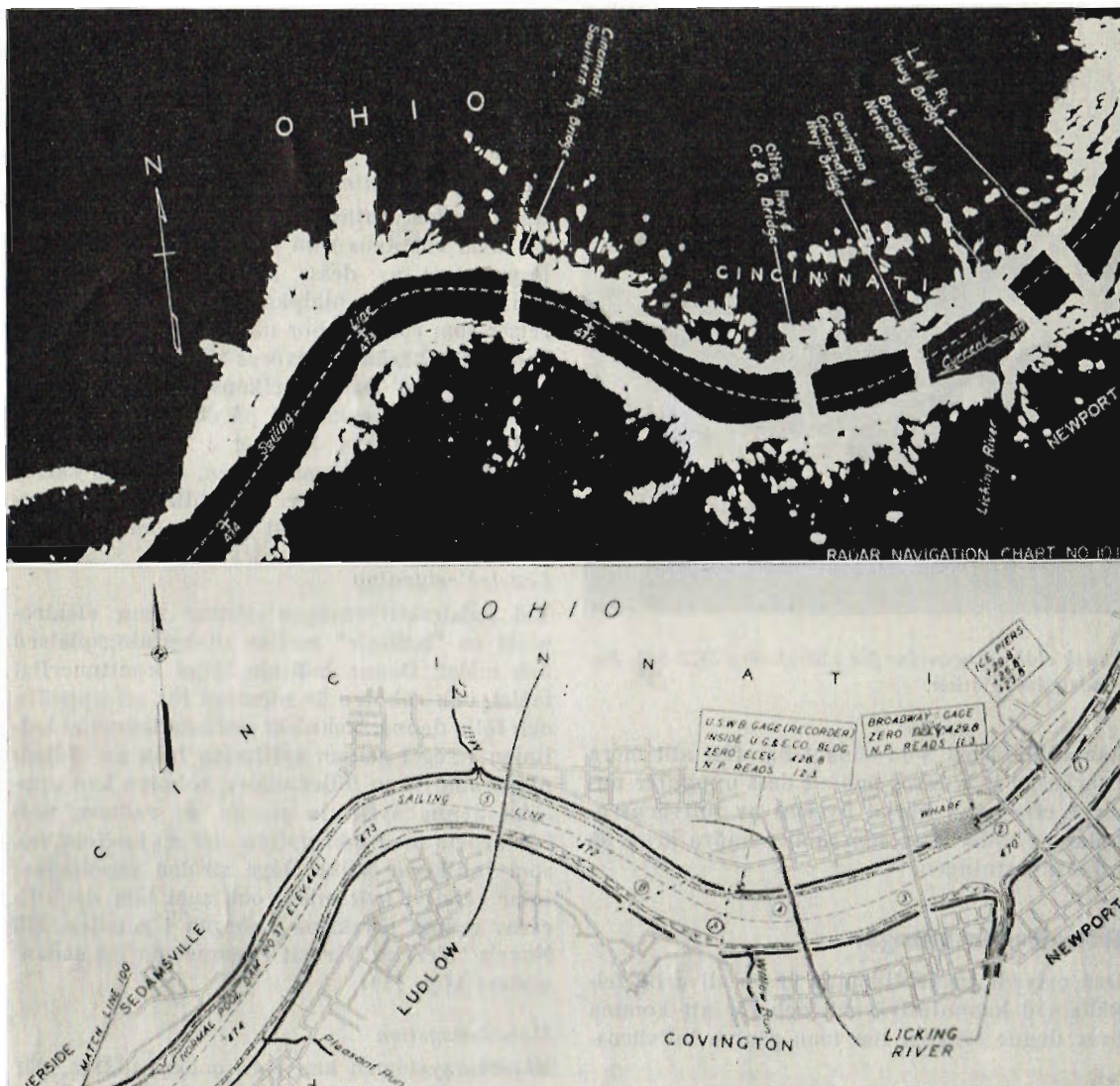


Fig. 12. PPI-presentation av landskapet kring Cincinnati, USA, jämte en karta över samma område. Bilden är en "radarkarta", sammansatt av flera PPI-bilder.

till hands; de enklare geometriska förhållandena och de lägre målfarterna gör också apparatlösningarna tekniskt enklare än vid luftmåls-tillämpningarna.

Flygburen radar

Förutsättningen för att man överhuvud taget skall kunna realisera en radarutrustning med acceptabel vinkelnoggrannhet inom det mycket begränsade utrymme, som står till buds i ett flygplan, är att man har tillgång till effektiva sändarrör för tillräckligt kort våglängd. Här gjorde engelsmännen under andra världskriget sin banbrytande insats genom utvecklingen av kavitetsmagnetronen, som i sitt första utförande med rimlig verkningsgrad kunde ge uteffekter av några tiotal kW vid 10 cm våglängd. Denna utvecklingsmöjlighet hade inte de tyska teknikerna uppmärksammat, och först nära krigsslutet blev de medvetna om den genom en utrustning i ett flygplan, nedskjutet över Rotterdam; då var det dock för sent för dem att ta igen västmakternas tekniska försprång.

Kavitetsmagnetronen har även sedermera bevisat sig som en hållbar teknisk idé; den har

vidareutvecklats mot högre verkningsgrader, högre effekter och kortare våglängder, och dess allmänna konstruktionsplan har efterliknats och modifierats i ett antal andra rörtypen, ofta med principiellt avvikande funktionssätt. Dessa rörtypen har också, tack vare sina företräden, kommit att bli de vanligaste även i andra radartillämpningar, där begränsade antenndimensioner är ett krav eller önskemål.

Navigeringsradar

De första tillämpningarna gällde dock flygplanburen radar, och därvid speciellt navigeringsradar. En under flygplanet monterad antenn med ett solfjäderformat cosec²-diagram roterar i horisontalplanet och återger på en PPI-skärm reflexerna från den underliggande terrängen i en kartliknande bild (fig. 12). En sådan bild kan ha ett betydande orienteringsvärde, framförallt om terrängen innesluter ett tillräckligt mått av kontraster mellan ojämna marktyper och släta vattenytor. Detaljrikedom blir större, ju kortare våglängden är, men vid alltför korta våglängder försämrats kvaliteten återigen, genom otillräcklig sändareffekt, vågreflexer på vattenytan, väderleksberoende m.m.



Fig. 13. Londons centrum sett med "sidtittande" radar. De mörka fyrkanterna upptill till vänster är Hyde Park och Regent's Park; i centrum ser man bl.a. departementsbyggnaderna vid Whitehall som en markerad, ljus fyrkant.

Moderna utrustningar använder X-bandet eller Q-bandet (8 mm). K-bandet (1,25 cm) har försökts en tid, men övergetts eftersom en besvärande resonansdämpning i atmosfären begränsar räckvidden alltför mycket. Med de använda banden är det dock möjligt att nå en sådan upplösning i bilden, att inte bara navigering, utan även i viss mån bombfällning är möjlig på basis av radarindikeringen. Tekniken är därvid

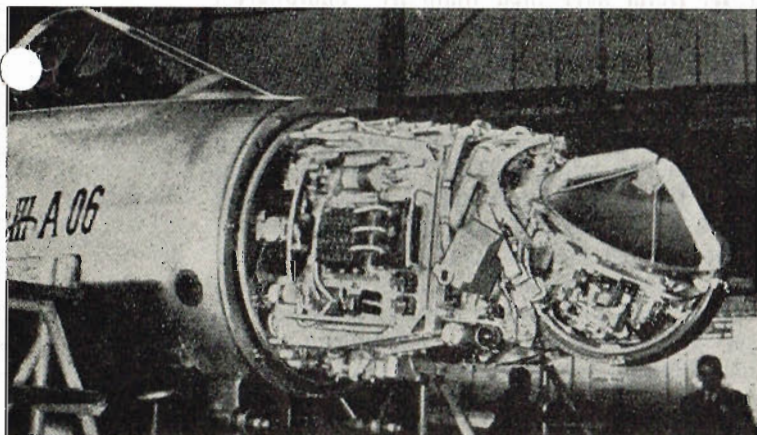


Fig. 14. Cyrano, en fransk flygplansburen eldledningsradar, användbar för jaktbotskjutning, bombfällning och markspaning.

den, att man genom kartstudier lägesbestämmer det avsedda bombmålet i förhållande till någon markerad radarkontrast (en udde, åmynning, bro e.d.) och bestämmer bombfällningspunkten med utgångspunkt från denna "hjälpriktpunkt."

Rekognosceringsradar

En modern variant av denna radartyp utgör "rekognosceringsradarn", som har till uppgift att lokalisera militära mål i terrängmiljö. Man har länge försökt att utveckla millimetervågsradar av konventionell uppbyggnad till den erforderliga upplösningen, men inte nått särskilt goda resultat.

På sista tiden har en helt ny radartyp visat sig ha mycket goda förutsättningar att lösa dessa uppgifter, som framförallt är av betydelse i arméspaningssammanhang. Den "sidtittande" radarn, vars upplösningförmåga exemplifieras av fig. 13, är en kombinerad puls-doppler-radar med antennstrålar riktade vinkelrätt mot flygplanets längsriktning. En mycket kort pulslängd — eller ekvivalenta modulationsmetoder — garanterar en hög upplösning i tvärsled, och upplösningen i längsled ges av en speciell signalbehandlingsteknik; denna diskriminering kan ske med mycket större noggrannhet än vad en vinkeldiskriminering med hjälp av antenndiagrammet kan göras.

Jaktsiktesradar

Bland andra typer av flygplansburen radar bör man särskilt notera jaktsiktesradarn, som ger jaktplanen möjlighet att upptäcka sitt mål och inrikta sina vapen däremot. De första försöken med metervågsradar var förstärkt nog inte särskilt lyckade, utan här som annars var centimetervågorna en nödvändig förutsättning för vidare framsteg. Utvecklingen har också här gått genom flera etapper, där man först anlade radarn enbart som orienteringshjälpmedel, med optisk sikt mot motorflammorna som eldöppningskriterium, för att efterhand komma fram till ett helt på radarobservationer byggt handlingsmönster för jaktflygaren.

De tekniska krav på radarutrustningen, som det sistnämnda synsättet ställer, är också mycket hårda. Radarn måste fungera både som spaningsradar under anflygningsskedet och som eldledningsradar vid anfallet; den måste därför kunna omkopplas mellan flera olika uppgifter: sökning — inom större eller mindre vinkelsektor — målföljning, och skjutlägesbestämning. De olika rörelseprogram för antennen som sålunda blir erforderliga, och omkopplingarna mellan dem, gör att jaktplansradarn till mycket stor del är ett servotekniskt konstruktionsproblem, vilket i någon mån kan utläsas ur fig. 14.

Civila tillämpningar

Lufttrafikövervakning

Bland de stationstyper för civilt bruk, som kommit fram sedan kriget, utgör de typer som är avsedda för övervakning av lufttrafik om-

kring flygplatser och i luftleder den mest framträdande gruppen (Tekn. T. 1960 s. 7). Dessa stationer har i regel mycket gemensamt med de militära luftspaningsstationerna, och de har också genomgått samma tekniska utveckling mot uppdelning av radarstrålen på flera antennlobber, se t.ex. fig. 15.

Behovet av höjdmätning har dock inte varit så framträdande i trafikövervakningen, varför höjdmätningfunktionen inte har utvecklats tekniskt i samma grad som i de militära tillämpningarna.

En hjälpfunktion som har fått kanske större användning i de civila stationstyperna än i de militära är "MTI"-funktionen (Moving Target Indication). Detta är en metod att undertrycka fasta markekon, genom att den mottagna signalen under två på varandra följande pulsperioder subtraheras högfrekvensmässigt fasriktigt. Härigenom tar de markreflekterade signalerna i huvudsak ut varann, medan ett flygplaneko, som på grund av målets fart har något olika fasläge under de bägge perioderna, lämnar en viss restsignal som framträder på PPI-skärmen.

I samband med trafikledningstillämpningarna kan också nämnas GCA-radarn (Ground Control Approach). Detta är ett blindlandningshjälpmedel, ursprungligen för militärt bruk, varmed man på marken skaffar sig en radarbild av det landande planets läge i höjd- och sidled i förhållande till den ideala glidbanan; erforderliga korrektioner meddelas via radio till planet. Denna utrustningstyp var föremål för betydande civilt intresse och utveckling i början på 1950-talet, men den bedömdes inte kunna uppfylla de rigorösa säkerhetskrav som gäller, och den användes därför ännu endast i sekundära funktioner.

Vägtrafikövervakning

För att ge ytterligare ett exempel på en civil tillämpning — av helt annat slag — kan nämnas hastighetsövervakningsradar för polisbruk. Ur principiell synpunkt är detta en mycket enkel anordning, bestående av en CW-sändare utan modulation och en mottagare för detektering av dopplereffekten på den reflekterade signalen; tekniskt sett fordras dock viss omsorg i utförandet för att man skall erhålla erforderlig noggrannhet i hastighetsbestämningen.

Systemuppbyggnad och databehandling

I inledningen påpekades den tendens till integration av radarstationerna med samverkande kommunikations- och presentationssystem, som har möjliggjorts genom databehandlingsteknikens utveckling. Det är särskilt i luftstridsledningssystem som dessa konstruktionsprinciper har fått sin främsta tillämpning, t.ex. det amerikanska systemet Sage avsett för luftförsvaret av den nordamerikanska kontinenten; även det svenska Stril-60 tillämpar en liknande uppbyggnad.

Grundtanken i dessa system är att informatio-

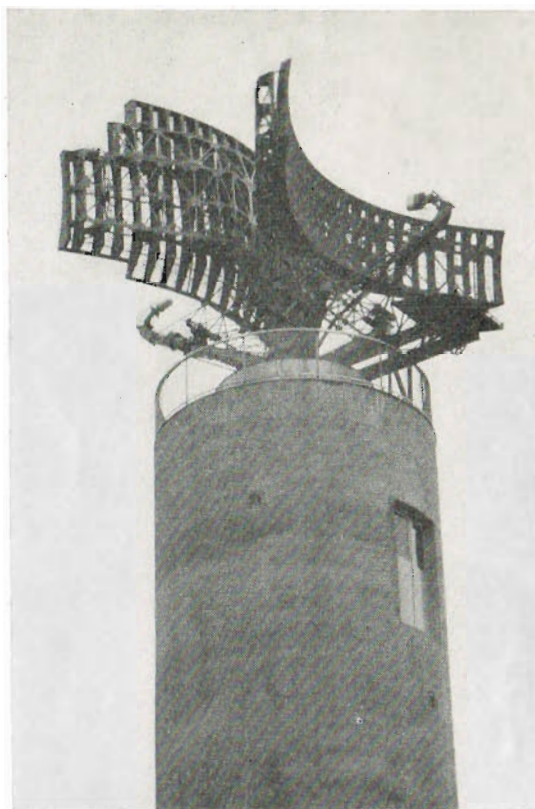


Fig. 15. Arlandas trafikövervakningsradar. S-bandsradar med skilda antenner för när- och fjärrzon. Möjlighet till cirkulärpolarisation för att eliminera bl.a. regnstörningar.

nen från ett flertal radarstationer, med olika geografisk belägenhet eller förutsättningar att på annat sätt inbördes komplettera varann, sammanföres i en central till ett samlat underlättelseunderlag, på vilket aktuella beslut fattas. För att man skall uppnå detta är det nödvändigt att man — vid radarstationen eller i centralen — omformar primärinformationen från de enskilda stationerna till en normalform, som tillåter en enhetlig behandling och sammanlagring. Detta sker med hjälp av "målföljare", som mer eller mindre automatiskt överför videosignalen från radarmottagarna till en sifferkodad signal, representerande de inmätta målens koordinater.

Även målupptäckten och inkopplingen av målföljarna kan automatiseras i högre eller lägre grad. Dessa koordinatsignaler matas sedan till en räkneautomat, som kan utföra diverse operationer med materialet, t.ex. identifiering av nya mål med eventuellt tidigare observerade, val av bästa primärkälla vid överlappande observationer, interpolation av mållägen mellan mättillfällen, extrapolation av anflygningsvägar, beräkning av kontaktpunkter för olika vapen m.m.

Det sålunda behandlade materialet passerar vidare till ett antal indikatorer, på vilka det för stridsledare och operatörer presenteras en syn-

tetisk bild av luftläget, vari de olika företagens lägen visas med markeringar, som även kan ange identitet och andra upplysningar om företagen. Genom maskinbehandlingen är det möjligt att differentiera den visade informationen efter de olika operatörernas behov. Operatörerna själva har också möjligheter att välja informationskategorier, att begära specialupplysningar från maskinen, att använda den för beräkning av vapenprestanda m.m.

Den här beskrivna tekniken är givetvis också med modifikationer tillämplig på den civila lufttrafikledningens problem, som har ökat i takt med trafikvolymens tillväxt. Flera system har föreslagits och konstruerats, men inget har ännu kommit längre än till försöksmässig användning.

Blick mot framtiden

Den uppväxtperiod som radarn genomgått under de senaste tjugo åren kan betraktas som dess historiskt viktigaste utvecklingsperiod. Effekttutvecklingen hos sändarrören har i stort sett nått så långt som det är tekniskt-ekonomiskt rimligt ur räckviddssynpunkt, och stationsutformningen har differentierat sig på så många linjer, att de flesta tänkbara tillämpningar har fått sina speciella apparativa lösningar. Därmed är dock icke sagt att den tekniska utvecklingen är avslutad; tvärtom kan man vänta sig en utvidgning och konsolidering härav i flera olika riktningar.

På den militära sidan kan man framför allt vänta sig en fortsatt utveckling av databehandlingstekniken och automatiseringen av informationsutnyttjandet; särskilt kan man vänta sig nya metoder för hantering av de primära radarsignalerna i syfte att extrahera maximalt informationsinnehåll ur signaler i störmiljö. En viss vidareutveckling av sändareffekten kan kanske också väntas, i varje fall för sådana tillämpningar som robotinmätningsskannare.

På den civila sidan kan man förutse, att den militära databehandlingstekniken kommer att utnyttjas och anpassas till trafikledningsproblemen inom luftfarten. Bland mera futuristiska tillämpningar må erinras om möjliga användningar av radartekniska metoder för satellitinmätning, för kommunikationsförmedling via satelliter genom reflex eller repetersändare, m.m.

Framförallt bör man dock undvika att betrakta radartekniken som ett avgränsat område, som det är möjligt att utmärka vissa utvecklingsgränser för. De senare årens erfarenhet har visat, att radartekniken har flutit samman så med andra teletekniska områden, att varje försök att beskriva radartekniken "som sådan" verkar krammässigt. Radartekniken är ett utvecklingsmässigt betingat, inte särskilt adekvat begrepp; vad det verkligen innebär, är att radarn som tillämpningsfält har stimulerat uppkomsten av nya tekniska förfaranden och synsätt, som kommer teletekniken som helhet till godo.