Lärobok i Militärteknik, vol. 2: Sensorteknik

FÖRSVARSHÖGSKOLAN

Lärobok i Militärteknik, vol. 2

Sensorteknik

Kristian Artman och Anders Westman

FÖRSVARSHÖGSKOLAN

Lärobok i Militärteknik, vol. 2: Sensorteknik
Författare: Kristian Artman och Anders Westman

Lärobok i Militärteknik nr. 2

© Försvarshögskolan och författarna 2007
Mångfaldigandet av innehållet i denna bok är enligt lagen om upphovsrätt förbjudet utan medgivande av Försvarshögskolan.

Bokens innehåll har granskats och godkänts av Militärvetenskapliga institutionens publikationsråd.

Serieredaktör: Stefan Axberg
Projektledare: Per Eliasson
Redaktör: Kristian Artman
Grafisk form och teknisk redigering: Elsa Johannesson
Tryck: Elanders, Vällingby 2007

Första upplagan, första tryckningen, juni 2007

ISSN 1654-4838
ISBN 978-91-85401-73-4

För mer information om Försvarshögskolans publikationer, kontakta oss på telefonnummer 08-553 42 500 eller besök vår hemsida www.fhs.se/publikationer.

Innehållsförteckning

Förord 9

1. Sensorteknik 11
   1.1 Bakgrund 11
   1.2 Inledning 12
   1.3 Fysisk stimulering 13
   1.4 Medium 14
   1.5 Arbetssätt 14
   1.6 Syfte 14
   1.7 Kapacitet 15
   1.8 Våglängd 16
   1.9 Kontrast 16
   1.10 Upptäckt kontra falsklarm 18

2. Radar 19
   2.1 Historia 20
   2.2 Grunder 20
   2.3 Funktionsprincip 22
      2.3.1 Radarparametrar 22
      2.3.2 Radaregenskaper 22
      2.3.3 Antenner 29
      2.3.4 Radarmålarea och smygteknik 31
      2.3.5 Radarhorisont 33
   2.4 Specialfunktioner 34
      2.4.1 Pulsdoppler och hastighetsmätning 34
      2.4.2 Helikopterdetektering 35
      2.4.3 Pulskompression eller pulskod 35
   2.5 Radartillämpningar 36
      2.5.1 Spaningsradar 36
      2.5.2 Följeradar 37
      2.5.3 Millimetervågradar 42
      2.5.4 Elektriskt styrd gruppantenn (ESA, AESA) 43
      2.5.5 Syntetisk aperturradar (SAR) 46
      2.5.6 GMTI-radar 47
      2.5.7 OTH-radar 49

2.5.8 CW-radar 49
2.5.9 Bi- och multistatisk radar 50
2.5.10 Radarzonrör 50
2.6 Utvecklingstrender 51

3. Elektrooptiska sensorer 53
3.1 Emission 54
3.2 Reflektion 56
3.3 Infraröda sensorer 56
3.3.1 Multispektrala och hyperspektrala IR-sensorer 59
3.4 Bildförstärkare 59
3.5 Mörkeranpassning 62
3.5.1 Anpassning av förarutrymmen för NVG-användning 64
3.6 Jämförelse NVG–IR 64
3.7 Lågljus-TV 64
3.8 Aktiva elektrooptiska sensorer 66
3.9 Ultravioletta sensorer 66
3.10 Utvecklingstrender 66
3.11 Upplösningsbegreppet 67
3.12 Elektrooptiska systems prestanda 68

4. Akustiska och seismiska sensorer 71
4.1 Akustiska sensorer 71
4.2 Seismiska sensorer 72

5. Kemiska sensorer 75

6. Laser 77
6.1 Inledning 77
6.2 Skydd mot laser 78
6.3 Tillämpningar 79
6.3.1 Målinmätning 79
6.3.2 Laserradar 80
6.3.3 Optikspanare 80
6.3.4 Antisensorlaser 82
6.3.5 Laserzonrör 84
6.4 Utveckling 84

7. Hydroakustiska och marina elektromagnetiska sensorer 87
7.1 Inledning 87
7.2 Sonarsystem 88
7.2.1 Passiva sonarsystem 88
7.2.2 Aktiva sonarsystem 89
7.2.3 Sändare 89
7.2.4 Signalbehandling i sonar 89
7.3 Utveckling 90
7.3.1 Bistatiska och multistatiska sonarsystem 90
7.3.2 Lågfrekvent aktiv sonar (LFAS) 91
7.3.3 Syntetisk apertursonar (SAS) 91
7.4 Elektromagnetisk vågutbredning i havet 92
7.5 Elektrisk och magnetisk signatur hos fartyg 92
7.6 Elektromagnetiska sensorer 93
7.7 Fältspänningssensorer 96

8. VMS (varnings- och motverkansssystem) 97
8.1 Inledning 97
8.2 VMS grunder 98
8.2.1 Radarvarnare 99
8.2.2 Elektrooptiska varnare 101
8.2.3 Olika motmedel 102
8.3 VMS Luft 107
8.3.1 Inledning 107
8.3.2 Riktningsbestämning 109
8.3.3 Störning 110
8.4 VMS Sjö 112
8.4.1 Inledning 112
8.4.2 VMS inom Sjö 113
8.5 VMS Mark 115
8.5.1 Inledning 115
8.5.2 Systemuppbyggnad 115
8.5.3 Motverkanssystem i VMS 117
8.5.4 Motverkanssystem för plattform 117
8.5.5 Motverkan i förband 118
8.6 Sensorer för signalspaning 120
8.7 Dataförsörjning VMS 121

9 Datafusion 127

Källförteckning 131

Om bokens författare 133

Serien ”Lärobok i Militärteknik” 135

Förord

Vi lever i en föränderlig värld där även krigets karaktär förändras; dess konsekvenser är dock lika ohyggliga som tidigare. Hoten är nya och ofta dolda. Traditionella fronter försvinner, nationalstater är sedan länge inte de enda parterna vid konflikter. Kunskap om och förståelse av de militära arbetsredskapens funktion och nyttjande utgör en viktig framgångsfaktor för dagens och morgondagens officer. Verktygen är till helt övervägande del av teknisk art. Denna nära koppling mellan teknik, taktik och operationer behöver betonas inom officersutbildningen. Detta sker genom ämnet Militärteknik. Militärteknik är nämligen den vetenskap som beskriver och förklarar hur tekniken inverkar på militär verksamhet på alla nivåer och hur officersprofessionen påverkar och påverkas av tekniken. Militärtekniken har sin grund i flera olika ämnen från skilda discipliner och förenar samhällsvetenskapens förståelse av den militära professionen med naturvetenskapens fundament och ingenjörsvetenskapens påbyggnad och dynamik. Militärtekniken behandlar således tekniken i dess militära kontext och utifrån officerens perspektiv.

Som följd av militärteknikens tvärvetenskaplighet studeras och utvecklas ämnet med stöd av både natur-, samhälls- och ingenjörsvetenskaper. De metoder vilka traditionellt tillämpats är främst kvantitativa. Matematik, statistik, tekniska experiment, modellering och simulering är exempel på sådana metoder. Vid studiet av interaktionen mellan teknik och taktik, operation respektive strategi kan även kvalitativa metoder behövas.

Teknikens påverkan finns på såväl stridsteknisk, taktisk/operativ som strategisk nivå. Påverkan är mest tydlig och mätbar på lägre nivåer, t.ex. när ett eller flera tekniska system av motståndaren sätts ur spel genom störning, vilseledande information etc. och man genom att använda sig av en kombination

av teknisk och taktisk kompetens genomför erforderlig taktikanpassning. Med god kunskap om verktygen, dvs. allt från vapen och plattformar till informations- och ledningssystem, samt principer för att bedriva strid på olika nivåer kan den väpnade striden föras framgångsrikt på alla nivåer. Teknikens påverkan ökar dock på strategisk nivå och är då ofta knuten till väsentliga teknologiska utvecklingssteg.

Föreliggande *Lärobok i Militärteknik* är uppdelad i flera delar, av vilka denna är den andra. Skilda teknikområden redovisas i separata bokvolymer för att vid behov snabbt kunna revideras utan att hela boken för den delen måste omarbetas. Likaså möjliggör denna struktur att nya och för officersprofessionen viktiga teknikområden snabbt och enkelt kan ingå i läroboken genom att addera nya volymer.

Denna volym, benämnd *Sensorteknik,* beskriver de vanligast förekommande sensorerna för militära tillämpningar till stöd för vidare militärtekniska studier. Inledningsvis behandlas sensorteknik generellt, varefter sensorer baserade på radarteknik, elektrooptik, akustik, kemisk teknik, laserteknik och hydroakustik beskrivs. Volymen avslutas med ett avsnitt om VMS-teknik.

Studiet av teknik för militära syften ger nödvändig teknisk förståelse liksom kunskaper inom relevanta och aktuella teknikområden. Detta skapar förutsättningar för att förstå interaktionen mellan teknik och militär verksamhet. Militärtekniken utgör nämligen länken mellan den rena teknikkunskapen och dess tillämpningar inom officersprofessionen och jag hoppas att *Lärobok i Militärteknik* kommer att tillföra dagens och morgondagens officerare kunskaper och intellektuella redskap till fromma för såväl karriär som försvarsmakt.

Stockholm i februari 2007

Stefan Axberg, professor i Militärteknik

1. Sensorteknik

1.1 Bakgrund

Under senare delen av 1900-talet var det kalla kriget och hotet för ett storkrig mellan öst och väst det som styrde den militärtekniska utvecklingen i de flesta länder. Idag (2007) är risken för ett sådant krig, för överskådlig framtid, betydligt mindre. Istället är det konflikter mer av karaktären David mot Goliat, där Goliat representeras av den högteknologiska parten och David är den lågteknologiska parten (som inte alltid kan anses ha kombattantstatus). Ur ett västmaktsperspektiv borde en fiende, som både är mindre till antalet och avsevärt mycket sämre utrustad och organiserad än det gamla kalla krigets tänkta fiende, vara en relativt lätt motståndare. Men när vi ser på den reella utvecklingen kan vi konstatera att det USA och deras allierade upplevt i Irak och Afghanistan är en allt annat än en lätt uppgift. Den naturliga frågan är då: Varför är det så? Biter inte det gamla kalla krigets vapen på de, i flesta fall, oskyddade motståndarna?

Problemet ligger snarare i att målen väsentligt har ändrat karaktär, vilket ställer nya krav på sensorer och ledningssystem. Målen under kalla kriget var (mycket generellt betraktat) en stor mängd stridsvagnar som kom framryckande genom Fuldagapet. Behoven och kraven av att identifiera målen var relativt små – västmakterna kunde i princip betrakta allt som kom från öst och körde i västlig riktning som fientliga mål.

Idag är kraven det helt motsatta. Målen är små, otydliga, hastigt uppdykande och försvinnande. Målet kan vara en civilklädd person som bor bland civilbefolkningen, inte bär uniform i vår bemärkelse och direkt efter genomfört eldöverfall gömmer sitt vapen och åter smälter in bland civilbefolkningen. Givetvis biter vapnen på denne, men hur identifieras han/hon som ett mål,tillräckligt snabbt för att bekämpa denne och ingen annan innan han/hon försvinner?

Detta ställer helt andra krav på våra sensorer och sensorsystem än vad det kalla kriget gjorde. Givetvis ställer det andra krav även på bekämpnings- och ledningssystem. Dessa ändrade krav på sensorerna återspeglas i den pågående militärtekniska utvecklingen med t.ex. sensorer för upptäckt av prickskyttar, förbättrade personliga sensorer, sensorer för upptäckt av så kallade IED (*Improvised Explosive Device* – improviserade bomber), precisionsbomber mm.

Om vi återkommer till dagens sensorers tillkortakommanden när det gäller förmåga att snabbt identifiera mål, så får detta stora taktiska, operativa och strategiska följder. Den enda sensor som idag har någorlunda förmåga att identifiera mål är det mänskliga ögat med den mänskliga hjärnans förmåga till bildbehandling. Detta innebär att människan under överskådlig framtid inte går att ersätta vid operationer under komplexa förhållanden som t.ex. fredsfrämjande insatser. I bästa fall kan moderna sensorer, eventuellt länkade via nätverk, understödja människans informationsinhämtning och beslutsfattning.

Underrättelser och information syftar till att kontinuerligt upprätthålla en gemensam lägesbild av pågående, bedömd och kommande verksamhet så att eget och överordnat mål uppnås. För att uppnå detta i dagens stridssituation med stora ytor och få förband där kraven på snabb inhämtning, bearbetning och delgivning av en stor mängd information blir allt högre, krävs stöd i allt större utsträckning. Sensorer är en viktig del i detta för att realisera militär nytta med de förband vi har. Utvecklingen i omvärlden har medfört att vi har gått från det storskaliga kalla kriget till internationella insatser som är fredsframtvingande eller fredsbevarande och där asymmetrisk krigföring är ett tydligt inslag. Den asymmetriska krigföringen medför att fokus ligger på korta ledtider från upptäckt – lokalisering – klassificering – identifiering till bekämpning med krav på noggrann mål- och lägesbeskrivning. Vidare krävs kontinuerlig målföljning under hela beslutsprocessen. Detta kräver i förlängningen en stor bredd i urval av sensorer och sensorsystem för redundans oavsett väderförhållande. Den militära nyttan med sensorer har accentuerats i och med omvärldsutvecklingen där krav på precision och graderad verkan blivit allt tydligare. Den tekniska utvecklingen möjliggör att sensorerna kan fylla sin viktiga plats i den omvärld vi lever i. Det är därför viktigt att förstå vilka möjligheter och begränsningar sensorer och sensorsystem har för att kunna göra rätt bedömning om hur och när de skall användas.

1.2 Inledning

Sensorer är för vapen- och ledningssystem vad de fem sinnena är för människan. Sensorernas uppgift är att samla in information för att använda som underlag för beslut om handling. Utan sensorer finns följaktligen inget beslutsunderlag och därigenom kan inga beslut fattas. Generellt kan sägas att ju bättre

information man har tillgång till, desto klokare och bättre underbyggda beslut vilka i slutändan genererar ett mer avvägt handlande.

I alla tider har sensorer använts för att skaffa underrättelser och rikta in vapensystem. Efter hand som teknikutvecklingen medgett och behoven ökat har sensorerna fått större och större täckning, räckvidd och upplösning samt även kapacitet att verka i mörker och dåligt väder. Precis som med vapenutvecklingen så är det den tänkta hotbilden som styr kraven på sensorer och sensorsystem. Utvecklingen går idag från plattformstänkande mot nätverkstänkande för att kunna hantera en hotbild som är i ständig förändring.

En viktig del i det nätverksbaserade försvaret, såväl som i försvaret i sin helhet, är sensorer. Dessa skall svara för insamlandet av information till nätverket. Idag är vanligtvis en specifik sensor kopplad till ett vapensystem/plattform med syfte att förse vapensystemet/plattformen med information för att det skall nå optimal verkan. I det nätverksbaserade försvaret skall istället ett stort nät av sensorer förse nätverket med information. Ur nätverket kan sedan vapensystemen/plattformarna hämta den information som behövs för att erhålla optimal verkan.

Ordet sensor betyder enligt SAOL ”en apparat inrättad att känna av fysisk stimulering”. Sensorn ger sedan ifrån sig en signal under denna fysiska stimulering; ofta obearbetad rådata som kräver mycket behandling eller bearbetning innan den kan anses vara information eller underrättelser. Det finns många typer av sensorer med fullständigt olika egenskaper. Det som bl.a. skiljer dem åt är:

- Vilken fysisk stimulering de känner av (t.ex. ljus, ljudtryck, radiovågor, lukt)
- Vilket medium de arbetar i (t.ex. luft, vatten, mark)
- Hur de arbetar (passivt, aktivt)
- Vilket syfte de har (spaning, målsökning, identifiering)

1.3 Fysisk stimulering

Sensorn skall som nämnt reagera för någon form av fysisk stimulering. Det vanligaste är att den känner av elektromagnetisk strålning i någon våglängd. Här kan nämnas radar, IR-kamera eller ögat som några exempel. Även sensorer som reagerar på annan form av fysisk stimulering finns, t.ex. akustiska sensorer som reagerar på ljudtryck över eller under vattnet och kemiska sensorer som reagerar på kemiska substanser.

1.4 Medium

Mediet mellan mål och sensor påverkar sensorns konstruktion och funktion. Faktorer som dämpning, strålbrytning och flervägsutbredning varierar kraftigt mellan olika medier. Detta innebär bl.a. att vissa medier inte alls lämpar sig för vissa typer av sensorer. En radar t.ex. fungerar mycket dåligt i annat än i luft pga. av den höga dämpningen i mark och vatten.

1.5 Arbetssätt

En annan generell uppdelning av sensorer kan göras genom att studera deras arbetssätt. Är sensorn passiv, dvs. sänder inte ut någon egen signal, eller är den aktiv, dvs. sänder ut en egen signal?

- *Passiva sensorer* består enbart av en mottagare som lyssnar efter signaler som målet själv skapar eller reflekterar från omgivningen (ljud, ljus, värme, magnetiska förändringar etc.). Exempel på passiva sensorer är ögat, IR-kamera, hydrofon. Passiva sensorer klarar ej ensamma att mäta avstånd utan måste kombineras med andra sensorer eller sättas samman i grupper, så kallade kluster, för att klara avståndsmätning.
- *Aktiva sensorer* består både av sändare och av mottagare. Sändaren skickar ut en signal som reflekteras av målet och som mottagaren sedan detekterar. Aktiva sensorer klarar ensamma att mäta avstånd till målet. Exempel på aktiva sensorer är radar och sonar.

1.6 Syfte

Sensorer används för olika syften. Beroende på om sensorn är avsedd för *spaning, eldledning, navigering, varning, målsökning* eller annan uppgift kommer den att vara olika konstruerad för att optimera resultatet. Generellt kan sägas att den perfekta sensorn inte existerar. Ingen sensor kan byggas för att ensam tillgodogöra alla önskemål. De kompromisser som måste göras står vanligen mellan krav på:

- Räckvidd
- Yttäckning
- Vinkelupplösning
- Avståndsupplösning
- Tidsupplösning (uppdateringshastighet)
- Röjningsrisk

Exempel: En radar avsedd för spaning bör kunna täcka en stor yta. För att kunna täcka en stor yta måste vissa parametrar väljas för att tillgodose detta. Dessa val innebär samtidigt att radarn får antingen sämre rumsupplösning och/eller tidsupplösning.

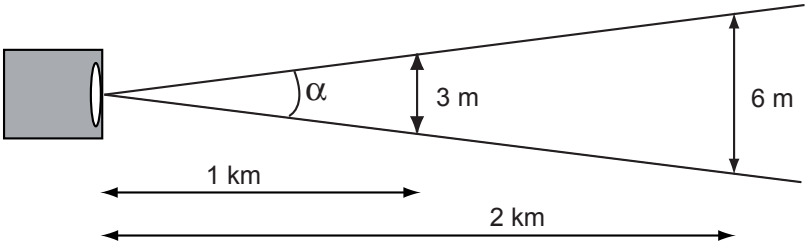
Mot bakgrund av detta konstaterande står det klart att det vore en fördel att kunna kombinera en mängd olika sensorer med olika egenskaper för att kunna få information om ett objekt som tillgodoser de fem ovan nämnda kraven. Om vi på ett bra sätt kan fusionera informationen från alla tillgängliga sensorer i ett nätverk kan alltså informationen hämtas därifrån istället för som på det vanliga sättet, dvs. att informationen skulle ha hämtats från en enskild sensor.

1.7 Kapacitet

En sensor kan, i kombination med annan lämplig utrustning, ge möjligheten att i stigande ordning:

- Detektera ett objekt
- Lokalisera ett objekt
- Klassificera ett objekt
- Identifiera ett objekt

Ofta är det upplösningen som sätter gränserna för vad sensorsystemet klarar av. Det krävs exempelvis avsevärt högre upplösning för att identifiera ett objekt än att endast lokalisera det. En sensor har vanligtvis en fast vinkelupplösning vilket innebär att den faktiska upplösningen beror på avståndet. Figur 1 visar hur en sensor med fast vinkelupplösning på en kilometers avstånd har upplösningen 3 m; när avståndet dubblas till 2 km dubblas, försämras, också upplösningen till 6 m.



Figur 1. Fast vinkelupplösning. (Källa: FHS)

Vissa sensorer följer dock inte ovanstående mönster utan kan ha helt andra egenskaper. Till exempel har en akustisk sensor ensam (akustiska sensorer i kluster kan även lokalisera objekt) många gånger svårt att lokalisera ett objekt, men genom att jämföra sensorns insignaler med ett ljudbibliotek kan sensorn klara av att klassificera objektet i fråga.

1.8 Våglängd

De flesta sensorer känner av någon form av vågrörelse oavsett om den är elektromagnetisk, seismisk eller akustisk. Generellt kan sägas att ju längre våglängder (lägre frekvens) som sensorerna nyttjar så innebär det följande:

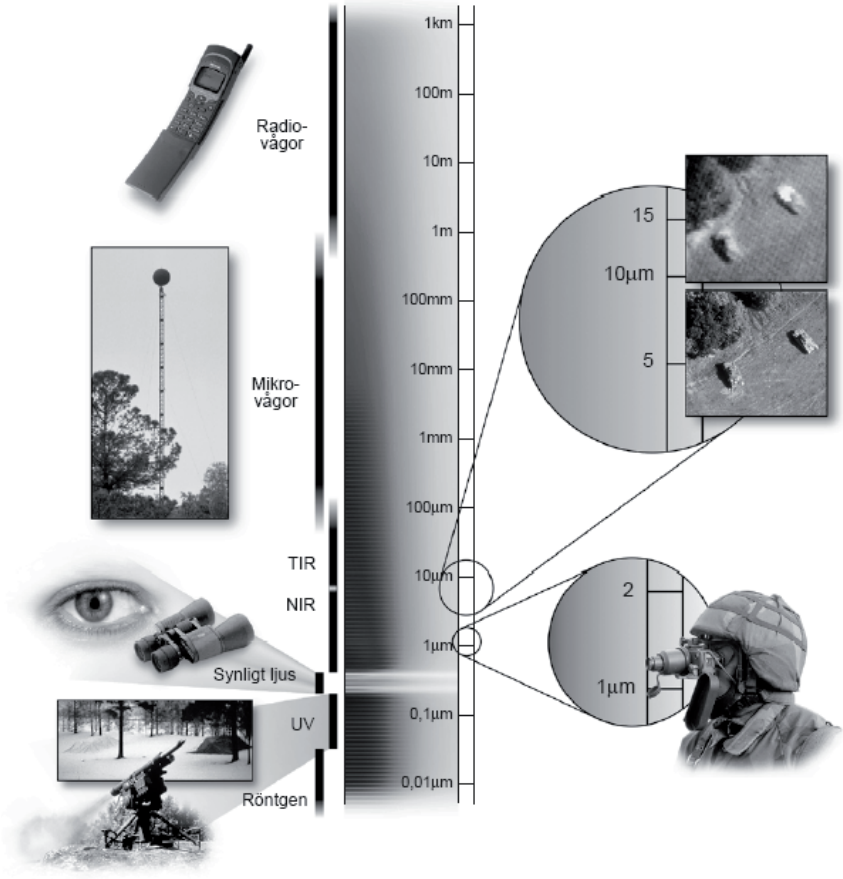
- Större antennsystem behövs
- Räckvidden ökar (bl.a. pga. lägre dämpning i mediet)
- Sämre vinkelupplösning

Figur 2 visar ungefärliga våglängdsområden för olika system som nyttjar elektromagnetiska vågor.

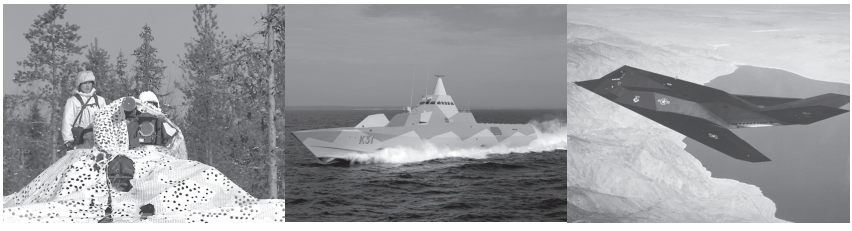
1.9 Kontrast

Det som avgör om vi med vår sensor detekterar ett objekt eller inte beror till stor del på vilken kontrast objektet har mot bakgrunden. En svart prick syns mycket tydligt på en vit yta. På samma sätt syns ett varmt objekt tydligt mot en kall bakgrund med en IR-kamera. Ett välkamouflerat objekt har liten kontrast mot bakgrunden, dvs. det har samma färg, temperatur eller annan signatur som bakgrunden.

Ett smyganpassat (*stealth*) fartyg eller flygplan är också anpassat för att ha minimal kontrast mot bakgrunden och därigenom inte synas av sensorer. I figur 3 kan vi se tre exempel där man försökt minska plattformens kontrast mot bakgrunden. På den vänstra bilden har soldaterna med hjälp av maskeringsnät minskat den optiska kontrasten mot snön. I den mittersta och högra bilden har konstruktören med mer avancerad (och avsevärt dyrare) teknik försökt att minska plattformens kontrast mot bakgrunden inom ett stort antal våglängdsområden. Formen på en plattform är också viktig för att reducera risken för upptäckt. Den högra bilden är ett bra exempel på hur utformningen primärt är inriktad mot att reflektera bort radarstrålning för att på så sätt skapa en liten radarmålarea.



Figur 2. Våglängdsområden för olika system som nyttjar elektromagnetisk strålning. (Källa: FM)



Figur 3. Exempel på olika sätt att minska föremålets kontrast mot bakgrunden. (Källa: FBB)

1.10 Upptäckt kontra falsklarm

Gemensamt för alla typer av sensorer, passiva såväl som aktiva, är att det krävs en avvägning mellan sannolikheten för upptäckt och risken för falsklarm när den konstrueras. Ju högre sannolikhet en sensor har för upptäckt, desto större är risken för falsklarm. För vissa typer av sensorer såsom övervakningssensorer kan en högre grad av falsklarmsrisk accepteras för att erhålla en god upptäcktssannolikhet. Används däremot sensorn för varning som i ett VMS, varnings- och motverkanssystem, är kraven på att den inte falsklarmar mycket hög.

Falsklarm uppstår när bakgrundsbruset i en sensor uppfattas som ett mål av signalbehandlingen. Anledningen till att systemet uppfattar det som ett verkligt mål kan bero på att signalstyrkan i bakgrundsbruset är tillräckligt hög och/eller att signalkaraktäristiken är mycket lik en verklig signal. Det finns olika tekniska verktyg för att bibehålla god upptäcktssannolikhet med låg risk för falsklarm.

För att undvika falsklarm i en sensor används olika tekniker för undertryckning, där en av de vanligaste är att sätta tröskelvärden för hur stark signalen skall vara för att den skall godkännas som mål. Andra undertryckningstekniker kan vara att sätta olika diskrimineringskriterier på signalkaraktäristiken såsom tidsdiskriminering, koherensdiskriminering och/eller våglängdsdiskriminering för att eliminera falsklarm. Ett exempel på tidsdiskriminering för laservarnare är att mäta pulsens stigtid då en laser har betydligt kortare stigtid än vad solreflexer har; på så sätt kan signalbehandlingen diskriminera bort solreflexer och risken för falslarm reduceras därmed.

2. Radar

Radarsystem använder elektromagnetisk strålning med frekvenser som vanligen ligger mellan 1 och 100 GHz. Tack vare att radarn använder relativt långa våglängder så är den, i jämförelse med t.ex. elektrooptiska sensorer, relativt väderokänslig, dvs. den påverkas endast i ringa omfattning av dåligt väder och t.ex. stridsrök. Kraftigt regn kan dock minska räckvidden hos radarn. Precis som alla andra sensorer är radarns egenskaper kompromisser mellan framför allt yttäckning/räckvidd och upplösning/noggrannhet. Dessa två egenskapers svårförenlighet gör att man traditionellt har haft radar med olika konstruktionsprinciper för olika ändamål. De vanligaste (för militärt bruk) är:

- Spaning
- Målsökning
- Eldledning
- Navigering

Tidigare har dessa olika användningsområden inneburit radikalt olika konstruktionsprinciper, men utvecklingen går mot att försöka bygga in så många olika funktioner som möjligt i en och samma radar, en s.k. multifunktionsradar. Det tidigare resonemanget om att en sensor är en kompromiss mellan olika önskade egenskaper gäller även multifunktionsradarn.

I och med att radarn är en aktiv sensor innebär det att det finns goda möjligheter att mäta in radarsensorn och även störa den på elektronisk väg. Vissa typer av radarsystem som t.ex. luftvärnsradar riskerar även fysisk bekämpning genom inmätning av radarn av signalsökande robotar.

2.1 Historia

Det är svårt att sätta fingret på en speciell person som uppfann radar eller ett speciellt år som radarn föddes. Radar är snarare en produkt av en mängd uppfinningar och upptäckter som genom åren inneburit förverkligandet av en radar. Dessutom är radarhistorien präglad av myter och teknisk nationalism som gör historien än snårigare. Dock finns några tydliga milstolpar:

- 1887 experimenterar Heinrich Hertz med radiovågor och upptäcker att vissa material släpper igenom vågorna medan andra reflekterar dem.
- 1904 förevisar Christian Hülsmeier offentligt sin kollisionsvarnare för fartyg som med hjälp av radiovågor detekterar andra fartyg på upp till 3 km avstånd.
- Ca 1935 finns i flera länder fungerande radarsystem. Dessa är dock då fortfarande i ett tidigt stadium av sin utveckling.
- 1940 uppfinns magnetronen av de brittiska forskarna John Randall och Harry Boot. Med den kan stora effekter med kortvågig mikrovågsstrålning genereras. Detta innebär att radarn nu går att göra så liten att den ryms i ett flygplan. Dessutom blir upplösningen och noggrannheten avsevärt bättre än tidigare.

Efter andra världskriget utvecklas radarn vidare. Datorutvecklingen har möjliggjort bl.a. framtagandet av aktiva antenner och syntetisk aperturradar.

2.2 Grunder

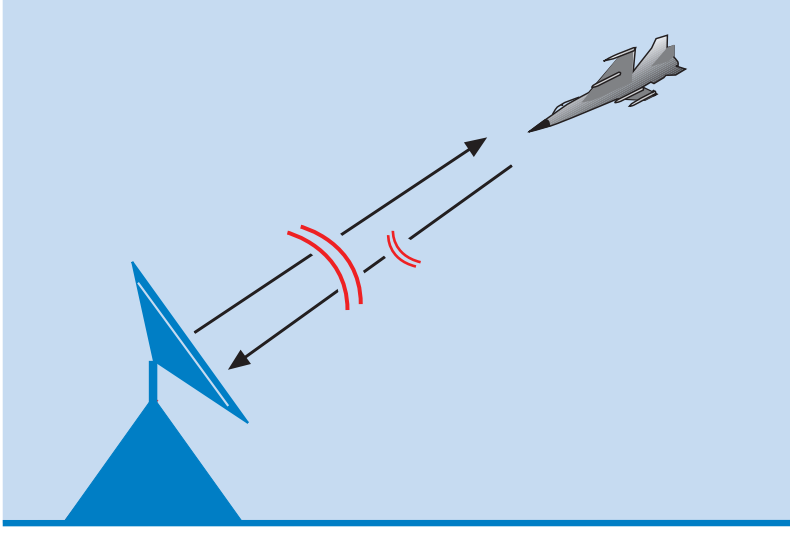
En radar kan liknas vid en människa som en mycket mörk natt lyser sig fram med en ficklampa med smal stråle. Genom att belysa ett litet område, där det belysta objektet reflekterar tillbaka strålningen till belysarens öga, kan personen genom att svepa med lampan över terrängen bygga upp och skapa sig en bild av terrängen framför sig. På samma sätt bygger radarn upp en bild av det som finns runt omkring den. Skillnaden är att radarn använder en betydligt längre våglängd än ficklampan, vilket innebär att den elektromagnetiska strålningen inte kan uppfattas med ögat utan måste fångas upp och förstärkas i radarns mottagare. Radarn kan med hjälp av sin funktionsprincip mäta in målets (se figur 4):

- Avstånd
- Riktning
- Hastighet

Avstånd räknar den ut genom att mäta den tid det tar för den elektromagnetiska vågen att färdas från radarn till målet och tillbaks igen. Då hastigheten hos vågen är känd (ca ljusets hastighet, 300 000 km/s) kan avståndet till målet beräknas.

Riktning till målet fås genom att mäta i vilken riktning antennen pekar då ett eko fås från ett mål. Det finns radar som mäter både höjd och sidvinkel, men många mäter enbart en av dem. Förenklat kan man säga att antennen riktas så att målet ger starkast signal.

Hastigheten hos målet kan mätas på två sätt: Endera följs målet under en tid och genom att betrakta hur målet rör sig beräknas dess hastighet. Alternativ två är att iaktta den s.k. dopplerfrekvensen som bildas då ett rörligt mål träffas av en vågrörelse. Dopplerfrekvens förklaras närmare senare i kapitlet.



Radarprincipen

Med hjälp av denna princip kan flera saker mätas:

Avstånd: Tiden från utsänd puls till mottagen, delat med 2, gånger ljushastigheten

$$R = \frac{c \bullet T}{2}$$

Riktning: Vinkelgivare på antennen används

Hastighet: Målets positionsförändring, eller mätning av den s.k. dopplerfrekvensen (ger radiell hastighet)

Figur 4. Enkel funktionsprincip för radar. (Källa: FM)

Radarn är ett aktivt system som sänder ut en eller flera elektromagnetiska pulser och sedan mäter hur lång tid det tar innan pulsen kommer tillbaka som ett eko från ett mål. Genom att känna till att en elektromagnetisk våg rör sig med ljusets hastighet så kan avståndet till målet beräknas.

2.3 Funktionsprincip

Inledningsvis beskrivs, mycket förenklat, funktionsprincipen och inverkande parametrar för en enkel pulsradar med roterande antenn. Senare kommer andra radarvarianter och specialfunktioner att beskrivas.

2.3.1 Radarparametrar

Det finns en uppsjö av olika radartillämpningar, och beroende på vilken radarns huvuduppgift är så ser den ut på olika sätt. Ingen enskild radar kan själv lösa alla uppgifter perfekt utan är en kompromiss utifrån dess önskade egenskaper. Parametrar som påverkar dess funktion är (pulsradar) (se figur 5):

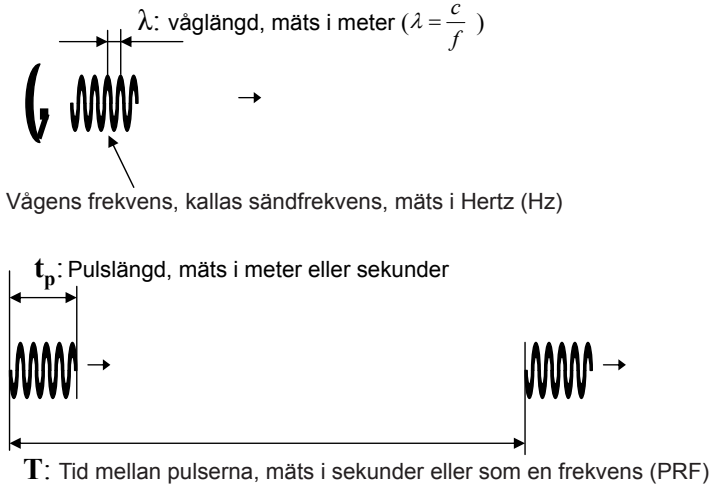
- Sändfrekvens (använd våglängd)
- Pulsrepetitionsfrekvens (PRF)
- Bredd på antennloben
- Antennrotationshastighet (eller om den inte roterar, hastigheten med vilken antennloben rör sig när den avsöker en yta)
- Antennens storlek
- Pulslängd
- Sändeffekt

Det finns andra parametrar som också påverkar radarns prestanda, men dessa sju nämnda är en bra början för att kunna skapa en initial förståelse för vad som påverkar en radars egenskaper.

2.3.2 Radaregenskaper

De primära egenskaperna vid antennkonstruktion är:

- Räckvidd
- Volymtäckning
- Upplösning och vinkelnoggrannhet
- Uppdateringstakt



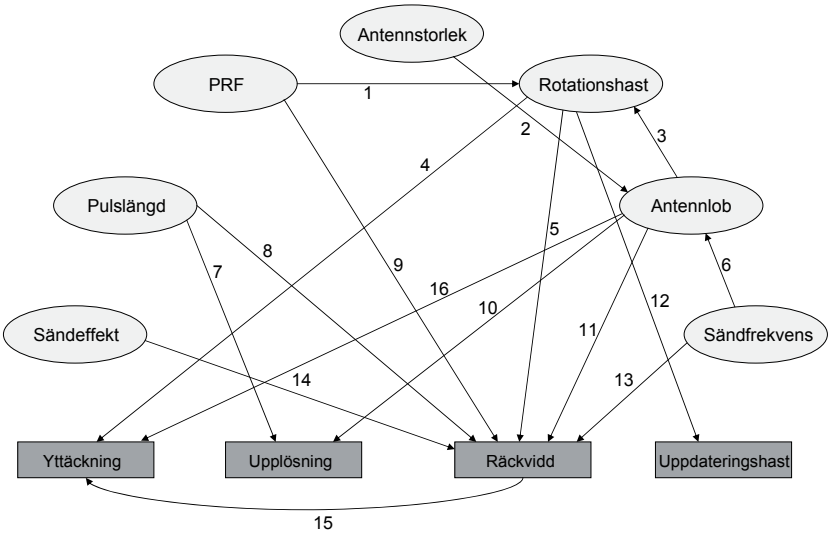
Figur 5. Definition av sändfrekvens, våglängd, pulslängd och tid mellan pulserna. Vanligen anges inte tiden mellan pulserna, utan i stället anges antalet pulser som sänds per sekund, den s.k. pulsrepetitionsfrekvensen, PRF. Definitionen av PRF är $\frac{1}{T}$ (Hz). (Källa: FHS)

Dessa egenskaper är i många fall mycket svåra, för att inte säga omöjliga, att kombinera i en och samma radar. Sensorn blir en kompromiss där de önskade egenskaperna prioriteras på bekostnad av någon annan; t.ex. står yttäckning i motsatsförhållande till upplösning, vilket innebär att bra yttäckning medför låg upplösning och följaktligen hög upplösning medför dålig yttäckning. Sambanden mellan parametrar och egenskaper visas i figur 6 på nästa sida.

De sju olika parametrarna påverkar radaregenskaperna på olika sätt samtidigt som de påverkar varandra. Utgående från egenskaperna i en radar skall vi nedan försöka reda ut vilka parametrar som påverkar dem primärt såväl som sekundärt samt hur parametrarna påverkar varandra sinsemellan.

- Volymtäckning

Sambandet mellan yttäckning, antennrotationshastighet [4], räckvidd [15] samt antennlob [16] är relativt handfast. En radar med lång räckvidd och bred antennlob täcker sannolikt en stor yta då antennen roterar. Problemet är dock att en långräckviddig radar har en antenn som roterar långsamt för att få tillbaka tillräckligt många ekon från ett mål. Det innebär i sin tur att uppdateringshastigheten, dvs. hur ofta radarn återkommer och ”tittar” på samma mål, blir lidande.



Figur 6. Samband mellan radarparametrar (ellipser) och de radaregenskaper (rektanglar) som eftersträvas. Siffrorna anger inbördes förhållanden. (Källa: FHS)

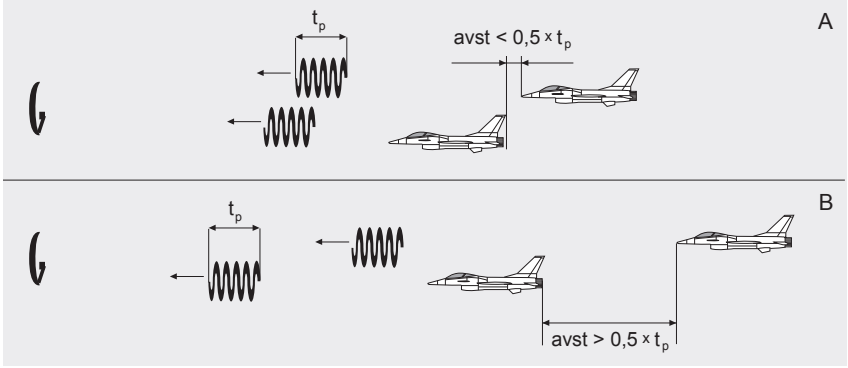
- Uppdateringstakt

Uppdateringshastigheten, det vill säga hur ofta radarn belyser samma mål, är direkt beroende av rotationshastigheten [12] för en mekaniskt roterande radarantenn. För en elektriskt styrd antenn blir uppdateringshastigheten av en annan karaktär. Det går oerhört mycket fortare att flytta en radarstråle elektriskt än mekaniskt, samtidigt som man dessutom kan hoppa fram och tillbaka under svepet med radarstrålen på ett sätt som inte är möjligt med en mekaniskt roterande antenn. Vidare kan operatören här själv bestämma hur ofta ett mål skall belysas.

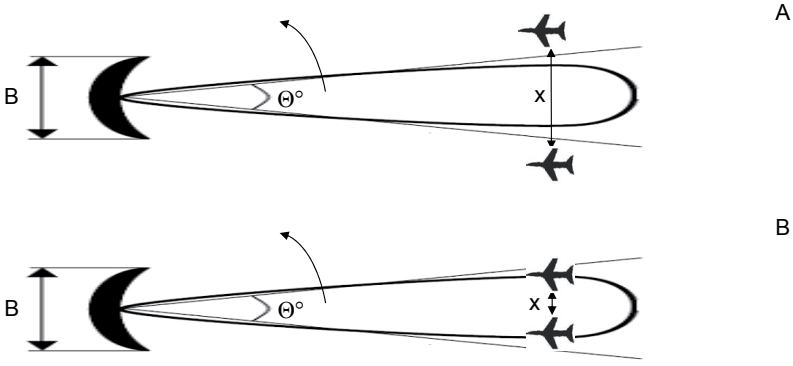
- Upplösning

En radars upplösning, dvs. hur nära två mål kan ligga varandra i avstånd och sida (vinkelupplösning) och fortfarande detekteras som två mål, är i princip beroende av pulslängden [7] och antennlobens bredd [10]. Längden på en puls avgör radarns förmåga till avståndsupplösning. Ju längre pulsen är, desto sämre blir avståndsupplösningen. Radarn sänder ut en puls under en viss tid; sambandet mellan pulstid och pulslängd är att ökande tid ger en ökad pulslängd. Slutsatsen blir sålunda att ju kortare puls, desto bättre avståndsupplösning (se figur 7).

Sambandet mellan antennlobens, även kallad radarlobens, bredd och radarns upplösning i sida (vinkelupplösning) [10] kan enklast beskrivas så här:



Figur 7. Om avstånden mellan målen understiger halva pulslängden (eller snarare den sträcka pulsen färdas på halva pulstiden) kommer ekona från målen att överlappa varandra och radarn kommer inte att kunna urskilja att det handlar om två mål (a). Om avståndet däremot överstiger halva pulstiden kommer ekona inte att överlappa varandra och följaktligen kommer radarn att urskilja två mål (b).
(Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)



Figur 8. Sambandet mellan lobbredd och vinkelupplösning. Om avståndet x mellan målen överstiger lobbredden kan radarn ange flygplanen som två mål, annars kommer radarn att visa planen som ett mål. Detta beror på att när radarloben passerar flygplanen kommer det i a) att finnas ett läge då inget eko återkommer, medan det i b) kommer eko tillbaka från det att loben träffar första flygplanet till det att den lämnar det andra. (Källa: FHS)

För att radarn skall kunna avgöra att det handlar om två mål (när de är separerade i sidled), krävs det att loben, när den sveper förbi, vid något tillfälle skall kunna peka mellan målen utan att få något eko tillbaka, dvs. ett svep kommer att ge två separata ekon tillbaka (se figur 8). Av detta resonemang kan vi sluta oss till att ju smalare radarlob, desto bättre vinkelupplösning.

- Räckvidd

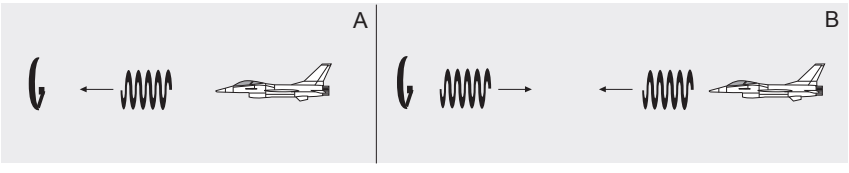
Räckvidden är den egenskap hos en radar som är mest komplex när det gäller sambandet mellan olika parametrar och hur de påverkar radarns egenskaper. Vi kan börja med en betraktelse över sambandet mellan parametrarna:

Sändfrekvensen (våglängden) [6] påverkar tillsammans med *antennstorleken* [2] hur brett vi sänder ut vår radarenergi (antennlobens bredd). Sändfrekvensen påverkar också räckvidden [13] i den meningen att en lägre frekvens (längre våglängd) dämpas mindre i atmosfären och ger en längre räckvidd. Pulsrepetitionsfrekvensen (PRF) [9] påverkar i sin tur räckvidden på två sätt:

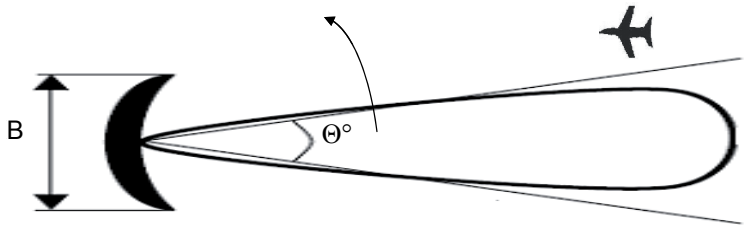
- En högre PRF ger fler ekon tillbaka från målet, dvs. mer energi reflekteras från målet vilket ger större detektionssannolikhet, vilket i praktiken innebär längre räckvidd.
- Samtidigt innebär dock en hög PRF ett kort längsta mätavstånd (se figur 9). Detta pga. pulsradarn bara ”kan ha en puls i luften samtidigt”, dvs. tiden som går mellan pulserna sänds ut avgör vilket maximalt entydigt mätavstånd radarn har.

Pulslängden påverkar räckvidden [8] positivt då en längre puls innehåller mer energi, vilket innebär att mer energi kommer tillbaka från målet; det blir bättre atmosfärspenetration, vilket resulterar i längre räckvidd. Pulslängden påverkar dock också avståndsupplösningen [7]. En längre puls innebär sämre avståndsupplösning enligt resonemanget ovan.

Sambanden mellan PRF, antennlob och rotationshastighet är än mer komplext. Vi antar att vi vid varje antennvarv måste få tillbaka flera ekon från ett mål för att verkligen vara säkra på att det är ett mål och ingen störning eller brusgenomslag, säg t.ex. 10 ekon från varje mål. För att vara säkra på att få tillbaka 10 ekon måste vi se till att under den tid som antennloben pekar på målet sända ut minst 10 pulser. Här kan vi se att sambandet mellan PRF, antennlobens bredd och antennens rotationshastighet måste anpassas så att vi får



Figur 9. PRF inverkan på maximalt mätavstånd. I figur a hinner ekot tillbaka från målet innan vi skickar ut nästa puls. I figur b hinner inte ekot tillbaka innan vi sänder ut nästa puls, vilket innebär att tidmätningen inte kommer att fungera och därmed kommer inte heller avståndsmätningen att bli korrekt.
(Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)

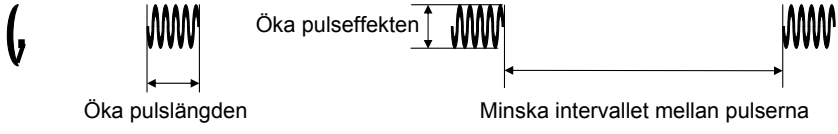


Figur 10. Sambandet mellan PRF, antennlobens bredd och antennens rotationshastighet. (Källa: FHS)

tillbaka 10 ekon. Är PRF för låg, antennloben för smal eller rotationshastigheten för hög kommer vi inte att hinna sända 10 pulser under tiden antennloben pekar på målet och därigenom får vi inte heller tillbaka våra 10 ekon. Anpassas inte sambandet mellan PRF, antennlob och rotationshastighet optimalt kommer det att påverka räckvidden negativt.

Det finns också, givetvis, ett samband mellan utsänd energi och radarns räckvidd. Ju längre räckvidd vi önskar, desto mer energi måste sändas ut. Det finns tre sätt att öka energin som sänds ut: högre sändeffekt [14], längre pulser [8] eller tätare mellan pulserna (dvs. högre PRF) [9] (se figur 11). Om vi ökar vår PRF så uppstår dock problemet med avståndsmätningen (se figur 9), vilket innebär att det alternativet blir krångligt. Enklare är istället att öka pulslängden och pulseffekten. Nackdelen med att öka pulslängden är dock att avståndsupplösningen blir sämre (se figur 7), men det går att lösa med s.k. pulskompression som vi återkommer till senare. Att öka pulseffekten har också sina nackdelar, t.ex. genom att en radar med hög pulseffekt är relativt enkel att pejla.

I texten ovan, vilken försöker reda ut sambanden mellan de olika parametrarna, kan vi åtminstone förstå att alla parametrar hänger ihop mer eller mindre, dvs. det går inte att ändra en parameter för att uppnå en ändring i radarns prestanda utan att något annat påverkas. Därför är alla radarstationer en kompromiss av olika önskade egenskaper. Genom att prioritera vissa egenskaper tvingas man välja parametrar som ger andra, mindre önskade, följdeffekter. Konstrueras en långräckviddig spaningsradar där räckvidd och yttäckning har varit prioriterade egenskaper, sker det på bekostnad av upplösning och uppdateringshastighet. Konstrueras en korträckviddig spaningsradar där storlek och



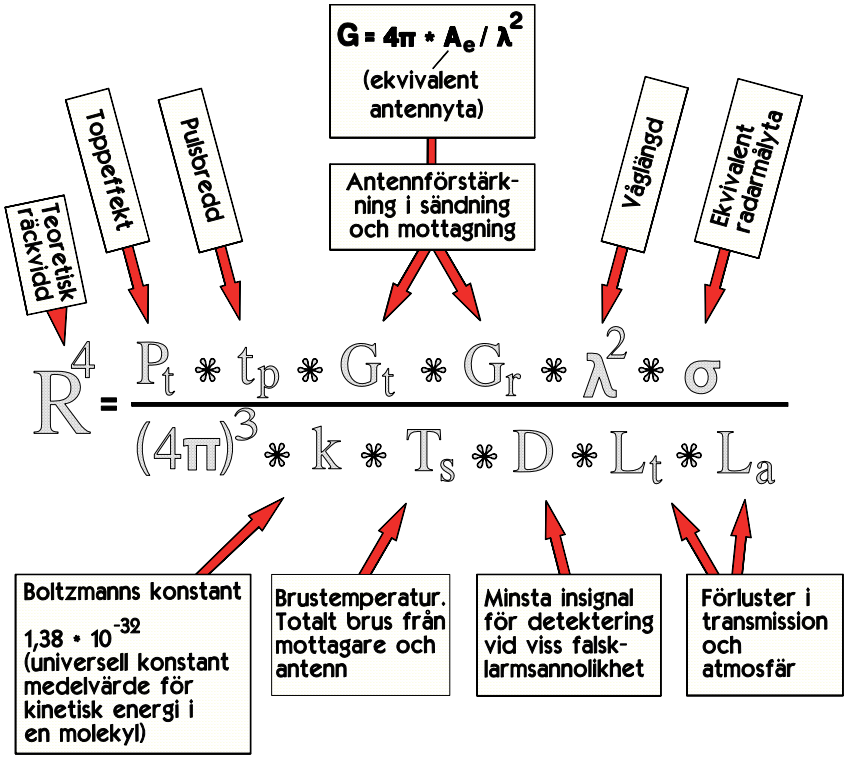
Figur 11. Tre sätt att öka energin som radarn sänder ut. (Källa: FHS)

uppdateringshastighet varit prioriterade funktioner, sker det på bekostnad av räckvidd.

- Radarekvationen

Radarekvationen (se figuren nedan), är en teoretisk formel som inte är praktiskt användbar för att få fram ett absolut värde på en radars räckvidd på grund av stora osäkerheter i ingående parametrar. Dock visar den på vilka faktorer som påverkar räckvidden:

- Högre toppeffekt ger längre räckvidd.
- Längre pulslängd (pulsbredd) ger längre räckvidd.
- Högre antennförstärkning ger längre räckvidd.
- Längre våglängd(= lägre frekvens) ger längre räckvidd.
- Större radarmålarea ger längre räckvidd.



- Högre brustemperatur i radarn ger minskad räckvidd.
- Minskad känslighet för måldetektering i radarn ger minskad räckvidd.
- Ökade förluster i transmission och atmosfär, våglängdsberoende, ger minskad räckvidd.

Generellt kan sägas att ju mer energi som skickas ut i rymden, dvs. hög toppeffekt och lång sändpuls, desto längre räckvidd.

Sammanfattningsvis kan sägas att de parametrar som står över bråkstrecket i radarekvationen ger ökad räckvidd när de ökas, och de parametrar som står under bråkstrecket ger minskad räckvidd om de ökar.

2.3.3 Antenner

För att fokusera energin i önskad riktning använder all radar antenner. Vanligtvis används samma antenn både för utsändning och mottagning av energin. Det som avgör vilken vinkelupplösning en radar har är till stor del beroende av bredden på den utsända ”radarstrålen”, den s.k. antennloben. Ju smalare vi sänder ut radarenergin desto bättre blir upplösningen. Samtidigt innebär en smalare antennlob att det tar längre tid att avsöka ett område.

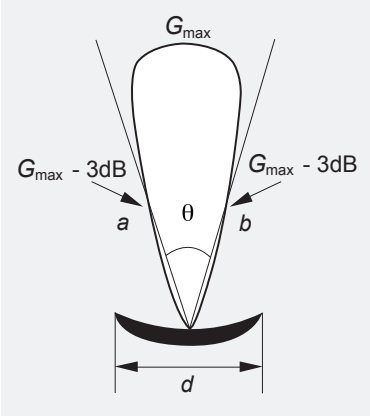
Här förstår vi direkt att vi tvingas till en avvägning beroende av vad vi vill att radarn skall vara bra på. T.ex. passar en eldledningsradar, där upplösningen är av största vikt (pga. att vi vill kunna skjuta på ett mål med stöd av informationen), inte för att kunna avspana stora ytor på kort tid. En spaningsradar däremot, vars främsta uppgift just är att avspana stora ytor på kort tid, måste kanske använda en bred antennlob för att uppnå detta, men får då den nackdelen att upplösningen inte blir den bästa.

Det som avgör hur smal antennloben blir är i huvudsak förhållandet mellan radarns våglängd och antennens storlek. För att få en smal antennlob måste antennen vara avsevärt mycket större än våglängden. En tumregel för att räkna ut lobbredden hos en antenn är att använda formeln

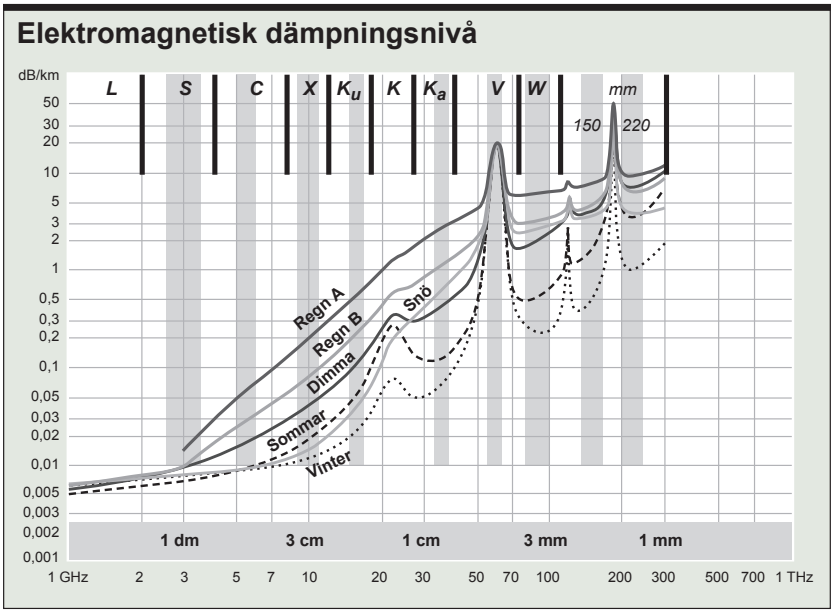
$$\Theta \approx \frac{60 \bullet \lambda}{d}$$

där Θ är lobvinkeln i grader, λ är våglängden i meter och d är antennens bredd i meter.

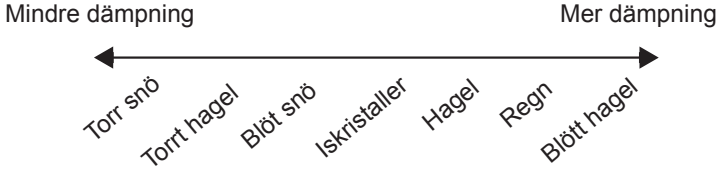
En antenn kan aldrig konstrueras så att den koncentrerar all effekt i en riktning pga. att det alltid uppstår diffraktionsfenomen i samband med vågor. För antenner är det kanten på antennen som åstadkommer diffraktionen. Vidare finns ingen absolut avgränsning för antennloben. För att ange lobvinkeln mäts maxeffekt (G_{max}) från antennen på ett bestämt avstånd. Därefter vrids antennen först åt höger och sedan till vänster till dess maxeffekten halverats.



Figur 12. Exempel på antenndiagram (G_{max} – 3dB = G_{max}/2). (Källa: FHS)



Figur 13a. Radarsignalens dämpning beroende av väder och våglängd. (Källa: FOI)



Figur 13b. Nederbördens påverkan på radarsignalens dämpning. (Källa: FOI)

Lobvinkeln anges som vinkeln mellan vridningen åt vänster resp. höger där maxeffekten halverats (se figur 12).

Här kan en enkel lösning tyckas vara att alltid anpassa valet av våglängd efter tillgänglig antennstorlek. Problemet är, som tidigare nämnts, att atmosfärdämpningen av radarvågen ökar med minskande våglängd, dvs. radarns räckvidd minskar då vi använder en kortare våglängd (se figur 13).

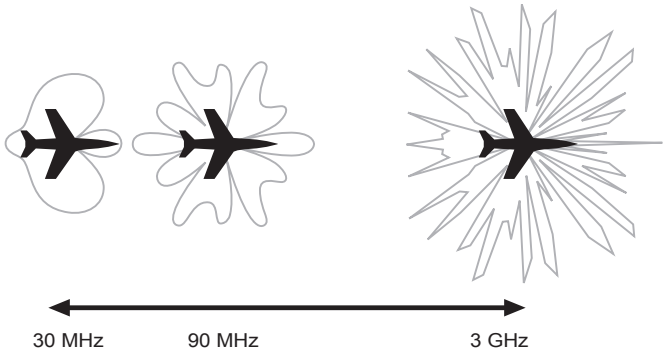
En avvägning måste alltså göras utifrån önskad räckvidd och möjlig antennstorlek hos radarn. I en flygburen radartillämpning, eller kanske när radarn skall monteras som målsökare i en robot, måste korta våglängder väljas för att antennen skall kunna få plats i flyg- eller robotkroppen utan att antennloben skall bli för bred och därmed upplösningen för dålig. Nackdelen blir att räckvidden blir begränsad då den kortvågiga radarsignalen kommer att dämpas relativt mycket i atmosfären (speciellt vid dåligt väder).

2.3.4 Radarmålarea och smygteknik

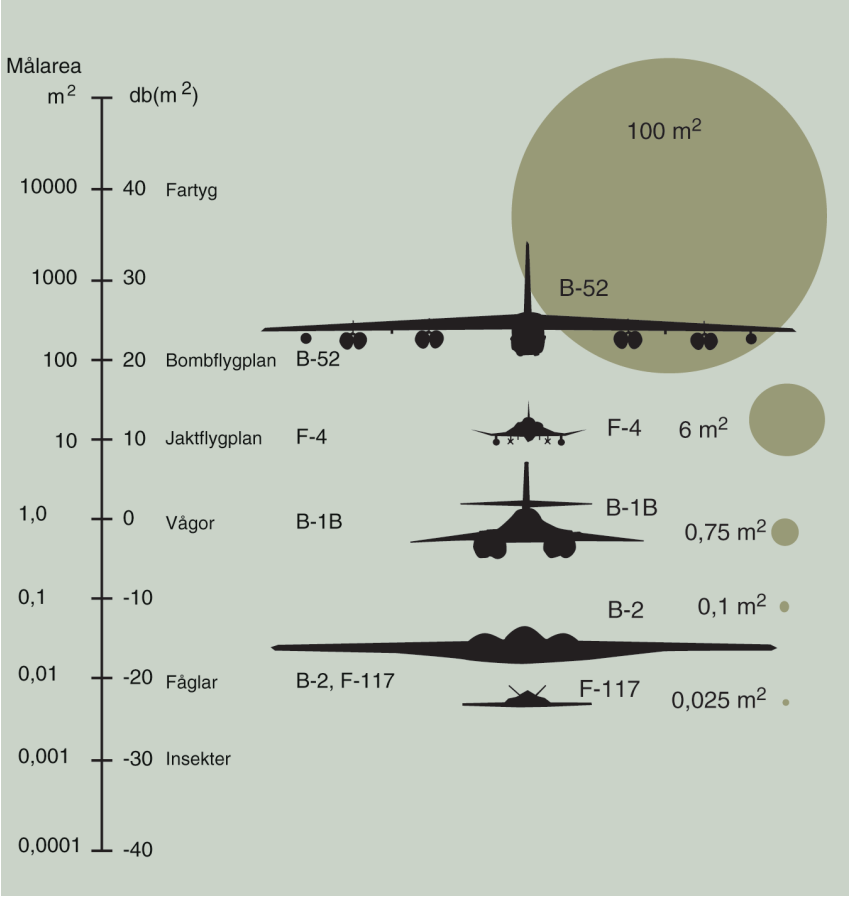
Något som påverkar på vilket avstånd en radar kan upptäcka ett mål är givetvis hur stort målet är och därigenom hur mycket energi (eko) som det reflekterar tillbaka till radarn. Hur mycket energi ett mål reflekterar kallas ekvivalent radarmålarea (RMA). Den kan variera kraftigt för samma mål beroende av från vilket håll målet belyses och vilken frekvens radarn använder (se figur 14).

Om vi känner till hur en farkosts radarmålarea varierar från olika håll kan vi som användare i vissa situationer utnyttja detta och vända sidan med minst radarmålyta mot fienden för att minska hans förmåga till upptäckt.

När man talar om smygteknik (*stealth*) så är det radarmålarean som konstruktören försökt att minska för att försvåra för en radar att upptäcka målet.



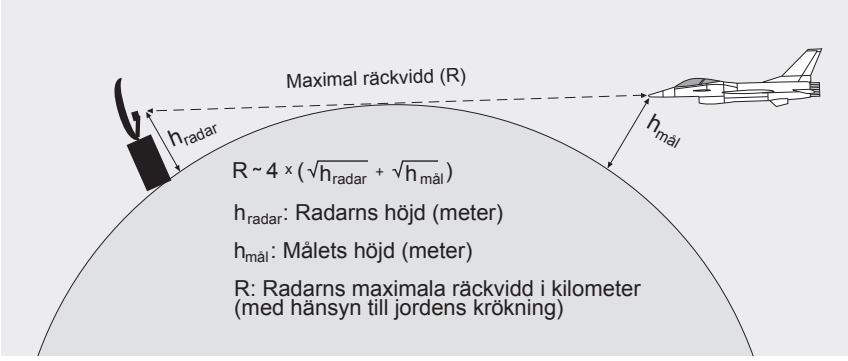
Figur 14. Radarmålytans variation hos ett flygplan beroende av från vilket håll radarn belyser det och vilken sändfrekvens radarn har. (Källa: FOI)



Figur 15. Jämförelse mellan olika flygplans ekvivalenta radarmålareor. Observera att detta endast är ungefärliga värden som varierar mycket beroende på vinkel och radarfrekvens. (Källa: FM)

En smyganpassad farkost blir dock aldrig helt osynlig för radar, dock kan upptäcktsavståndet minska kraftigt. För att upptäcktsavståndet för en radar skall nedgå till hälften räcker det dock inte att minska radarmålarean till hälften, utan den måste minskas 16 ggr.

Att kraftigt minska radarmålarean hos en farkost är inte lätt (och inte billigt) och kräver ofta kraftfulla kompromisser där man får göra avkall på andra egenskaper (t.ex. flygegenskaper, lastförmåga, pris m.m.). För en fullt smyganpassad farkost vill konstruktören inte bara göra den svårupptäckt för radar utan även för andra typer av sensorer som IR-kameror, akustiska sensorer osv.



Figur 16. Beräkning av radarns maximala räckvidd med avseende på jordens krökning och den radarhorisont som uppkommer därav. Observera att radarns räckvidd kan vara avsevärt kortare pga. andra parametrar, t.ex. terränghinder, än vad radarhorisonten medger. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)

Det finns två huvudprinciper för att minska radarmålarean hos en farkost:

- *Geometrisk utformning.* Genom att bygga farkosten så att om den belyses med radar från vissa riktningar, reflekteras inte radarenergin tillbaka till radarn utan bort i en annan riktning. Härigenom kommer mycket lite energi (eko) tillbaka till radarn, vilket gör farkosten svår att detektera. Det går dock inte att konstruera farkosten så att den på detta sätt blir smyganpassad från alla vinklar, utan man måste prioritera de bedömt farligaste riktningarna och konstruera farkosten utifrån dessa. För att inte förstöra smyganpassningen måste dessutom vapen och annan last hängas inuti flygkroppen, vilket innebär begränsningar.
- *Radarabsorberande ytmaterial.* Genom att klä farkosten med någon typ av material, som istället för att reflektera energin från den belysande radarn absorberar den större delen av energin. Detta material absorberar olika mycket beroende på vilken frekvens den belysande radarn använder, vilket innebär att farkosten måste konstrueras för att vara svårupptäckt för en viss typ av radar och inte för alla förekommande radartyper.

Läs mer om smygteknik i volym nr. 5, *Plattformsteknik*, i denna bokserie.

2.3.5 Radarhorisont

För att en radar skall kunna upptäcka ett mål, får det normalt inte ligga bortom horisonten för radarn. Som figur 16 visar så beror radarhorisontens avstånd på radarns höjd samt målets höjd.

Radarhorisonten kan vidare variera beroende på luftens fuktighet, tryck och temperatur, vilket kan medföra kortare eller längre radarräckvidd än normalt.

2.4 Specialfunktioner

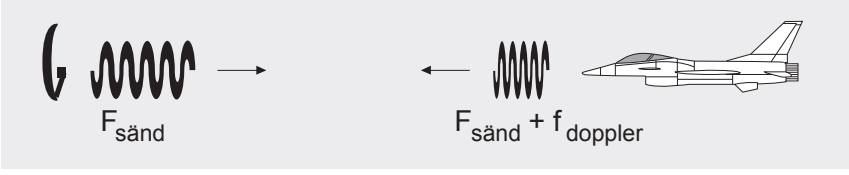
För att en radar skall kunna lösa sin uppgift trots att kraven står i motsatsförhållande till varandra eller att man vill utnyttja något fysikaliskt fenomen, krävs ibland att någon form av specialfunktion införs i radarn. Nedan beskrivs några av de vanligaste.

2.4.1 Pulsdoppler och hastighetsmätning

I många radarapplikationer är det av största intresse att skilja ut rörliga mål från ickerörliga. Grunden för att lyckas är att vi nyttjar ett fenomen som kallas dopplereffekten. Det är en frekvensförskjutning som uppkommer då en vågrörelse träffar ett rörligt objekt. I vårt fall handlar det om att vår elektromagnetiska våg (radarpulsen) träffar t.ex. ett flygplan. Då ekot reflekteras tillbaka till oss har frekvensen ändrats en aning (se figur 17). Alla ekon som härrör från rörliga mål kommer alltså ha en annan frekvens än den vi sände ut. Frekvensskillnaden är dessutom proportionell mot målets hastighet. Genom att filtrera bort alla ekon som har exakt samma frekvens som den vi sände ut kan vi således filtrera bort alla ekon från fasta mål. Detta kallas MTI eller *Moving Target Indication*.

Observera dock att dopplereffekten beror på målets rörelse mot eller från radarn. Om målet rör sig vinkelrätt mot radarn uppkommer ingen dopplerfrekvens och målet kan följaktligen sorteras bort i radarn. Detta går att nyttja taktiskt genom att man flyger i s.k. ”nolldoppler” för att inte bli upptäckt av radarn eller för att radarn skall tappa bort målet.

MTI-principen kan tyckas enkel, men är betydligt mer komplex i verkligheten om man tar in alla parametrar. En av svårigheterna är att frekvensskillnaden mellan utsänd radarsignal och mottaget eko är mycket liten, vilket komplicerar urskiljandet av de rörliga målen.



Figur 17. Ett eko från en vågrörelse som träffar ett rörligt mål kommer att ha en annan frekvens än den som sändes ut. Obs! Proportionerna är kraftigt överdrivna. Frekvensskillnaden är i själva verket mycket liten. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)

- Pulsdoppler

En mer avancerad variant av MTI-radar är den s.k. Pulsdoppler-radarn. Denna typ av radar finner man ofta i moderna flygburna tillämpningar där man endera är intresserad av att mäta målets hastighet, eller bara filtrera bort markekon trots att man själv rör sig. Det är dock mycket svårt att både mäta avstånd och hastighet på ett bra sätt med en radar. Därför arbetar en Pulsdoppler-radar ofta i tre olika moder:

- HPD (*High Pulse Doppler* = hög pulsrepetitionsfrekvens). Pga. extremt hög PRF kan denna mod inte mäta entydiga avstånd utan endast hastighet. Den ger dock mycket bra räckvidd mot luftmål, dvs. den kan detektera mål på långt håll men inte mäta avståndet till dem.
- MPD (*Medium Pulse Doppler* = medelhög pulsrepetitionsfrekvens). Kan mäta avstånd till luftmål men ej höga hastigheter. Ger ej samma räckvidd mot luftmål som HPD.
- LPD (*Low Pulse Doppler* = låg pulsrepetitionsfrekvens). Används framför allt mot rörliga markmål. Denna mod kan inte mäta hastighet utan bara filtrera bort fasta ekon.

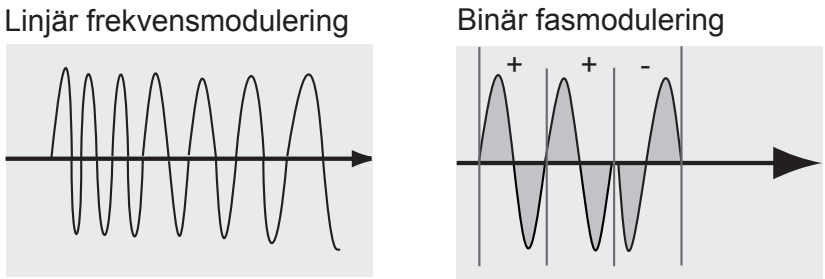
2.4.2 Helikopterdetektering

För att kunna detektera hovrande helikoptrar i en MTI-radar krävs någon form av specialfunktion som ofta kallas helikopterkanal. En MTI-radar filtrerar ju bort stillastående ekon och en hovrande helikopter ger inte upphov till någon dopplerfrekvens då dess kropp står stilla. Däremot finns det givetvis andra delar av helikoptern som rör sig när den hovrar.

Det enklaste sättet att detektera en hovrande helikopter är att leta efter det mycket speciella eko som rotornavet ger upphov till. Rotornavet går dock att smyganpassa genom att klä in det och därigenom minska dess radareko. För att undkomma detta problem går det också att inrikta sig på att detektera ekot från rotorbladen, även om detta kräver en något mer komplicerad lösning.

2.4.3 Pulskompression eller pulskod

Som tidigare konstaterats påverkar pulslängden både avståndsupplösningen och pulsenergin (och därmed räckvidden). En lång puls ger dålig avståndsupplösning men lång räckvidd, och vice versa. För att slippa kompromissa alltför mycket mellan avståndsupplösning och räckvidd används något som kallas pulskompression eller pulskodning. Genom att modulera sändpulsen ges



Figur 18. Skillnader i moduleringsprincip mellan linjär frekvensmodulering och binär fasmodulering. (Källa: FHS)

radarn möjlighet att inte bara känna av när hela pulsen kommer tillbaka, utan även vilken del av pulsen som kommer tillbaka, och när den gör det. Därigenom kan även en lång puls ge god avståndsupplösning. Två olika sätt används för att göra pulskompressionen (se figur 18):

- Linjär frekvensmodulering
- Binär fasmodulering

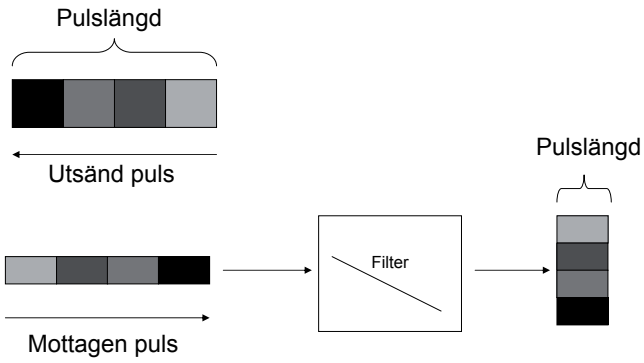
Vid *linjär frekvensmodulering* varieras sändfrekvensen inom pulsen. Vid *binär fasmodulering* vänds fasen 180° på ett antal ställen inom pulsen. Genom vändningen kodas signalen så att den innehåller ett antal plus och minus, en kod. Genom båda moduleringsprinciperna kan en lång, energirik sändpuls ändå ge god avståndsupplösning då radarekot ”avkodas” när det kommer tillbaka till radarn.

Genom att nyttja pulskompression, där pulsen delas upp i ett antal subpulser, så kan alltså toppeffekten hos radarn hållas relativt låg med god avståndsupplösning. Detta är också en fördel för att undvika upptäckt av signalspaning, då hög toppeffekt är en vanlig orsak till att en radar upptäcks. Se figur 19 för principbild på pulskompression. Avståndsupplösningen blir vid pulskompression halva subpulslängden.

2.5 Radartillämpningar

2.5.1 Spaningsradar

En spaningsradars prioriterade egenskaper har traditionellt varit räckvidd och yttäckning på bekostnad av upplösning. För att kunna ha en stor yttäckning



Figur 19. Principskiss för pulskompression. Pulsen som radarn sänder ut är uppdelad i ett antal subpulser som radarn avkodar med hjälp av ett filter. Pulsen delas upp och subpulserna stackas på varandra. På så sätt får man bra avståndsupplösning kombinerat med bra räckvidd. (Källa: FHS)

och samtidigt inte få en alltför långsam uppdateringshastighet, har de flesta spaningsradarer saknat upplösning i höjdled, dvs. saknat möjlighet att ge höjdinformation samt avgöra om det är frågan om ett eller flera mål separerade i höjd. Detta kan ses rätt tydligt på de flesta spaningsradarantenner då de är smala i höjdled men breda i sidled, vilket ger en antennlob som i sidled är smal (= god upplösning) men i höjdled mycket hög (= dålig eller ingen upplösning). Även avståndsupplösningen blir vanligtvis relativt dålig då långa pulser måste användas för att pulsen skall innehålla tillräckligt med energi.

För att nå den önskade långa räckvidden används också ofta långa våglängder (= låg atmosfärsdämpning) vilket i sin tur innebär att antennen ofta är relativt stor hos en spaningsradar.

2.5.2 Följeradar

Med följeradar eller eldledningsradar avser vi en radar som har förmåga att inledningsvis söka (vanligtvis inom ett begränsat område) efter ett mål, därefter låsa på det och noggrant mäta in dess position både avseende riktning och avstånd.

Hos eldledningsradar har upplösning och noggrannhet generellt prioriterats för att kunna styra ett vapensystem mot ett mål. Härav har man gjort avkall på räckvidd/yttäckning. Ett komplett vapensystem har därför vanligtvis bestått av en spaningsradar som sökt av stora volymer. Upptäckta mål har sedan invisats till en eldledningsradar som styrt vapensystemet under slutfasen av bekämpningsförloppet.

En följeradar måste ha upplösning i tre dimensioner: höjdvinkel, sidvinkel och avstånd. Höjdvinkel och sidvinkel löses genom en följeprincip i vinkel. I avståndsled används en annan princip, vilken kommer att beskrivas längre fram.

För att få en mycket god upplösning (och noggrannhet), känner vi till att en mycket smal antennlob måste användas. Trots att en mycket stor antenn i förhållande till våglängden används så blir antennloben inte tillräckligt smal för att ge tillräcklig vinkelupplösning för att använda för målinvisning för vapensystem. I stället måste andra åtgärder vidtas för att lösa detta problem. I stort kan man säga att det finns tre sätt att skapa tillräcklig vinkelupplösning och förmåga att följa mål:

- Konisk skanning (Lobnutation)
- Monopulsteknik
- Nyttjande av elektriskt styrd antenn

Hur man löser följningen i avstånd återkommer vi till.

- Konisk skanning

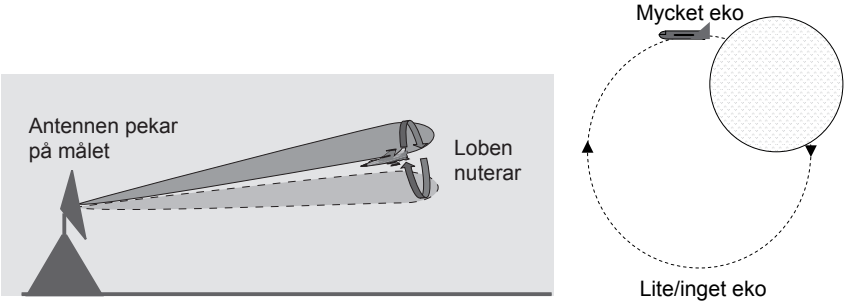
Denna princip innebär att man på något sätt låter antennloben rotera och bilda en kon enligt figur 20. Genom att kontinuerligt mäta hur mycket eko som fås tillbaka från de olika riktningarna i helixrörelsen (vispande rörelsen) kan man lätt ta reda på var målet är, eftersom målet finns i den riktning det starkaste ekot fås. Antennloben riktas då (fortfarande under en helixrörelse) mot den riktning varifrån den får det starkaste ekot. Slutligen kommer antennloben att riktas mot målet (och loben roterar runt målet). Då fås nästan lika stort eko från samtliga riktningar och radarn vet att den pekar rakt mot målet.

Detta är den första och sannolikt enklaste formen av följeradar. En stor nackdel med den är dock att den ur ett telekrighänseende är mycket lätt att störa och därför används den ej i moderna radarer.

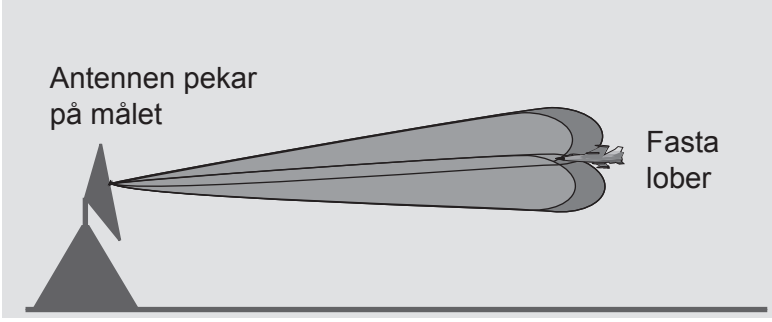
- Monopulsprincip

Ett annat, och modernare, sätt att realisera följeradar är att använda monopulsprincipen. Istället för att som i konisk skanning använda en roterande antennlob så används istället flera fasta simultana antennlober som är vinklade i förhållande till varandra (se figur 21).

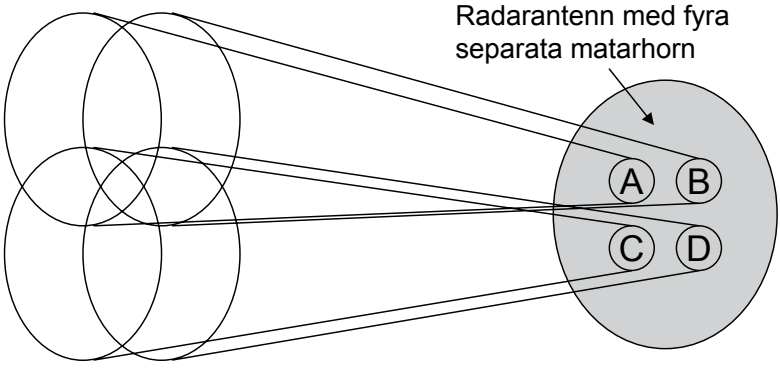
Genom att placera matarhornen i fyrkant, där radarsignalen sänds ut och tas emot (se figur 22), skapas dessa lober med hjälp av antennreflektorn. Hos



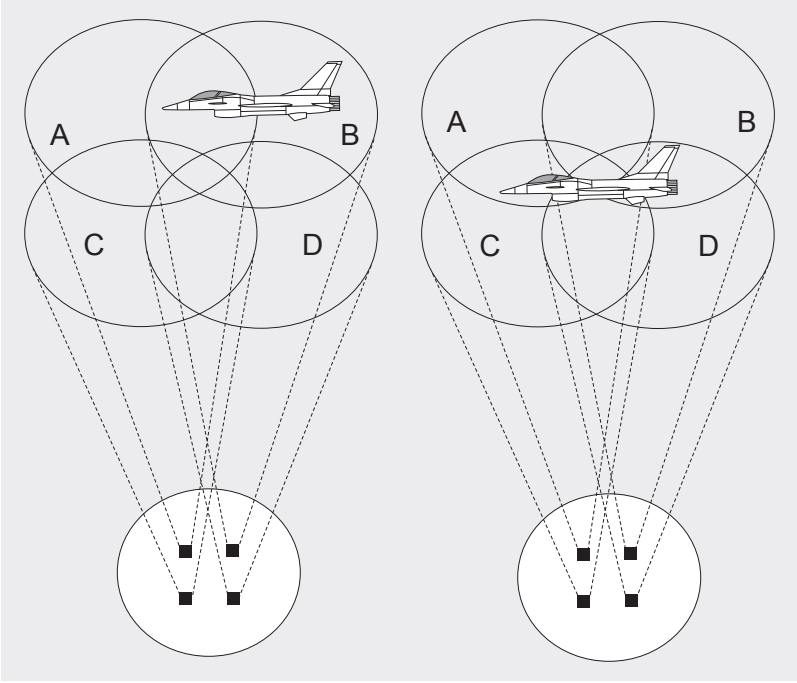
Figur 20. Funktionsprincip för lobnuterande radar. (Källa: FM och FHS)



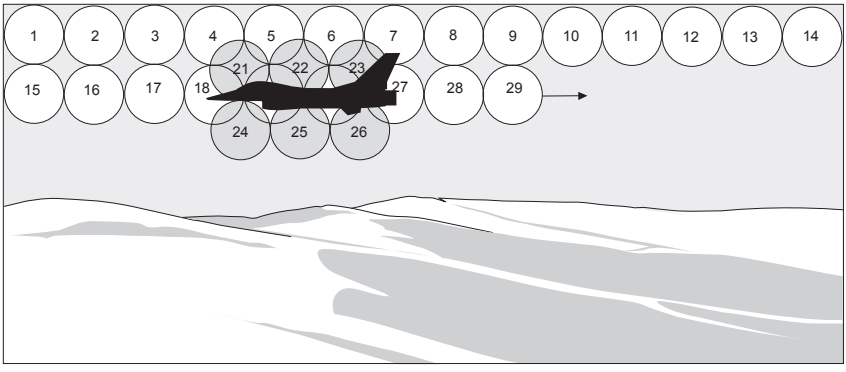
Figur 21. Funktionsprincipen för en monopulsradar. (Källa: FM)



Figur 22. Sändmönster (och mottagarmönster) för en monopulsradar. Vid sidvinkelfel (radarn pekar ej rakt mot målet) skiljer sig ekostyrkan sig åt mellan loberna A och B respektive C och D. Vid höjdvinkelfel skiljer sig ekostyrkan mellan loberna A och C respektive B och D. Då radarn pekar rakt mot målet är ekostyrkan lika i de fyra loberna A, B, C och D. (Källa: FHS)



Figur 23. Exempel på funktionen hos en monopulsradar. I vänstra exemplet pekar inte radarn rakt mot målet. Ekostyrkan kommer att vara större i B än i A, samt i B än i D. Radarn räknar då ut att den måste vrida sig i höjdled och i sidled. I högra exemplet har detta skett och radarn pekar rakt mot målet. Ekostyrkan kommer att vara lika i de fyra loberna A, B, C och D. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)



Figur 24. Exempel på sökmönster för en radar med elektriskt styrd antenn och TWS-funktion (TWS – *Track While Scan*, följning under sökning). Om vi tänker oss rektangeln som det område som skall avsökas ser vi hur radarn börjar söka i övre vänstra hörnet och sedan söker radvis. När den får ett reflekterat eko lägger den fler pulser runt det upptäckta målet för att med bättre noggrannhet mäta in det. Under den fortsatta sökningen kan radarn gå tillbaka till upptäckta mål för att uppdatera deras läge. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)

en följeradar som skall ha möjligheten att följa ett mål i både höjdled och sidled, som t.ex. en luftvärnseldledningsradar eller en målsökare i en jaktrobot, används fyra lober (se figur 22). En robot som bara manövrerar i sidled, som t.ex. en sjömålsrobot, klarar sig dock med två lober.

Genom att mäta och jämföra ekostyrkan i de olika loberna kan radarn avgöra i vilken riktning målet finns (se figur 23). När sedan ekostyrkan är ungefär lika i alla lober vet radarn att den pekar rakt mot målet.

Fördelen med denna princip, framför konisk skanning, är bl.a. att den går att göra mycket svår att störa med elektroniska motmedel och är därmed ur ett telekrigsperspektiv en fördelaktigare konstruktion.

- Elektriskt styrd antenn

Många gånger kan det vara önskvärt att följa ett eller flera mål samtidigt som man söker efter nya (s.k. *Track While Scan*, TWS). Detta går att göra med en mekanisk antenn, men det går relativt långsamt att vrida antennen, vilket medför att uppdateringshastigheten blir lidande.

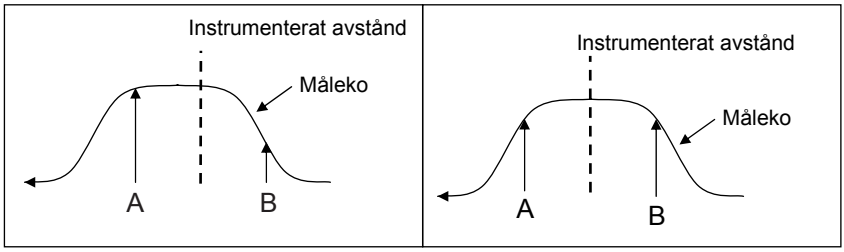
Ett annat sätt är dock att nyttja en s.k. elektriskt styrd antenn. Med en sådan kan antennloben flyttas (styras) elektriskt utan att själva antennen eller reflektorn behöver röras mekaniskt. En av fördelarna med detta är att det går att flytta antennloben avsevärt mycket snabbare, storleksordningen 1 000 ggr, än om antennen måste röras mekaniskt.

En yta kan avspanas genom att på elektrisk väg låta antennloben svepa över den. När eko fås från något objekt kan radarn lägga flera radarpulser runt det upptäckta målet och genom att jämföra ekostyrkan från de olika punkterna, ungefär enligt monopulsprincipen, räkna ut mer exakt var målet befinner sig (se figur 24). Vidare kan radarn snabbt hoppa tillbaka till ett tidigare belyst mål och uppdatera läget för att sedan hoppa tillbaka och fortsätta sökningen.

- Avståndsföljning

Oavsett vilken av de tre ovan beskrivna principerna för följning i vinkelled som används så måste även en form av avståndsföljning användas. Till skillnad från vinkelföljning så finns det här bara ett sätt att lösa det på.

Följeradarn bestämmer sig på något vis (informationen kan t.ex. komma från en spaningsradar) för vilket avstånd den tror att målet ligger på. Detta kallar vi vidare här för *instrumenterat avstånd*. M.h.t. detta avstånd beräknar radarn också när den tror att radarekot skall komma tillbaka. Radarn genomför sedan två mätningar av ekostyrkan; en strax före den beräknar att ekot skall komma tillbaka och en strax efter (ibland även kallad tidig och sen lucka).



Figur 25. Figurerna visar hur radarn genom att mäta ekostyrkan vid två tidpunkter (A och B) kan avgöra om dess antagna avstånd (instrumenterade avstånd) är rätt eller behöver justeras. (Källa: FHS)

I vänstra exemplet i figur 25 har radarn antagit ett felaktigt instrumenterat avstånd, nämligen för långt, dvs. målet ligger närmare än radarn tror. Detta upptäcker den då den jämför ekostyrkan i punkterna A och B. Då ekostyrkan är större i A än i B räknar radarn ut att ekot har kommit tillbaka tidigare än den beräknade, dvs. att målet är närmare, och justerar då det instrumenterade avståndet inför nästa sändpuls. Principen liknar monopuls, där man jämför två signaler.

I det högra exemplet har radarn beräknat rätt instrumenterat avstånd, och vi ser att ekostyrkan är lika i punkterna A och B. Radarn ”vet” då att den har rätt följning i avstånd. Detta förfarande upprepas varje sändpuls. Radarn strävar hela tiden efter att hålla rätt instrumenterat avstånd och därmed låsning på målet i avståndsled.

2.5.3 Millimetervågradar

En annan variant av radar värd att nämna är millimetervågradar. Egentligen är det inte en speciell typ av radar utan en vanlig radar som använder mycket höga frekvenser, dvs. våglängder i storleksordningen 1–10 mm. Givetvis blir atmosfärsdämpningen hög för dessa våglängder och därmed räckvidden relativt kort, men den stora vinsten är att en radar med små antenner kan få relativt smala antennlober och därmed bra upplösning. Millimetervågradar passar därför utmärkt i applikationer där utrymmet är begränsat, t.ex. i robotar.

Tack vare att vinkelupplösningen är så god i en millimetervågradar kan i bästa fall även en klassificering göras av upptäckta objekt.

Dopplerfrekvensen som uppstår vid eko från rörliga mål är proportionell mot målets hastighet och radarns frekvens. Detta innebär att millimetervågradarn med sin höga frekvens får mycket hög dopplerfrekvens från sina ekon jämfört med en konventionell radar som använder betydligt lägre frekvenser. Den höga dopplerfrekvensen gör att millimetervågradarn får ett större dopplerspektrum att analysera. Detta gör det möjligt att klassificera rörliga markmål, t.ex. att skilja hjulfordon från bandfordon, genom att analysera dopplerfrekvensen från dess eko.

2.5.4 Elektriskt styrd gruppantenn (ESA, AESA)

- Inledning

Fördelen med en elektriskt styrd antenn är att man kan skaffa sig full kontroll över antennens strålningsegenskaper och forma dem enligt eget behov i både tid och rum. Detta skapar möjligheter att optimera radarns prestanda för just de uppgifter som skall genomföras, vilket ger en taktisk/stridteknisk fördel.

Genom att antennloben kan flyttas så mycket snabbare elektriskt än med konventionell rotation, erhålls stora tidsvinster som medför att radarn kan nyttjas för fler uppgifter simultant (se figur 28), t.ex. att följa flera mål och styra robotar samtidigt. Beroende på vilket behov operatören har, kan en multifunktionssensor utföra flera uppgifter med en och samma apertur. Sensorn kan användas för att:

- Spana efter luftmål eller sjömål
- Följa ett eller flera mål
- Spana och följa långsamt flygande plattformar
- Varna för hot
- Störa
- Signalspana
- Styra missiler
- Avbildning
- Kommunikation
- IFF-funktion
- GMTI-funktion (*Ground Moving Target Indication*)

En förutsättning för att en elektriskt styrd antenn skall kunna utföra dessa uppgifter samtidigt är att lobens egenskaper kan formas enligt eget behov i både tid och rymd, vilket innebär att den måste ha många parallella sändar- och mottagarkanaler, diversifierad vågformning och avancerad signalbehandling.

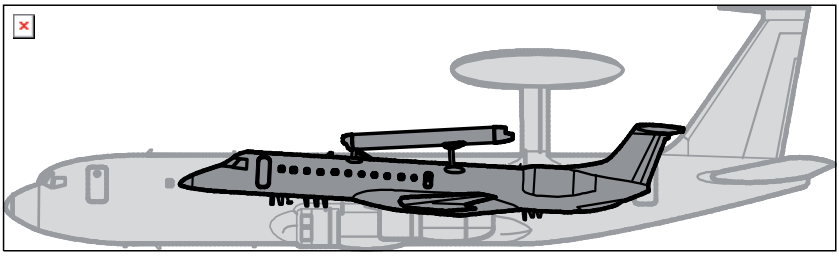
- Egenskaper hos elektriskt styrd antenn

De egenskaper som man vill skapa eller förbättra med en elektriskt styrd antenn (ESA) och med aktivt elektriskt styrd antenn (AESA) jämfört med en konventionell radar är:

- Ökad detekteringsprestanda av mål med liten radarmålarea
- Ökad störtålighet
- Ökad mätnoggrannhet
- Ökad multifunktionskapacitet
- Ökad förmåga till målklassificering

Det militära behov som driver tekniken framåt är, utöver förbättrade radarprestanda, att kunna nyttja antennen för flera uppgifter som signalspaning, telekrig och kommunikation (inklusive robotstyrning) för att på så sätt reducera antalet antenner och system på en plattform. Detta är särskilt intressant för små plattformar som exempelvis UAV. För att kunna åstadkomma en sådan multifunktion i en aktivt elektriskt styrd radar (AESA) krävs många parallella sändar- och mottagarkanaler, diversifierad vågformning och avancerad signalbehandling. Det pågår för närvarande utvecklingssatsningar inom detta område, där USA står för den största satsningen. Det finns också några europeiska länder som nationellt eller multinationellt satsar på denna utveckling, såsom Sverige, England, Tyskland, Italien och Frankrike.

I den här utvecklingssatsningen ligger, förutom att åstadkomma multifunktion och förbättrad radarprestanda, också en strävan att skapa konforma antenner, vilket innebär att antennen är en del av plattformsstrukturen. Konforma antenner har blivit militärt alltmer intressant i och med att obemannade farkoster har gjort sin entré på arenorna på allvar de senaste åren. De obemannade plattformarna är små, varför utrymme och vikt är viktiga parametrar. I luftfallet är luftmotstånd också en bidragande orsak till intresset kring att utveckla konforma antenner. Antennaperturen kan även delas upp så de får den lämpligaste placeringen på plattformen. Strävan ligger i att på sikt också åstadkomma konforma antenner som kan ta strukturlaster för att på så sätt ytterligare kunna reducera vikt.



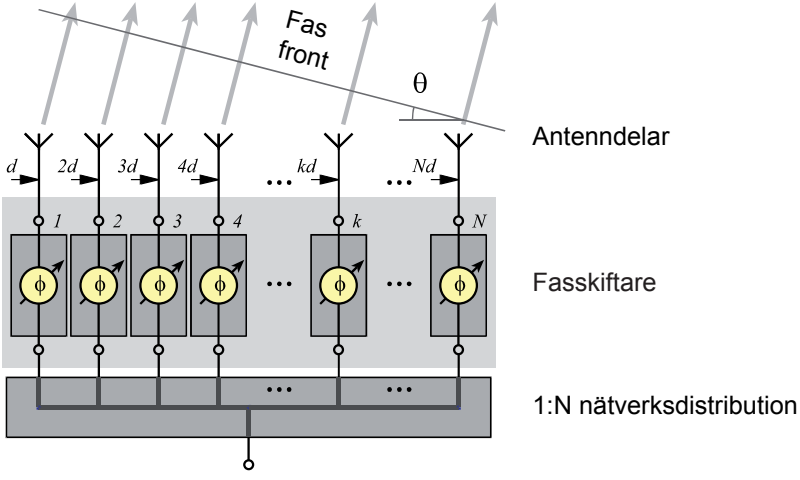
Figur 26. Storleksjämförelse mellan AWACS och grekiska flygvapnets *Early Warning System* som har en elektriskt styrd antenn. (Källa: Saab Microwave Systems)

Ett exempel på möjligheten att reducera storleken på radarbärare genom att utnyttja en elektriskt styrd antenn är Erieye, som kan placeras på en mindre plattform än en AWACS. Det skall dock noteras att uthålligheten och ”time-on station” är bättre för AWACS.

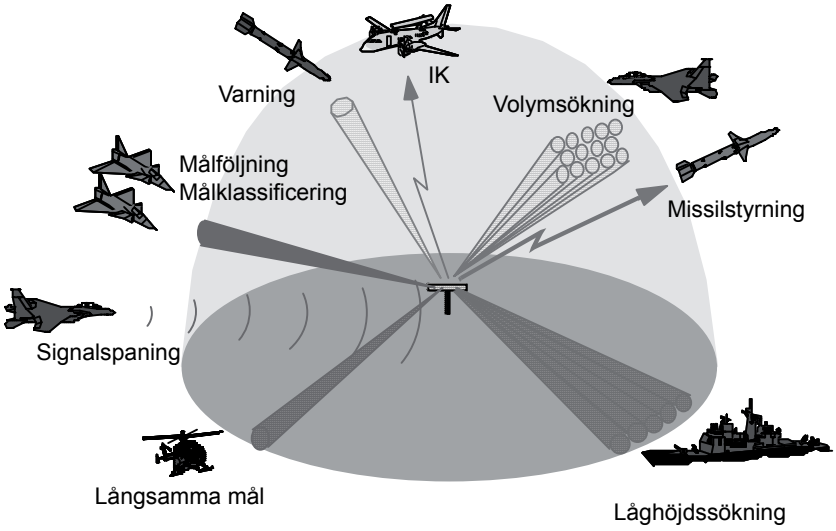
- Tekniska förutsättningar för en elektriskt styrd antenn

En elektriskt styrd antenn har ett stort antal små antennelement placerade i rad som utgör själva antennen. Genom att variera de utsända signalernas fasläge för varje antennelement, kan antennloben pekas i den riktning som önskas. Skillnaden i faslägen mellan antennelementen åstadkommer en interferens av vågorna i form av förstärkning och utsläckning av energin, och på så sätt blir energin riktad i den riktning som eftersträvas (se figur 27).

Genom att dela in antennen i olika funktionsmoduler skapar man multifunktionsförmåga för de funktioner som radarn skall ha. Vill man erhålla stora bandbredder gör man en så kallad aperturdelning, där olika delar av aperturen nyttjas för olika band, t.ex. en del mellan 2–8 Ghz och en annan del 8–16 GHz så att en total bandbredd som är större på så sätt kan erhållas. Det som begränsar vilka uppgifter som kan göras och när de kan genomföras är primärt två egenskaper. Dessa egenskaper är begränsning i apertur och hur mycket belastning som radarsystemet klarar av. Även en elektriskt styrd antenn är begränsad av den fysiska aperturen, så det krävs aperturdelning för att åstadkomma stora bandbredder. Vidare är finessen med en elektriskt styrd antenn att den är adaptiv, dvs.



Figur 27. Principen för faslägesskiftning i en ESA. (Källa: Saab Microwave Systems)



Figur 28. Exempel på olika uppgifter en multifunktionssensor kan lösa. (Källa: FOI)

att den själv uppdaterar mål m.m. enligt en viss logik. Radarns arbetslast kan bli för hög och då reducerar, degraderar, radarn sin verksamhet så att arbetslasten kommer i balans. Detta medför att det finns ett element av oförutsägbarhet i radarns uppträdande med denna typ av antenn. En elektriskt styrd antenn innebär däremot också ökad tillförlitlighet och reducerat underhållsbehov då mekaniskt rörliga delar och elektronrör ersätts av halvledarbaserade kretsar och många antennelement skapar redundans.

2.5.5 Syntetisk aperturradar (SAR)

Ett önskemål ur taktisk synvinkel är att finna en sensor som skulle kunna, med hög upplösning, spana efter markmål i alla väder. Om vi med vanlig radarteknik skall konstruera en sådan sensor ställs vi inför en rad problem:

- Hög upplösning på långa avstånd kräver extremt smal antennlob.
- Extremt smal antennlob kräver stor antenn och extremt kort våglängd, dvs. hög frekvens.
- Med extremt kort våglängd följer även hög atmosfärsdämpning, vilket i sin tur innebär kort räckvidd som ju motverkar det ursprungliga syftet.

Här kan vi konstatera att motsägelserna och problemen är för stora för att det skall vara praktiskt görligt att konstruera en sådan radar på traditionellt sätt. Alltså måste annan lösning sökas: Med syntetisk aperturradar skapas en konstgjord antenn, syntetisk apertur, genom att radarn tittar vinkelrätt i förhållande till flygriktningen och samlar på sig ekona och behandlar dessa senare (se figur 29 på nästa sida).

Genom att nyttja denna princip kan mycket god upplösning nås i vinkelled. Om detta dessutom kombineras med pulskompression kan även mycket god upplösning i avstånd uppnås. Detta innebär sammantaget att en SAR kan ta nästan fotolika bilder på långa avstånd, även i dåligt väder. Vidare kan man genom att använda SAR med en radar som sänder på låga frekvenser detektera mål som är dolda i vegetation och skog eftersom långvågiga radarpulser inte reflekteras av vegetationen utan tränger igenom och reflekteras av marken eller målen på marken. Tidiga SAR-konstruktioner var stora och tunga utrustningar men idag (2006) kan en SAR under 10 kg tillverkas.

En SAR kan vanligtvis arbeta i två olika moder (se figur 31 på nästa sida):

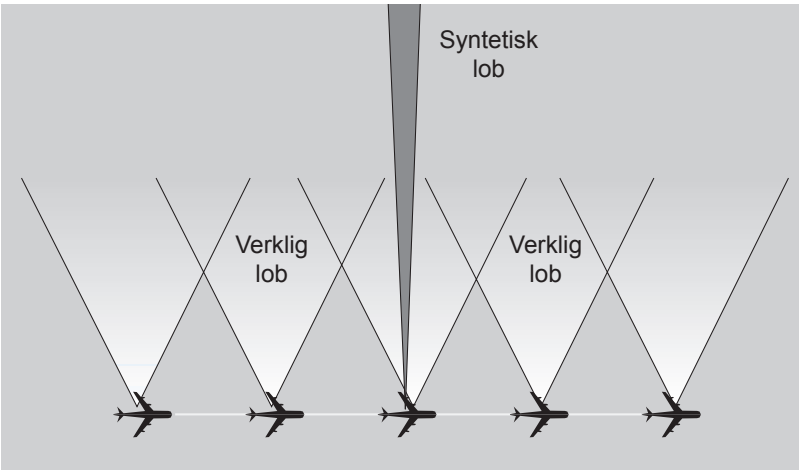
- *Strip Map mode.* Radarn söker av ett löpande område vinkelrätt ut från flygbanan.
- *Spotlight mode.* Radarn fokuserar på ett mindre område som belyses under tiden planet passerar.

Strip Map mode täcker en större yta medan *Spotlight mode* ger en bättre upplösning.

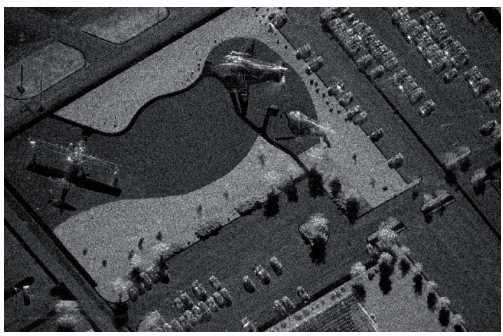
2.5.6 GMTI-radar

En radarfunktion som ofta kopplas samman med SAR men som egentligen nyttjar en annan princip är GMTI (*Ground Moving Target Indication*) – detektering av rörliga markmål. Genom att använda två olika antenner (eller dela upp en antenn i två delar) och jämföra dopplerskillnaderna som samma eko ger i de båda antennerna, kan radarn detektera mycket små rörelser från avlägsna mål. GMTI-funktionen täcker en stor yta men ger dålig upplösning av målen.

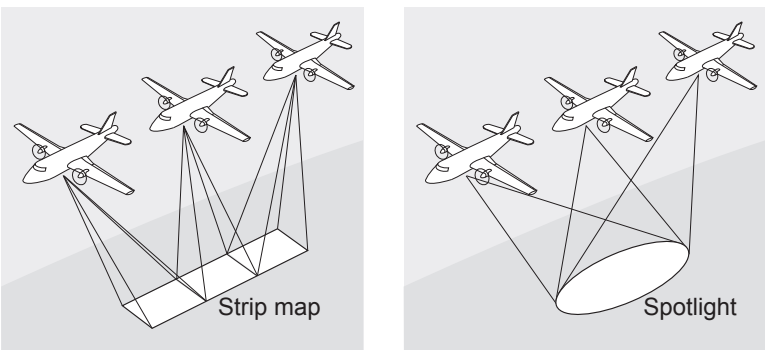
Genom att nyttja GMTI-mod hos en radar (ofta en SAR), kan en mycket stor yta avspanas för att detektera rörliga mål, oftast fordon. Intressanta mål kan därefter noggrannare klassificeras och kanske identifieras med annan typ av sensor som ger bättre upplösning.



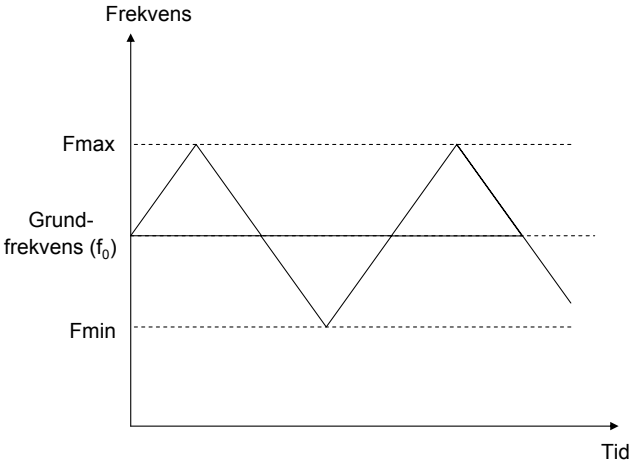
Figur 29. Figuren visar principen för en SAR. Notera att radarn inte ser längre än den verkliga loben, som bilden antyder, utan bara ger betydligt bättre upplösning. (Källa: FM)



Figur 30. SAR-bild tagen av en "mini-SAR" från Sandia National Laboratories, USA. Bilden är tagen från ca 3 km avstånd i *Spotlight mode*. Lägg märke till skuggorna som flygplanen och träden bildar. Skuggorna är oftast det på en SAR-bild som används för att klassificera objekt. (Källa: Sandia)



Figur 31. Skillnaden mellan *Strip Map mode* och *Spotlight mode*. *Strip Map mode* täcker en större yta men ger å andra sidan sämre upplösning än *Spotlight mode*. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)



Figur 32. Hos en frekvensmodulerad CW-radar (FMCW-radar) varierar den utsända frekvensen med tiden och medger därmed avståndsmätning. (Källa: FHS)

2.5.7 OTH-radar

Over the Horizon-radar (OTH) är en typ av radar som har möjlighet att se längre än vad radarhorisonten egentligen skulle medge. Detta klarar den genom att använda en i radarsammanhang mycket låg frekvens (3–30 MHz) som studsar i jonosfären och därmed når längre än en klassisk radar. Räckvidden blir extrem (300–3 000 km) men noggrannheten och upplösningen dålig. Denna typ av radar använder mycket stora antenner och är därför inte flyttbara.

2.5.8 CW-radar

Den vanligaste formen av radar är pulsradarn. Det finns också en annan typ av radar som inte sänder ut pulser, utan sänder ut energi kontinuerligt; denna kallas CW-radar (*Continous Wave*). En pulsradar mäter avstånd genom att ta tid från det att radarpulsen går iväg till det att pulsekot kommer tillbaka, men en CW-radar använder en annan princip för att mäta avstånd. Vanligtvis moduleras den utsända energin i frekvens (se figur 32), dvs. frekvensen varieras i lämpligt mönster för att radarn skall kunna veta hur lång tid som förflutit från sändning till eko. Denna typ av CW-radar kallas FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*).

En av fördelarna med CW-radarn är att då energi sänds ut kontinuerligt behöver inte toppeffekten vara hög, vilket i sin tur gör det svårare att med signalspaning upptäcka den. Det är också lättare att mäta doppleravvikelser hos

ekot och därmed hastighet hos målet eftersom radarn får ett kontinuerligt eko att arbeta med och mäta på. Eftersom radarn hela tiden sänder och tar emot måste dubbla antenner användas, en för sändning och en för mottagning.

Hos en frekvensmodulerad CW-radar (FMCW-radar) varierar den utsända frekvensen med tiden, vilket medför att radarn kan jämföra frekvensen i utsänd och mottagen signal, på så sätt mäta gångtiden och därmed avståndet.

2.5.9 Bi- och multistatisk radar

Radarn är en aktiv sensor, vilket innebär att den kan detekteras när den sänder och därigenom bli bekämpad. För att möta hotet om bekämpning kan sändare och mottagare separeras. Det ger en möjlighet att placera sändaren i ett tillbakadraget läge så att den är skyddad. Mottagaren, som är passiv och därmed inte röjer sig, kan placeras framskjutet för att ta emot radarekosignalen från sändaren. Finns det fler än en mottagare brukar man tala om multistatisk radar. Den framskjutna positionen hos en eller flera plattformar som passivt tar emot radarinformationen medför att bekämpning av mål kan genomföras tyst eller att egna system tänds upp precis vid skottögonblicket, vilket ökar träffsannolikhet och överlevnad.

Smygmålsteknik har som grundprincip att spegla bort radarstrålningen från en radar där bortspeglingen är optimerad mot en monostatisk radar, dvs. en radar som både sänder och tar emot signalen. Genom att utnyttja bi-statisk radarteknik där mottagaren är geografiskt skild från sändaren, kan mottagaren detektera den bortspeglade radarpulsen från sändaren och på så sätt upptäcka och låsa på målet. Ytterligare en fördel med bi- eller multistatisk radar är att den blir svårare att störa. En störsändare måste täcka en större yta för att täcka in var mottagarna kan befinna sig och får därigenom en kortare räckvidd.

Forskning och utveckling av bi- och multistatiska radarer pågår, men det finns nackdelar med tekniken såsom svårbemästrad mätgeometri, synkroniseringsproblematik med radarpulser och krav på tre fria siktsträckor, sändare-mål, mål-mottagare och sändare-mottagare. Detta har medfört att det ännu inte (2006), finns några operativa system.

2.5.10 Radarzonrör

Zonrör används ofta för att utlösa roboten på rätt ställe och därmed få verkan i målet. Utmärkande för en zonrörsradar är den korta räckvidden, vilket medger användande av låga effekter. Ofta används pulsradar med hög PRF och grindade mottagare. Olika moduleringsformer, t.ex. FMCW, brukar även nyttjas. Radarzonrör används mot luftmål och sjömål. Utvecklingen går mot närmare integrering av målsökare och zonrör för att ge bättre möjligheter att välja

träffpunkt i målet, eftersom huvuddelen av egenskaperna i både målsökare och zonrör numera ligger företrädesvis i mjukvaran.

2.6 Utvecklingstrender

Utvecklingen av elektriskt styrda antenner med multifunktionsegenskaper är tydlig och kommer att dominera utvecklingen av radarer framöver. De elektriskt styrda multifunktionsantennerna har genom sin utformning skapat möjligheter att konstruera konforma antenner som följer plattformens geometri. Nästa steg i utvecklingen är att de konforma antennerna även kan ta upp strukturlaster för att på så sätt kunna öka nyttolasten för små plattformar som exempelvis UAV:er. Det som är kostnadsdrivande vid konstruktion av en radar är hög toppeffekt, som inte bara ökar priset utan också kostnaderna för underhåll. Detta medför att utvecklingen på signalbehandling kommer att fortsätta eftersom den är relativt sätt billig, och utvecklingen kommer framför allt att ske inom pulskompressionsområdet för att åstadkomma långa pulser med låg uteffekt. Strävan är att nå en så låg uteffekt att signalen försvinner i bruset och därmed blir mycket svår att detektera för radarvarnare och signalspaningssensorer. Man talar ofta om LPD-radar (*Low Probability of Detection*).

Millimetervågsradar har fått ett ökat intresse inom den civila industrin som exempelvis utveckling av bilradar. Trots den relativt korta räckvidden pga. dämpningen i atmosfären så är denna typ av radar intressant då den smala antennloben trots liten antenn ger god upplösning. Kombineras den goda upplösningen med avancerad signalbehandling kan millimetervågsradarn inte bara detektera utan även i vissa fall klassificera ett mål. Högfrekventa radarer röner stort intresse avseende möjligheten att se igenom väggar. Sådana försök har genomförts som visat att principen fungerar. Denna typ av avbildande radar, som kan detektera dolda vapen eller sprängämnen, har många användningsområden kopplat till asymmetriska hot och strid i urban miljö.

Inom SAR-området pågår en utveckling av högupplösande SAR, som även skall kunna placeras i en satellit i rymden med möjlighet att klassificera och eventuellt identifiera mål. En SAR i rymden kommer att ge global täckning med hög noggrannhet.

3. Elektrooptiska sensorer

Elektrooptiska sensorer nyttjar på något sätt elektromagnetisk strålning. Den strålning de elektrooptiska sensorerna använder, kan antingen vara reflekterad strålning från andra strålningskällor eller emitterad strålning från objektet.

Våglängden hos den elektromagnetiska strålningen är av de våglängder vi i dagligt tal kallar ljus. Ljuset kan vara synligt för ögat (våglängder mellan 0,4 och 0,8 µm) eller osynligt för ögat såsom Ultraviolett ljus (0,2–0,4 µm) eller Infrarött ljus (0,8–12 µm). För synligt ljus är ögat en utmärkt sensor, men för osynligt ljus krävs givetvis någon annan form av sensor, t.ex. IR-kamera, för att vi skall kunna uppfatta det.

Ultravioletta	UV	0,05 - 0,40 mikrometer
Kortvåg	UV	0,20 - 0,29 mikrometer
Mellanvåg	UV	0,29 - 0,32 mikrometer
Långvåg	UV	0,32 - 0,40 mikrometer
Visuella	VIS	0,40 - 0,70 mikrometer
Infraröda	IR	0,70 - 14,0 mikrometer
Nära infraröda	NIR	0,70 - 2,0 mikrometer
Termiskt infraröda	TIR	2,0 - 14,0 mikrometer
Kortvåg	TIR	2,0 - 3,0 mikrometer
Mellanvåg	TIR	3,0 - 5,0 mikrometer
Långvåg	TIR	8,0 - 14,0 mikrometer

Figur 33. Olika våglängdsområden som nyttjas av elektrooptiska sensorer. (Källa: FHS)

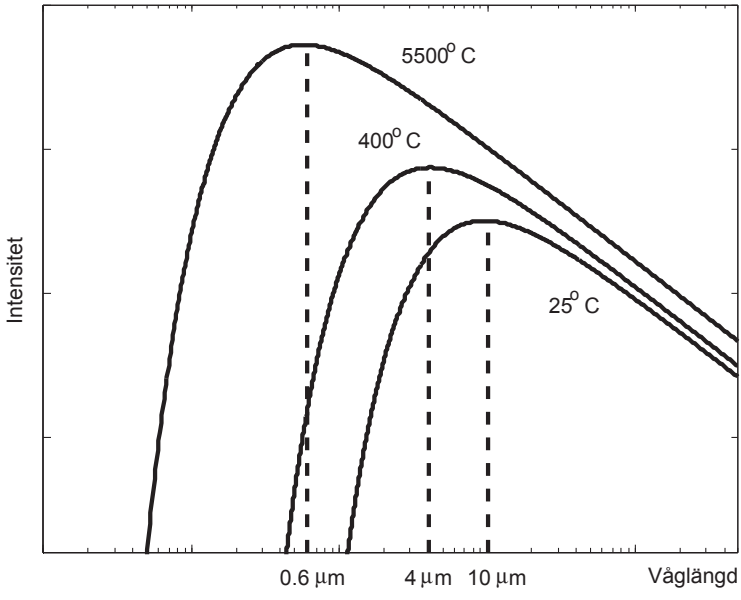
Generellt kan sägas att liksom en radar ökar dämpningen i atmosfären, framför allt vid dåligt väder, med minskande våglängd. En sensor som använder synligt ljus (0,4–0,8 µm) har betydligt kortare räckvidd än en IR-kamera som använder 8–12 µm. Vid vissa förhållanden, t.ex. dimma och rök, fungerar visuella sensorer (synligt ljus) inte alls medan en IR-kamera fortfarande har bra prestanda.

3.1 Emission

Alla kroppar, all materia som är varmare än absoluta nollpunkten, 0 grader Kelvin eller –273 grader Celsius, avger strålning. Ju varmare materialet är, desto mer effekt och kortare våglängd på strålningen.

I figur 34 framgår vid vilka våglängder olika varma kroppar har sin maximala strålningsintensitet. Där kan särskilt tre saker iakttas:

- Solens yta är ca 5 500 grader varm. Den strålar mest vid våglängden 0,6 µm, dvs. där det mänskliga ögat är känsligt.
- Flammor från raketmotorer håller en temperatur av 400 grader. De strålar mest kring 4 µm.
- Kroppar som håller rumstemperatur (ca 25 grader) strålar mest vid 10 µm.



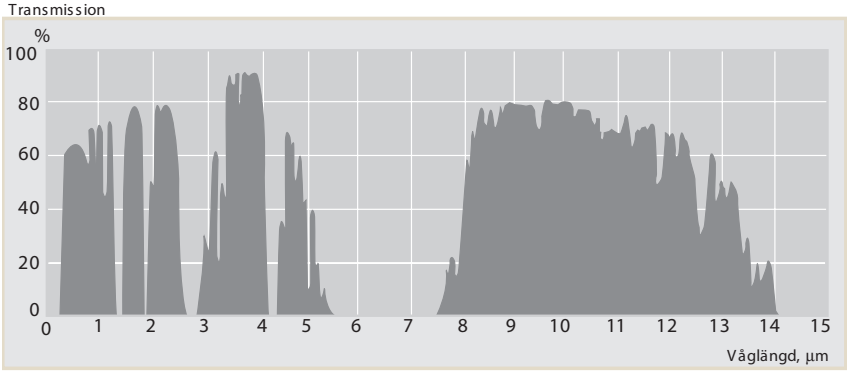
Figur 34. Strålningens våglängdsförskjutning beroende av temperaturen. (Källa: FHS)

Vidare när vi ser figur 35 kan vi särskilt lägga märke till tre saker:

- Mellan 0,2 och 1,4 µm finns ett s.k. atmosfärsfönster, dvs. ett område där atmosfären inte dämpar strålningen speciellt mycket.
- Ytterligare ett atmosfärsfönster ligger mellan 3 och 5 µm.
- Sista atmosfärsfönstret ligger mellan 8 och 12 µm.

Om vi lägger samman våra iakttagelser från figur 34 och 35 kan vi konstatera att tre stycken atmosfärsfönster existerar som svarar mot emissionen av kroppar med temperaturer på 5 500°, 400° samt 20° Celsius. Slutsatser vi kan dra av detta är:

- Om vi vill ha en detektor som är känslig för solstrålning (ca 5 500° Celsius) skall denna vara känslig i området 0,4–0,8 µm. Vårt mänskliga öga är känsligt just i detta våglängdsområde, vilket gör det ypperligt som sensor att se objekt som reflekterar solljus (se avsnitt 3.2).
- Vill vi ha en detektor som ser t.ex. motorflammor (ca 400° Celsius), skall detektorn vara känslig i området 3–5 µm. IR-målsökare i jakt- och luftvärnsrobotar är ofta känsliga inom detta område.
- Önskar vi en sensor som skall kunna urskilja värmen från t.ex. människor och fordon (omkring rumstemperatur ca 25° Celsius), måste den följaktligen vara känslig i området 8–12 µm.



Figur 35. Atmosfärstransmissionen över ca 2 km vid marken i Sverige. Notera att vid sydligare breddgrader gör den ökade luftfuktigheten att dämpningen vid 8–12 µm ökar. (Källa: FM)

3.2 Reflektion

Många elektrooptiska sensorer nyttjar även reflekterad strålning från andra strålkällor (främst solen). Alla objekt reflekterar strålning. Reflektion kan ske på två vis. Endera sker en spegelreflektion, dvs. om strålningen träffar en blank yta är utfallsvinkeln lika med infallsvinkeln. Vanligare är dock diffus reflektion som sker från matta ytor. Det vi ser dagligen med ögat är vanligen diffus reflektion från föremål runt omkring oss. Graden av reflektion i olika riktningar är dock beroende av objektets form och yta. Exempel på sensorer som nyttjar reflekterad strålning är ögat, bildförstärkare och tv-kameror.

3.3 Infraröda sensorer

IR används ofta något slarvigt för att beskriva en typ av sensor. IR är i själva verket bara en benämning på ett våglängdsområde som ligger strax utanför det som ögat är känsligt för (och som vi i dagligt tal kallar synligt ljus). Pga. de omständigheter som beskrivs i avsnitt 3.1, då atmosfärsfönstren är avgörande för att erhålla militär nytta med IR, används i huvudsak tre olika våglängdsområden inom IR-området:

- NIR (*Near InfraRed*): 0,8–2 µm
- MWIR (*Mid Wave InfraRed*): 3–5 µm
- LWIR (*Long Wave InfraRed*): 8–12 µm

(Observera dock att definitionerna kan skilja sig åt, och att gränserna är något flytande.) En ofta förekommande akronym är också TIR (termisk IR) som innefattar det våglängdsområde där emission är dominerande, dvs. ca 2–14 µm.

Inom IR-området arbetar en mängd olika sensorer med olika funktionsprinciper. Sensorer som arbetar i den övre delen av IR-området detekterar i huvudsak emitterad strålning från objekt. Denna strålning är beroende av objektets värme, och därför kallas dessa sensorer ibland lite slarvigt för värmekameror. Dessa värmedetekterande sensorer kan även vara konstruerade på olika sätt, beroende på användningsområden:

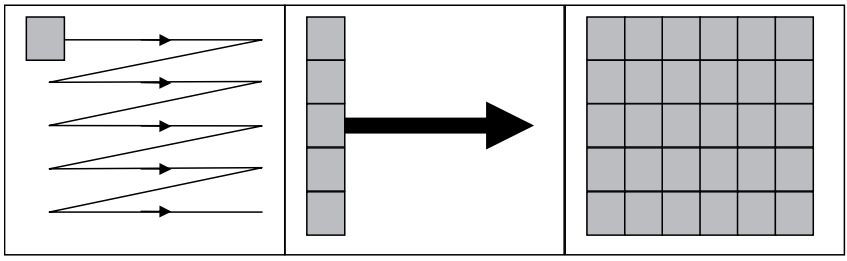
- FLIR (*Forward Looking InfraRed*) eller IRV (*InfraRed Vision*) är ett bildalstrande sensorsystem som känner av värmestrålningen från ett objekt och presenterar resultatet som en bild på en display på ett sådant sätt att man uppfattar det som en tv-bild. De har ofta en zoomfunktion som gör att synfält och upplösning kan varieras.

- IRST (*InfraRed Search and Track*) är en IR-sensor som man låter svepa varvet runt och leta efter mål som den sedan har förmåga att följa.
- IRLS (*InfraRed LineScanner*) är en äldre typ av IR-sensor som skannar av marken under ett flygplan i rörelse.
- IR-målsökare av äldre modell i t.ex. jaktrobotar och lv-robotar mot luftmål har en detektor som med hjälp av olika principer söker sig mot den varmaste punkten. Dessa är relativt lätta att störa med hjälp av varma facklor. Dagens moderna IR-målsökare är i princip en enklare FLIR. Bilden från denna används för att behålla låsningen på målet och är svårare att störa med facklor.

Själva detektorn som reagerar på den infallande IR-strålningen kan vara av olika typer:

- *Termiska detektorer*, s.k. bolometrar, som mäter den temperaturskillnad som den infallande strålningen ger upphov till. Dessa sensorer är oftast av enklare karaktär och därmed billigare. De är oftast okylda och används i tillämpningar där vikt och pris prioriteras framför spetsprestanda. Exempel på system där termiska detektorer används är handburna system på soldat- eller gruppnivå.
- *Fotondetektorer* (eller kvantdetektorer) som mäter det infallande ljuset med hjälp av halvledare. Energin i det infallande ljuset påverkar den elektriska ledningsförmågan i detektormaterialet och på så vis kan den infallande strålningen mätas. Fotondetektorer är betydligt snabbare än termiska, men är beroende av kylning för att nå optimala prestanda. Fotondetektorer används därför i lite tyngre och dyrare system där höga prestanda prioriteras framför vikt och pris. Exempel på användningsområden är sikten och dyrare kameror.

Att bygga detektorer som är känsliga för IR-strålning är, oavsett om termiska eller fotondetektorer avses, betydligt mer komplicerat och därmed dyrare än detektorer som reagerar på synligt ljus. Prestanda mellan individuella detektorelement varierade relativt mycket i tidigare system beroende på ofullkomligheter i tillverkningen, varför IR-kameror med en enda detektor eller en rad av detektorer, konstruerades och med hjälp av speglar och prismor sveptes över den yta som avsågs avspanas. Dessa speglar och prismor gjorde tidigare IR-system klumpiga och dyra att underhålla. På senare tid har man dock lyckats konstruera så kallade detektormosaiker, dvs. ett flertal detektorer på samma platta, vilket innebär att man inte längre behöver speglar och prismor för att avspana ett område. Dessa detektorer kallas bl.a. ”stirrande arrayer” (se figur 36).



Figur 36. Enstaka detektor, raddetektor och stirrande detektor. (Källa: FHS)

I och med att IR-sensorer detekterar emitterad strålning är de helt oberoende av yttre ljus. Snarare fungerar de bättre på natten då omgivningen är svalare och det därmed skapas större kontraster mellan varma mål och kall bakgrund.

TIR-sensorer är mindre känsliga för partiklar i luften och därmed dåligt väder än sensorer som arbetar med synligt ljus. Det kan inte påstås att de har allväderskapacitet, men de är i de allra flesta fall mindre känsliga för dåligt väder och t.ex. rök än sensorer inom det synliga området, tack vare att de ligger inom ett intervall med längre våglängder.

- Målsökare

Moderna IR-målsökare påminner till konstruktionen om en enkel FLIR. Med hjälp av bildbehandling av målsökarbilden styrs roboten mot målet. (Mer om målsökare finns i volym nr. 4, *Verkan och skydd*, i denna bokserie.)

Figur 37. Målsökaren i den Israeliska jaktroboten Python 5 har en stirrande IR-sensor med 128 x 128 upplösning. I kombination med effektiv bildbehandling är denna generation av robotar mycket svåra att störa med konventionella metoder såsom exempelvis facklor. (Källa: Rafael Industries)

3.3.1 Multispektrala och hyperspektrala IR-sensorer

När det gäller detektion av emitterad IR-strålning (oftast 3–5 eller 8–12 µm) räcker det för det mesta att mäta den totala strålningen inom våglängdsområdet för att uppnå acceptabla prestanda på sensorn. Ibland kan det dock vara fördelaktigt att mäta IR-strålningen inom en mängd smala våglängdsområden med en s.k. multispektral IR-sensor. Orsaken till detta är att olika objekt reflekterar olika mycket inom olika våglängdsområden, så genom att t.ex. mäta solens reflekterade IR-strålning från marken med hjälp av en satellit som har en multispektral IR-sensor kan man bestämma exakt hur marken ser ut, vilken typ av jord eller vegetation som finns var osv. Eftersom det som mäts är reflekterad solstrålning så ligger sensorernas känslighetsområde vanligen mellan 0,8–2 µm. Gränsen mellan multispektral och hyperspektral brukar anges som att en multispektral sensor mäter färre än 100 smala våglängdsområden medan hyperspektrala mäter fler än 100.

De första tillämpningarna för multi- och hyperspektrala sensorer var rent civila, men man kan lätt tänka sig militära tillämpningar som:

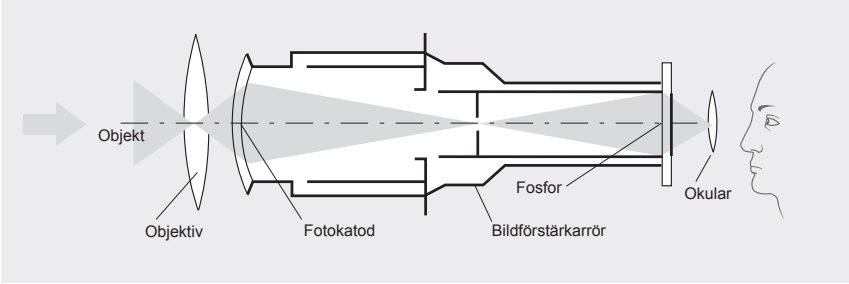
- Detektera föremål som är maskerade
- Detektera områden där minor eller improviserade bomber nyligen har grävts ned

3.4 Bildförstärkare

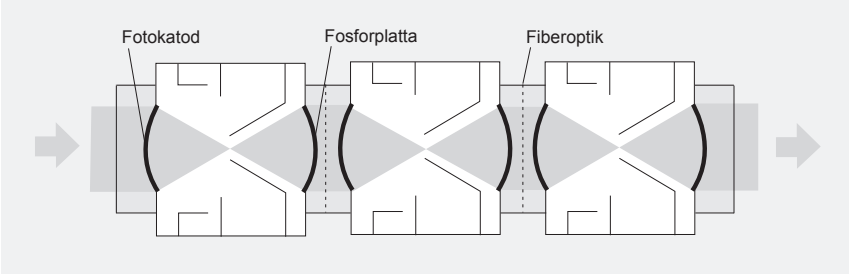
Ordet ”bildförstärkare” är en direkt översättning av engelskans *Image Intensifier*. I själva verket förstärker bildförstärkaren inte bilden utan snarare det befintliga ljuset. Bildförstärkare samlar in det befintliga reflekterade ljuset, förstärker det och projicerar det slutligen på en display i bildförstärkaren.

Till skillnad från IR-sensorer är bildförstärkaren beroende av att det finns någon form av yttre ljuskälla, t.ex. mån- och stjärnljus eller ströljus från omkringliggande bebyggelse. Vissa modeller har även en extra liten ljuskälla för att kunna användas i totalt mörker, t.ex. inomhus eller i grottor.

I figur 38 ses en principbild för bildförstärkare. Den består av ett objektiv som samlar in eller fokuserar ljuset på en fotokatod. Fotokatodens uppgift är att göra om det infallande ljuset till elektrisk ström (elektroner) som sedan förstärks i bildförstärkarröret. Efter bildförstärkarröret omvandlas elektronerna åter till ljus via fosforplattan. Tack vare att elektronerna förstärktes (till antal och/eller hastighet) i bildförstärkarröret åstadkoms en ljusförstärkning av storleksordningen 60 000 ggr. Efter att ljuset lämnat fosforplattan passerar det genom ett okular som anpassar ljuset till ögat.



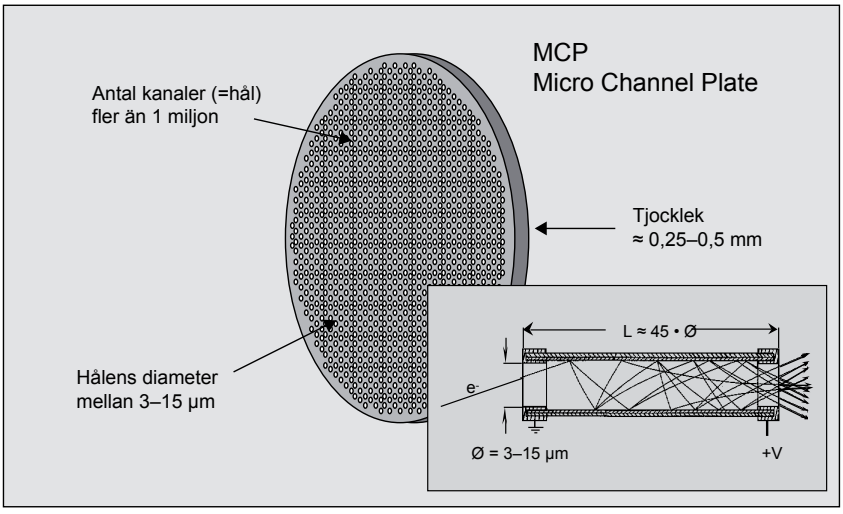
Figur 38. Principiell uppbyggnad av bildförstärkare. (Källa: FM, Illustration: Samuel Svärd)



Figur 39. Tre seriekopplade bildförstärkarrör i första generationens bildförstärkare.
(Källa: FM, Illustration: Samuel Svärd)

I tidiga bildförstärkare, generation 1 från 1960-talet, accelereras elektronerna i bildförstärkarröret genom spänningsskillnader. När elektronerna sedan i fosforplattan omvandlas till ljus uppnås en ljusförstärkning gentemot det infallande ljuset. Dock uppnås inte en tillräcklig ljusförstärkning med ett förstärkarrör, vilket innebär att flera bildförstärkarrör måste seriekopplas (se figur 39) för att uppnå tillräcklig ljusförstärkning. Detta innebar i sin tur att första generationens bildförstärkare blev stora och tunga, krävde mycket effekt i form av batterier samt fick relativt dåliga prestanda bl.a. pga. brus.

I andra, tredje och tredjeplus generationens bildförstärkare används en mikrokanalplatta för ljusförstärkningen. Som hörs på namnet är detta en platta med en mängd kanaler med mycket liten diameter (8–45 µm). Precis som i första generationens bildförstärkare, finns här en fotokatod som omvandlar det infallande ljuset till elektroner. Elektronerna leds sedan in i hålen i mikrokanalplattan. Där slår de loss flera elektroner från mikrokanalernas väggar (se figur 40) vilket innebär att en elektron i mikrokanalen genererar en stor mängd (tiotusentals) ut från mikrokanalen. Dessa träffar sedan fosforplattan och omvandlas därigenom till ljus. Med denna princip kan ljusförstärkning på 50 000–100 000 gånger uppnås med ett enda bildförstärkarrör. Detta innebär



Figur 40. Mikrokanalplattan som finns i bildförstärkare av generation 2–4. (Källa: FMV)

att generation 2–3+ kan göras betydligt mindre, lättare och strömsnålare än den första generationens bildförstärkare.

Beskrivning av generationernas karakteristik:

- *Generation 1:* Tunga, otympliga och strömkrävande. Ger grynig bild och är känsliga för starkt ljus.
- *Generation 2:* Betydligt mindre, lättare och mindre strömkrävande än generation 1. Fungerar bäst i månljus. Den har sämre vinkelupplösning än generation 1, men i övrigt generellt bättre prestanda.
- *Generation 3:* Ny fotokatod som är mer ljuskänslig än i generation 2, vilket ger generation 3 bättre prestanda i dåliga ljusförhållanden som t.ex. stjärnljus. Räckvidden vid dessa låga ljusnivåer är ca 50 % bättre än hos en motsvarande generation 2-bildförstärkare. Fortfarande är dock bildförstärkaren känslig för bländning från starka ljuskällor.
- *Generation 3+:* Bl.a. har förstärkningsreglering tillförts på bildförstärkarröret, vilket gör att bildförstärkaren inte längre riskerar att bländas ut av starka ljuskällor. Detta medger avsevärt mycket bättre möjlighet att nyttja den i urban miljö där ljuskällor riskerar att blända ut tidigare generationer av bildförstärkare.

De allra modernaste bildförstärkarna har god vinkelupplösning. Trots det går det inte att jämföra med ett obeväpnat ögas prestanda under goda ljusför-

hållanden då bildförstärkaren bl.a. inte överför färger. Dessutom är synfältet relativt smalt (ca 40°) vilket innebär att det perifera seendet, som är en viktig del för att skapa omvärldsuppfattning, uteblir. Detta innebär i sin tur stora begränsningar för användandet även då vinkelupplösningen rakt fram är relativt god. Problemet är så stort att man i vissa fall (i dagsläget främst flygtillämpningar) konstruerat bildförstärkare med fyra bildförstärkarrör i syfte att bredda synfältet. Givetvis innebär detta såväl vikt- som prisökningar.

Det finns många varianter av bildförstärkare beroende på dess användningsområden. Det som är dyrt på en bildförstärkare är framför allt själva bildförstärkarröret. Det innebär att där stereoseende inte är ett absolut krav används ofta bara ett bildförstärkarrör istället för två.

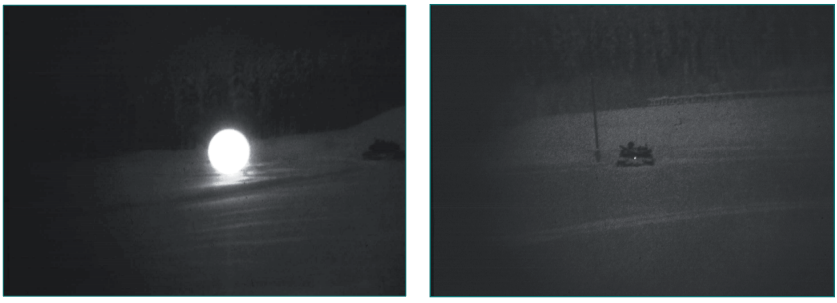
Det är inte helt självklart hur bildförstärkaren skall nyttjas. För fotsoldaten som framrycker eller patrullerar i mörker finns det en mängd saker att ta hänsyn till. Om en NVG (*Night Vision Goggles*) som täcker båda ögonen används, tar det lång tid att få tillbaka mörkerseendet när NVG väl tas av. Ett annat alternativ är att använda en s.k. *monogoggle* över ena ögat och låta det andra ögat anpassa sig till mörkret. Det har dock visat sig att detta förfarande är ansträngande för ögonen och hjärnan och att vissa människor inte kan använda denna metod överhuvudtaget. Ytterligare alternativ är att ha en lös *monogoggle* eller ett vapensikte, i huvudsak nyttja ögonens mörkerseende och bara använda bildförstärkaren ibland. Vilken metod som används beror givetvis på tillgänglig utrustning och situationen i övrigt.

Sammanfattningsvis kan konstateras att en bildförstärkare har en stor fördel när det är mörkt och bilden som presenteras är lättolkad för den mänskliga hjärnan, då den är lik det vi ser i dagsljus. Men inte ens en välövad soldat, utrustad med en modern bildförstärkare, kan utföra samma arbete som under fullt dagsljus.

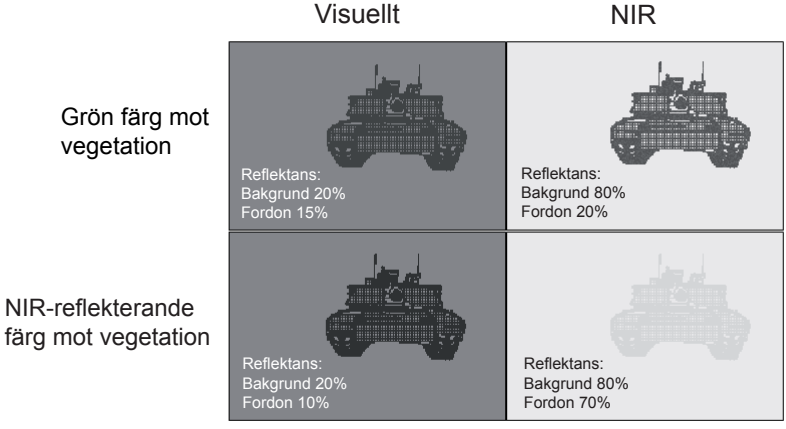
3.5 Mörkeranpassning

Har man kunskap om hur en bildförstärkare fungerar kan man givetvis också anpassa sig för att undgå upptäckt av en motståndare som är utrustad med en sådan utrustning. Då bildförstärkaren förstärker befintligt ljus gäller det, för att undgå upptäckt, att avge så lite ljus som möjligt inom dess känslighetsområde. Även ljus som för ögat är knappt märkbart kan för bildförstärkaren vara mycket tydligt (se figur 41).

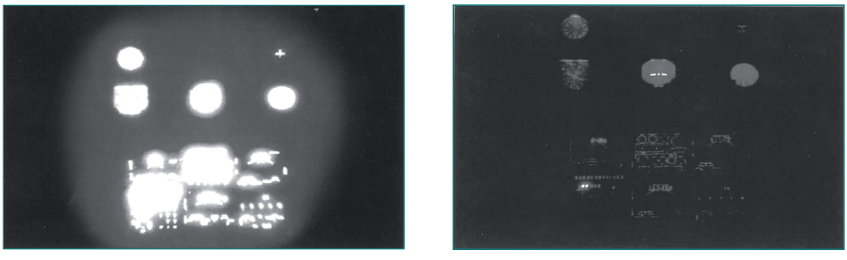
En annan aspekt på mörkeranpassning av materiel är vilken egenskap färgen den är målad med har. I den övre delen av bildförstärkarens känslighetsområde (NIR-området) är reflektansen från växtlighet helt olika än den är i det synliga området. Som framgår av figur 42 blir kontrasten mellan vanlig färg och vegetation mycket stor i NIR-området. Detta innebär att materiel måste



Figur 41. En stridsvagn före och efter en ur signatursynvinkel lyckad mörkeranpassning, betraktad med bildförstärkare från 70 m avstånd. (Källa: FMV)



Figur 42. Olika reflektans på fordon och vegetation inom olika våglängdsområden (NIR-området och visuella området). (Källa: FMV)



Figur 43. Instrumentpanelen i en helikopter sedd genom bildförstärkare. I det vänstra exemplet bländar instrumentbelysningen NVG-utrustningen och omöjliggör flygande. I det högra exemplet har en framgångsrik NVG-anpassning av instrumentbelysningen gjorts. (Källa: FMV)

målas i en speciell IR-reflekterande färg för att inte kontrasten mot växtlighet i NIR-området skall bli så stor att den lätt upptäcks med bildförstärkare.

3.5.1 Anpassning av förarutrymmen för NVG-användning

Många gånger kan det vara önskvärt att kunna framföra fordon med NVG under mörker. Ett problem som då ofta uppstår (om inte farkosten från början är anpassad för det) är att NVG-utrustningen lätt blir bländad av instrumentbelysningen (se figur 43).

För att möjliggöra flygning med NVG anpassas instrumentbelysningen så att den bara strålar i den nedre delen av det visuella området (blått), och på NVG sätts ett filter vilket gör den okänslig för just det våglängdsområdet. Härigenom kan piloten med sina bara ögon (genom att titta under NVG) se instrumentbelysningen, och se genom NVG ut i mörka natten utan att bli bländad av belysningen.

3.6 Jämförelse NVG–IR

Vad är egentligen skillnaden mellan en bildförstärkare (NVG) och en IR-kamera (FLIR)? Egentligen är skillnaden inte så stor med tanke på att de båda är passiva och detekterar elektromagnetisk strålning. Samtidigt är skillnaderna stora med tanke på att en bildförstärkare detekterar reflekterat ljus och förstärker det, medan en IR-kamera detekterar emitterad egenstrålning från objekt. I boken förklaras det hur de fungerar, men här skall vi titta på vilka skillnader de olika funktionsprinciperna innebär. Tabellen på motstående sida är ett försök att visa på skillnader för användaren. Observera dock att den är något trubbig.

3.7 Lågljus-TV

Ofta kan ett behov finnas av ett TV-system med bättre mörkerprestanda. Dessa kallas med ett samlingsnamn för Lågljus-TV. Det finns många olika principer för detta, men gemensamt är att man på något sätt skapar en ljusstark TV-kamera och sedan överför bilden till en monitor eller spelar in den på något lagringsmedium. Sättet att skapa ljusstark kamera är flera; de har alla fördelar och nackdelar:

- Ökad slutartid, dvs. istället för att ta 25–50 bilder/s tar man endast ett par bilder i sekunden. I och med detta kan man öka slutartiden och på så sätt göra kameran mer ljuskänslig.
- Kombinera kameran med ett bildförstärkarrör.
- Göra själva detektorn (CCD-detektorn) mer ljuskänslig genom att tunna ut den eller belysa den bakifrån.

”Bildkvalitet”: Bra ○ Dålig ● Ingen ●

Omständighet/förmåga	IR	NVG	Anmärkning
Dag	○	Går ej	
Natt – månljus	○	○	
Natt – stjärnljus	○	●	
Natt – mulet	○	●●	
Totalt mörker (inom-hus eller grottor)	○	●	Totalt mörker kan hos NVG kompenseras med en aktiv IR-lampa. Detta medför givetvis dock ökad röjningsrisk.
Regn	●	○●	Förutom att dämpa IR-strålning kyler även regnet ner varma objekt och minskar där-med kontrasten mellan mål och bakgrund.
Rök	○	●	Vanlig rök dämpar knappt IR-strålning. Speciell IR-dämpande rök med stora partiklar dämpar dock kraftigt.
Damm	○●	●●	
Dimma	○●	●	Bildförstärkaren påverkas av dimma i samma utsträckning som visuell sikt.
Bärbart av fotsoldat	●	○	Högpresterande (kylda) IR-system är tunga. Ickekylda system går att få ner i vikt och storlek så de kan bäras i t.ex. hjälmmontage.
Kompatibelt med laserpekare	●	○	
Ser genom fönster, prismor och huvar	●	○	IR-strålningen dämpas helt ut av vanligt glas. Linser för IR-utrustningar består vanligtvis av germanium (som dämpar synligt ljus).
Tål stadsbelysning och annat ströljus	○	●●	Bildförstärkaren kan bländas kraftigt, även av mindre starka ljuskällor.
Klarar låg termisk kontrast	●●	○	

3.8 Aktiva elektrooptiska sensorer

En aktiv sensor detekterar den reflekterade strålningen från en egen belysare. Här består belysaren vanligen av en laser men fungerar i övrigt enligt samma princip som en radar. Tack vare att en laserstråle är betydligt smalare än vad en radarlob kan göras blir upplösningen betydligt bättre än hos en radar. Den goda upplösningen sker dock på bekostnad av yttäckningen. Dämpningen i atmosfären är även högre, vilket gör att en aktiv sensor baserad på laser generellt har kortare räckvidd än en radarsensor.

3.9 Ultravioletta sensorer

Ultravioletta eller UV-sensorer arbetar, som hörs på namnet, i den ultravioletta delen av det elektromagnetiska spektrat. Det ligger strax nedanför det synliga området, och ultraviolett ljus har en våglängd som är aningen kortare än synligt ljus. Det ur sensorsynvinkel intressantaste området inom UV-bandet är 220–280 nm (0,22–0,28 µm). Anledningen till detta är att tack vare ozonlagret dämpas solstrålningen inom detta våglängdsområde ut helt, dvs. området är helt mörkt (s.k. solblinda området). För att en kropp skall emittera egenstrålning inom detta område måste den dessutom vara mycket het, ca 1 700 grader eller varmare. Detta sammantaget innebär att det under ozonlagret finns mycket få strålningskällor inom det solblinda området, och de källor som finns är mycket heta; därav det militära intresset för området. Genom att använda sensorer som arbetar i det solblinda området finns alltså goda möjligheter att detektera t.ex. raketmotorflammor, explosioner, mynningsflammor m.m., med relativt liten risk för falsklarm, vilket ofta annars är fallet med t.ex. IR-sensorer.

En vanlig tillämpning för UV-sensorer är som robotskottsvarnare, dvs. en typ av varnare som skall varna och/eller sätta in motmedel, om plattformen den sitter på hotas av någon form av missil. En nackdel med UV-sensorn i detta fall är att den bara kan detektera den ankommande missilen så länge raketmotorn brinner. Därför kombineras ofta UV-sensorn med en IR-sensor för att kunna fortsätta följa missilen även efter det att motorn har brunnit ut.

3.10 Utvecklingstrender

NVG nyttjar reflekterad strålning och IR nyttjar emitterad strålning för att alstra bilder. Dessa system har både för- och nackdelar som om de kunde kombineras, en multisensor, skulle stärka fördelarna och reducera respektive nackdel. En tydlig utveckling är att tillverkare försöker fusionera de två sensorernas bilder digitalt pixel för pixel så att användaren får endast en bild men att den innehåller information från bägge sensorerna.

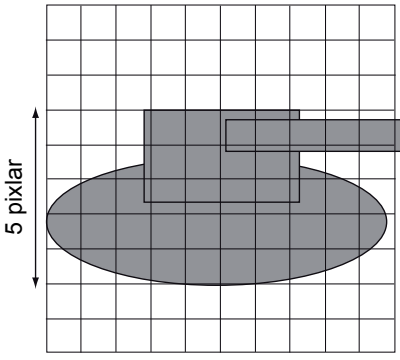
3.11 Upplösningsbegreppet

Upplösning definieras som förmågan att åtskilja två närbelägna objekt. Upplösning är ett vanligt förekommande begrepp i sensorsammanhang. Men vad innebär egentligen upplösning? När det gäller bildalstrande sensorer såsom kameror, IR-kameror m.m. så kan upplösning mycket förenklat sägas vara pixelstorleken på en TV, dataskärm eller ett vanligt foto. Om man säger att fotot har en meters upplösning så innebär det sålunda att varje pixel på fotot motsvarar storleken 1 x 1 meter. Figur 44 visar ett exempel på olika stor upplösning.

Men vad innebär upplösningsbegreppet i praktiken? Under 1950-talet genomfördes i USA undersökningar med ett stort antal försökspersoner för att utröna vilken upplösning som krävdes för att kunna upptäcka, klassificera och identifiera olika måltyper. Resultatet framgår av tabellen i figur 45. Observera att antalet behövda pixlar räknas efter objektets minsta dimension, dvs. oftast höjden.

Upplösning är givetvis också kopplat till avståndet till målet. Om man med en IR-kamera har 2 pixlar över målets minsta dimension (tillräckligt för upptäckt) på 5 km avstånd måste man ner till 600 meters avstånd till målet för att

Figur 44. Foto med olika upplösning över en parkeringsplats. (Källa: Sandia)



Måltyp	Antal pixlar över minsta dimension		
Vy från sidan	Upptäckt	Klassificering	Identifiering
Lastbil	1,8	9	16
Stridsvagn	1,5	7	12
Jeep	2,4	8,6	11

Figur 45. Figuren visar det antal pixlar som behövs för att med 50 % sannolikhet kunna upptäcka, klassificera och identifiera olika måltyper baserat på det sk Johnsonkriteriet. Stridsvagnen i exemplet ovan har i sin minsta dimension (höjden) 5 pixlar vilket enligt tabellen gott och väl räcker för upptäckt men ej klassificering. (Källa: FHS)

få 16 pixlar över målet (som krävs för identifiering). Alternativet till detta är att nyttja en optisk zoom med 8 gångers förstoring (som ökar antalet pixlar på målet från 2 till 16 st).

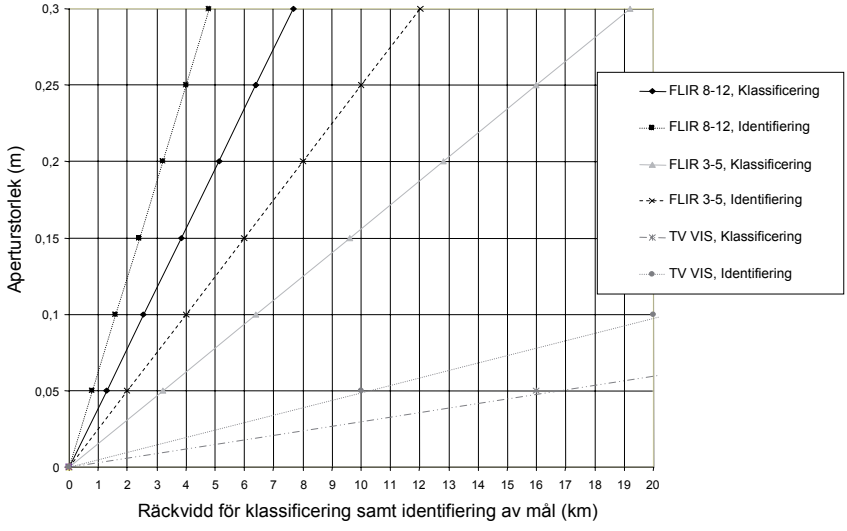
En annan faktor med stor påverkan på upptäckts-, klassificerings- och identifieringsavstånd är kontrasten mellan mål och bakgrund. En ökad kontrast minskar avstånden som behövs och vice versa.

3.12 Elektrooptiska systems prestanda

Genom att betrakta linsen eller utblicksfönstrets storlek hos ett elektrooptiskt system, t.ex. ett robotsikte, kan man beräkna dess ungefärliga prestanda vad avser räckvidd för klassificering och identifiering mot ett typmål (som t.ex. en stridsvagn).

Genom fasta optiska lagar sätter aperturens (optikens) storlek gränser för vilken maximal upplösning som kan uppnås. Genom att även veta vilken ungefärlig våglängd systemet nyttjar och vilket antal pixlar som behövs över ett mål för klassificering respektive identifiering (se 3.11), kan systemets ungefärliga prestanda räknas ut.

Grafen visar exempel på tre elektrooptiska systems ungefärliga räckvidder för klassificering respektive identifiering av ett stridsfordon (höjd ca 2,5 m).



Figur 46. Graf utvisande olika elektrooptiska systems ungefärliga prestanda. (Källa: FHS)

Exempel: Ett robotsikte som använder Termisk IR (8–12 µm) med en aperturstorlek om ca 20 cm (ett rimligt värde om systemet skall kunna bäras) kan identifiera en stridsvagn på ca 3,2 km avstånd.

Givetvis är det fler parametrar som påverkar ett EO-systems prestanda än bara aperturens storlek, men oftast är prestanda på olika parametrar i systemet matchat, vilket innebär att en god uppskattning av prestanda kan göras på detta sätt.

4. Akustiska och seismiska sensorer

4.1 Akustiska sensorer

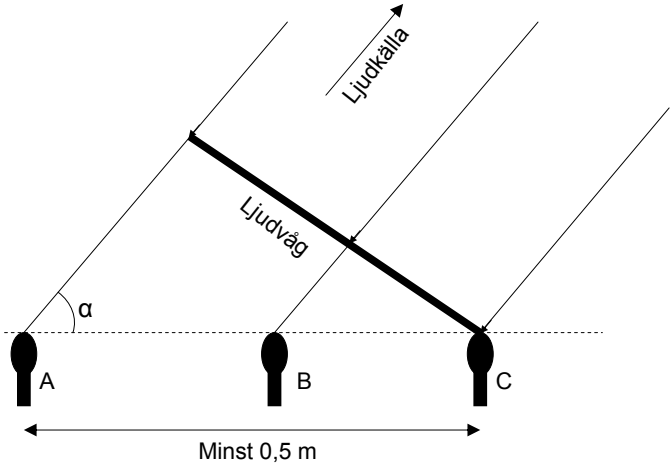
Akustiska sensorer har alltid spelat en roll i krigföring. Efter synen är hörseln det viktigaste sinnet för att kunna upptäcka och känna igen mål. Allt eftersom vapenräckvidder har ökat, har hörselns betydelse som sensor minskat. Många försök har dock gjorts för att med tekniska hjälpmedel åter kunna nyttja akustik som hjälpmedel i krigföring. Speciellt med digitalteknikens framsteg finns goda möjligheter att åter kunna nyttja akustik med god effekt i krigföringen.

För att med en antenn nå en god riktverkan (mindre än en grad) med en sensor, säger en grov tumregel att antennen skall vara 60 gånger större än våglängden. De frekvenser vi är intresserade av i dessa sammanhang ligger mellan 2 och 1 000 Hz vilket innebär våglängder mellan 30 cm och 170 m. En antenn som skulle vara 60 gånger större än våglängden skulle således bli mer än en kilometer lång, vilket givetvis blir praktiskt omöjligt.

Om man önskar avgöra riktningen till ett mål med en akustisk sensor får man istället bygga ett så kallat sensorkluster, dvs. en mängd sensorer (mikrofoner) som är utspridda efter ett mönster, ofta en linje (se figur 47). För att nå en acceptabel och användningsbar vinkelupplösning behöver dessa kluster vara i storleksordningen 0,5–4 meter långa.

Förutom att kunna avgöra riktningen till en ljudkälla kan en akustisk sensor i kombination med ett ljudbibliotek också klassificera eller identifiera ljudkällor. Genom att mäta t.ex. motorljud och annat ljud från fordon och sedan jämföra mot sitt ljudbibliotek, kan sensorn med relativt stor säkerhet fastställa typ av fordon och kanske även dess ungefärliga hastighet.

Den stora fördelen med akustiska sensorer är att de är helt ljusoberoende, samt att de är passiva. Därutöver är de relativt små och billiga.



Figur 47. Genom att mäta skillnaden för ljudvågens ankomsttid mellan mikrofonerna A, B och C kan vinkeln α (riktningen till ljudkällan) räknas ut. (Källa: FHS)

Nackdelar är deras förhållandevis korta räckvidd, under 10 km, samt att deras känslighet nedgår i bullriga miljöer såsom ofta är fallet på slagfältet. Starka vindar och annat väder påverkar också prestanda negativt. Då sensorerna detekterar ljud som fortplantar sig med 340 m/s, lämpar de sig inte för montering på snabba farkoster eller för detektion av andra snabba mål (snabbare än 150 m/s), vilket begränsar antalet intressanta tillämpningar.

4.2 Seismiska sensorer

Seismiska sensorer registrerar mekaniska vågor i framför allt marken, men är även användbar för tillämpningar under vattnet. I samband med den tekniska utvecklingen att kunna knyta ihop flera sensorer i ett nätverk, har seismiska sensorer blivit intressanta att använda på markarenan. Att övervaka en viktig punkt i geografin som t.ex. ett vägavsnitt är en tillämpning där seismiska sensorer tillsammans med akustiska kan användas och kopplas ihop i ett nätverk. Ett antal av sådana sensornätverk kan placeras ut i ett område och respektive nätverk kan kommunicera med en central som sammanställer informationen över området. Det som gör den seismiska sensorn intressant att använda är att den är passiv och kan bevaka området dygnet runt.

När föremål och människor rör sig skapar de vibrationer som fortplantas i marken, vilka detekteras av sensorn. Sensorn kan även lokalisera varifrån vibrationen kommer, men då krävs det fler än en sensor vilka är placerade på ett

sådant sätt att riktningsbestämning kan göras. Placeras sensorerna på en rad finns förutsättning för riktningsbestämning. I vissa fall är det också möjligt att klassificera målet. Klassificering kräver en mer komplex sensor, där någon form av signaturbibliotek finns för att jämföra vibrationsmönstret för just den typ av mark som sensorn befinner sig på.

Syftet med en seismisk sensor är att upptäcka vibrationer i marken. Detektorns uppgift är att urskilja om signalen endast är bakgrundsbrus eller om det är ett mål som ger upphov till signalen. Det är svårt att sätta tröskelvärden för detektering kontra falsklarm med seismiska sensorer. Ett sätt är att mäta energiinnehållet i signalen över en kortare och en längre period och sedan beräkna kvoten mellan de två mätningarna. Då kvoten blir hög, görs en detektion och systemet kan gå vidare för att göra en lokalisering av signalen. För att genomföra en noggrann lokalisering av en signal krävs minst tre sensorer med viss geografisk spridning. Antas vågen komma in som en plan våg kan en rad av sensorer beräkna infallsvinkeln. En rad av sensorer ger en bra noggrannhet vid övervakning av ett lokalt område.

Vid klassificering avgörs vilken typ av källa som gett upphov till detektionen. Vid klassificering av fordon jämförs den inkomna signalen med redan tidigare klassificerade signaler från kända källor inom samma område.

För övervakning av ett område kan olika typer av seismiska sensorer användas. För mindre områden som t.ex. ett vägavsnitt används geofoner och eller accelerometrar. Denna typ av sensorer är effektiva på korta avstånd och skapar en möjlighet till detektion, lokalisering och även klassificering.

Geofonen består av en massa som är upphängd i en fjäder omgiven av en spole. Vid vibrationer rör sig marken men massans rörelse kommer ske lite senare på grund av fjäderns tröghet. Den relativa rörelsen mellan massa och spole skapar en ström i spolen som är proportionell mot vibrationen. Geofonen kan placeras i marken var som helst och mäter markrörelsen uttryckt i hastighet.

En annan typ av sensor är en accelerometer vilken mäter hur marken rör sig uttryckt i markacceleration, dvs. hur mycket marken accelererar för en signal från t.ex. ett fordon. Oftast använder man en piezoelektrisk accelerometer. Vid markvibrationer trycks kristallen i accelerometern ihop och avger en ström. Strömmen är proportionell mot markaccelerationen.

5. Kemiska sensorer

Kemiska sensorer har betydelse inom militära och civila tillämpningar som t.ex. polis och tull. Militärt är utvecklingen av kemiska sensorsystem inriktad mot att bl.a. kunna hitta minor. Andra intressanta militära områden är möjligheten att kunna spåra sprängämnen och att kunna varna för kemiska stridsgaser.

En kemisk sensor detekterar selektivt en eller flera molekyler i t.ex. en gas eller gasblandning. Molekylerna ger upphov till en kemisk reaktion som påverkar en mätbar fysikalisk parameter i sensorn. Oftast används detektormaterial i sensorn där man kan mäta förändringar i ledningsförmågan eller där massförändringar detekteras, som i piezoelektriska material. Sensorn är i sin tur kopplad till någon typ av givare där den kemiska förändringen överförs till kvantitativ utsignal som t.ex. en elektrisk utsignal som kan omvandlas och signalbehandlas.

En undergrupp av kemiska sensorer är biosensorer, vilka är baserade på biologiska igenkänningselement. De har ofta god känslighet och selektivitet men har nackdelen att hållbarheten inte är så god då de består av enzymer och andra mikroorganismer som lätt dör om omgivningen inte är gynnsam.

För att få information om en lukt, vilken ofta består av många olika molekyler, används en uppsättning bestående av många olika sensorer. En elektronisk näsa har människans luktsinne som inspiration och är uppbyggd kring ett antal olika gaskänsliga sensorer som tillsammans kan skilja på olika lukter. En elektronisk näsa måste precis som människans näsa tränas till att känna igen olika lukter. När sensorerna kommer i kontakt med en gasblandning genereras ett speciellt signalmönster som lärs in och utgör facit nästa gång sensorn utsätts för samma lukt. Sammanfattningsvis kan det lite förenklat konstateras att kemiska sensorer behöver någon form av biblioteksliknande stöd för verksamheten.

6. Laser

6.1 Inledning

Den första fungerande lasern konstruerades i början av 60-talet. Teorin var känd sedan tidigare, bl.a. hade Einstein berört den, men man hade aldrig lyckats konstruera en laser.

En aktiv elektro-optisk sensor (EO-sensor) består av en sändare, vanligtvis en laser, och en mottagare som mäter den inkommande reflekterade energin från ett objekt. Principen är den samma som hos en radar fast med annan våglängd, dvs. man sänder ut en puls som reflekteras i målet och som tas emot i en mottagare. Genom att mäta pulsens gångtid får man ut avståndet.

Laserbaserade sensorer kan röja användaren, varför det är viktigt att minimera risken för upptäckt. Med olika metoder kan risken reduceras så att fördelen vid användandet av lasersystem klart överväger nackdelen och då särskilt under mörker. Initialt användes lasern primärt för avståndsmätning. Den tekniska utvecklingen medförde att den även började användas för målinvisning och ledstrålebelysning för robotar och glidbomber.

Det stora intresset som på senare tid uppstått för lasersystem är inte bara pga. att tekniken mognat, utan är också kopplat till utvecklingen av processorkraft för bl.a. signalbehandling, som idag även finns i mindre datorer. Detta har medfört att fler användningsområden för lasersystem som är intressanta för militär tillämpning har eller är på väg att realiseras. Ett exempel är laserradarn som med sin goda upplösning kan generera en tredimensionell bild. Ett annat exempel är navigering, styrning av UAV. Genom att utnyttja olika typer av lasermaterial och våglängdskonverterare kan stora delar av det optiska våglängdsområdet utnyttjas.

Lasersystem har ett antal intressanta förmågor vilka är svåra att uppnå med passiv teknik. De kan avbilda objekt med centimeterupplösning, och detektera under vatten, turbulens och genom vegetation med särskild teknik som tas upp i avsnitt 6.3. De är dock mindre lämpliga att utnyttja för övervakning av stora ytor då loben är smal och röjningsrisken alltid föreligger.

6.2 Skydd mot laser

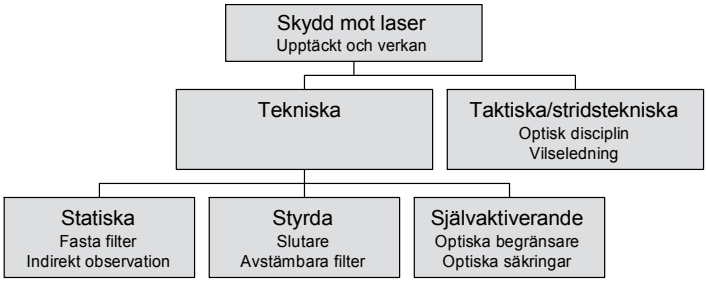
Behovet av att skydda sig mot laserstrålning är i första hand kopplat till motståndarens (fiendens) lasersystem. Egna lasersystem är lättare då man har kunskap om våglängd, energi m.m.; dessa berörs inte vidare i denna bok.

Det finns många olika metoder för att skydda sig mot laser. Ett strukturerat sätt att dela in dem är i tekniska respektive taktiska skydd (se figur 48).

Det tekniska skyddet delas in i statiska, styrda och självaktiverande skydd. Statiska skydd ändras inte över tiden som t.ex. fasta filter. Ett annat statiskt skydd är indirekt observation, t.ex. via TV, där skyddsegenskaperna låses vid konstruktionen.

Styrda skydd kan med en styrsignal ändra sina optiska egenskaper. Styrsignalen kan vara antingen manuell eller automatisk och aktiverar då en slutare eller ett avstämbart filter. Ett exempel på en automatisk styrning är en laservarnare som aktiverar en slutare eller ett avstämbart filter. Ett problem med styrda skydd är reaktionstiden. I militära tillämpningar används ofta lasersystem som har mycket korta pulser med hög energi. Följden blir att sensorn eller ögat hinner skadas innan det styrbara laserskyddet hinner reagera.

Självaktiverande skydd förändrar sina optiska egenskaper automatiskt utan påverkan från styrsignaler; det är det infallande laserljuset som aktiverar skyddet. Självaktiverande material är mycket komplexa (ickelinjära) och kan endast skydda mot skada, inte störning. Forskning pågår för att finna de material som klarar de högt ställda kraven. Det är inte känt om självaktiverande skydd används operativt idag.



Figur 48. Indelning av skydd mot laser. (Källa: FHS)

Taktiska skyddsmetoder är av mer klassisk natur; det gäller att först och främst inte bli upptäckt genom att ha god disciplin att inte exponera optisk utrustning. Vilseledning är också en gångbar taktik.

6.3 Tillämpningar

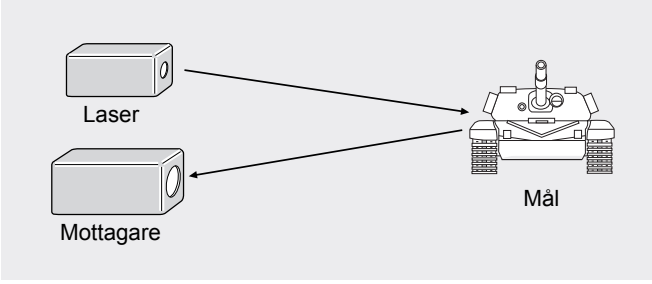
Områden som är av intresse för militära tillämpningar ökar ständigt, framför allt på taktisk och stridsteknisk nivå, allt eftersom lasersystemen blir mindre, effektivare och flexiblare, som t.ex. lasrar med avstämbar våglängd. Nedan presenteras ett antal militära användningsområden för laser:

- Målinmätning (avståndsmätning med laser)
- Laserradar
- Optikspaning
- Antisensorlaser
- Laserzonrör

6.3.1 Målinmätning

Som nämnts i inledningen, är en av det vanligaste militära användningsområdet för laser avståndsmätning. Avståndet mäts med en laser som ger ett snabbt och relativt sett noggrant värde. Avståndsmätningen används ofta för vapeninsats. Räckvidden för en laseravståndsmätare är ca 10–20 km. Laser är väderberoende, varför maximal räckvidd kan variera beroende på siktförhållanden.

Laseravståndsmätaren (se figur 49) fungerar ungefär som radar, dvs. en puls sänds ut, reflekteras i målet och tas emot i en mottagare. Genom att mäta pulsens gångtid, i analogi med radarprincipen (se figur 4), erhålls avståndet. En laser med direkt detektion, inkoherent laser, är lämplig att använda då systemet blir enkelt och billigt.



Figur 49. Principskiss av avståndsmätare. (Källa: FHS, Illustration: Samuel Svärd)

6.3.2 Laserradar

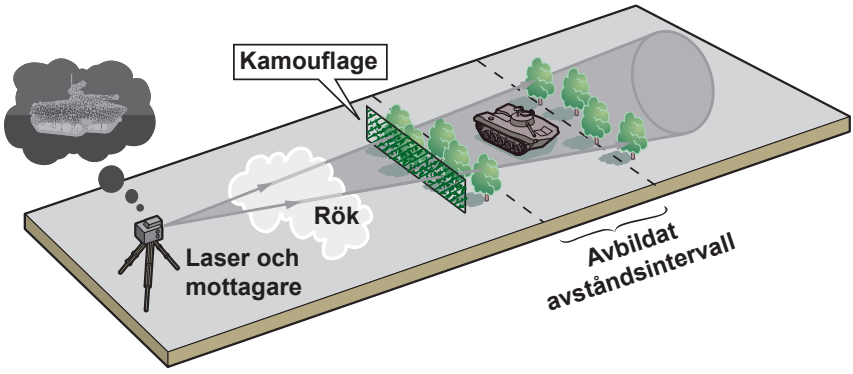
En laserradar har förmågan att mäta både avstånd och hastighet. För detta krävs att en koherent laser används. I princip fungerar en laserradar som en konventionell radar med skillnaden att den utnyttjar laserljus istället för radiovågor. Loben kan göras mycket smal tack vare den korta våglängden vilket ger en mycket god upplösning. En nackdel är att den korta våglängden medför att laserradarn blir mer väderberoende än en vanlig radar och även får kortare räckvidd pga. atmosfärsdämpningen.

En koherent laserradar har möjligheten att generera en tredimensionell bild. Genom att söka av, skanna, ett område eller föremål samtidigt som man registrerar avståndet för varje mätpunkt, kan en tredimensionell bild byggas upp.

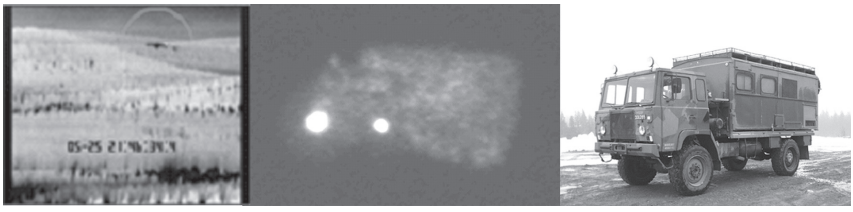
En intressant utveckling inom laserradarområdet är avståndsgrindad avbildning. Principen bygger på att synkronisera laserpulserna med en bildalstrande mottagare (se figur 50). Genom att variera tidsluckan som mottagaren tar emot laserpulserna från sändaren, kan ett avståndsintervall väljas för avbildning. Inom detta avståndsintervall framhävs objekt, medan de som ligger utanför intervallet undertrycks. Med denna metod förbättrar man systemets förmåga att se igenom rök, dis och dimma samt undertrycker bakgrundsklotter. Vidare kan man även se igenom vegetation och kamouflage med denna metod, förutsatt att tillräcklig laserenergi tränger igenom. Kombineras avståndsgrindad avbildning med IR-kamera vid spaning, kan man spana på stora avstånd och täcka relativt stora områden. IR-kameran detekterar en värmekälla och visar in lasern, som med sin kortare våglängd har en bättre upplösning. Laserradarsystemet ger också avståndet till objektet, vilket den passiva IR-kameran inte kan. Upplösningen och avståndsmätningen gör det möjligt att beräkna storleken på objektet (se figur 51).

6.3.3 Optikspanare

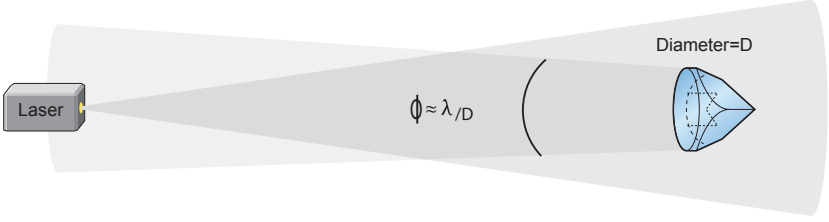
En variant av laserradar är optikspanare (se figur 52). När optiska system belyses med laserljus, reflekteras en del av ljuset i fronten på aperturen och en del också från inre delar av sensorn om lasern ligger inom transmissionsområdet för aperturen. Den retroreflex som uppstår från de inre delarna av sensorn reflekteras tillbaka i exakt samma riktning som den inkommande strålen. Detta medför att optiska sensorer kan upptäckas på långa avstånd. Eftersom retroreflexen är så stark kan stora ytor avspanas på kort tid med avstånd upp till några kilometer. Begränsas ytan som spanas av kan istället räckvidden utökas, upp mot tiotals km.



Figur 50. Principskiss av laserradar med avståndsgrindad avbildning. (Källa: FOI)



Figur 51. Kombinerad IR-kamera och avståndsgrindad avbildning. Fotot till vänster visar en IR-bild på en labbuss på 10 km. I mitten visas en bild med avståndsgrindad avbildning på samma buss och till höger ett foto av en labbuss. Det som framstår som lysande strålkastare i bilden i mitten är starka laserreflexer från de släckta strålkastarna. (Källa: FOI)



Figur 52. Principskiss av optikspanare. (Källa: FOI)

6.3.4 Antisensorlaser

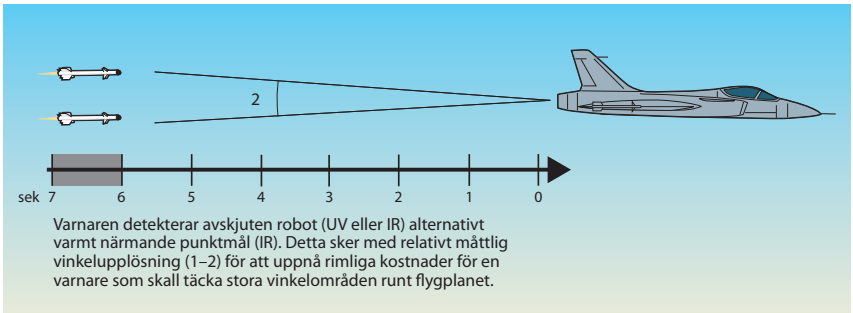
En antisensorlaser används för att störa, vilseleda eller blända hotsystem som skydd för olika plattformar. Antisensorlasern behöver oftast stöd från en annan sensor eller sensorsystem för invisning mot hotet. Ett antal olika system kan användas såsom IR-sensorer, UV-sensorer, laservarnare, laserradar (optikspanare), radar eller visuell spaning. Optikspanaren är särskilt intressant, då ett stort område snabbt kan spanas av och upptäckta mål mätas in med god noggrannhet. Kombineras/integreras antisensorlasern med optikspanaren kan verkan från antisensorlasern verifieras med optikspanaren. Sker detta iterativt kan störningen optimeras.

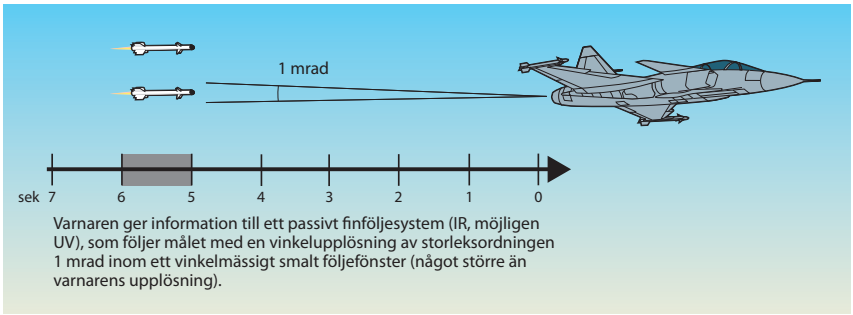
Ett antisensorlasersystem kan variera i storlek och komplexitet, från att vara handburet, fordonsburet, luftburet eller fartygsbaserat. Handburna system är enklare uppbyggda då de har kravet på sig att inte väga för mycket. Ofta försöker man kombinera olika funktioner som t.ex. spanings- och verkansfunktion. Integreras ett antisensorlasersystem i en plattform kan komplexiteten, effekten och funktionen utökas. Beroende på plattform kan behoven se olika ut. Ett fordonsmonterat system kan typiskt ha funktionerna spaning, verkan och klassificering av mål.

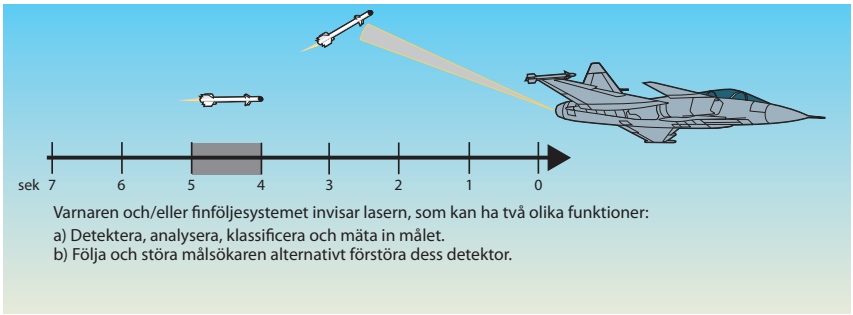
På flygande plattformar är det egenskyddet som är av primärt intresse. Ett väldokumenterat hot mot flygande plattformar är robotar med IR-målsökare; statistiken säger att upp emot 70 % av alla nedskjutna flygplan och helikoptrar sedan mitten av 1970-talet beror på IR-robotar. Anledningen till att IR-robotar betraktas som ett avsevärt hot är att de är passiva, relativt okomplicerade att använda och spridda i hela världen. Traditionellt har skyddet mot IR-robotar varit fackelfällning, vilket fungerar mot äldre robotsystem, men utvecklingen går mot målsökare som jämför flera våglängder och bildalstrande målsökare. Dessa typer av målsökare har förmågan att klassificera en fackla som ett skenmål och då välja bort den.

En antisensorlaser är verksam både mot traditionella retikelmålsökare, målsökare som jämför flera våglängder och bildalstrande målsökare. Internationellt läggs stora resurser på forskning och utveckling som är inriktad mot att få fram ett fungerande motverkanssystem grundat på en antisensorlaser för flygande plattformar. Den största utmaningen är små plattformar som belastar med höga g-krafter vid manövrar där mekaniska lösningar har svårt att klara kraven på följning med hög noggrannhet. Invisning av antisensorlasern kan ske antingen med ett UV- eller IR-system som kan registrera själva robotskottet eller den värme som roboten avger under brinnfasen i sin bana (se figur 53).

Fartygsbaserade antisensorlasersystem är inte begränsade av vikt och volym på samma sätt som luftburna system. En betydligt större uteffekt i antilasersystemet kan integreras i fartygets självskyddssystem. Antisensorlasern kan göras







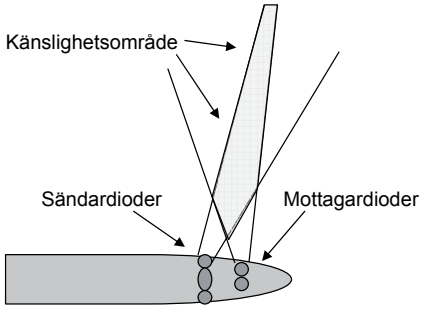
Figur 53. Principskiss av invisning av antisensorlaser. (Källa: FOI)

så kraftfull att den även har en förstörande verkan. Störning kan genomföras på räckvidder som motsvarar målföljarens låsningsräckvidd i en sjörobot. Detta medför att andra skyddsåtgärder kan genomföras parallellt, såsom undanmanöver och konventionell bekämpning. Man kan även, om det är lämpligt, lägga ut rök.

Sammanfattningsvis kan sägas att fördelarna med en antisensorlaser är att den går att rikta direkt, inte kräver någon framförhållning, möjliggör snabb målväxling och till låg kostnad per puls (skott). Nackdelarna är att målet hela tiden måste vara synligt, är väderberoende och att verkan på målet endast erhålls när lasern belyser det.

6.3.5 Laserzonrör

För att utlösa roboten på rätt ställe och därmed få verkan i målet används ofta ett zonrör, som kan bygga på olika sorters teknik beroende på måltyp. Laserzonrör har egenskaper som gör dem till ett intressant alternativ till radio- eller radarzonrör för vissa vapen, t.ex. robotar. Laserns sändnings- och mottagningslob kan göras smalare än radio- och radarzonrör. Detta gör det möjligt att avgränsa känslighetsområdet bättre. Laserzonrör bygger ofta på den korsande lob-principen, dvs. att sändarlob och mottagarlob korsar varandra (se figur 54). Kommer ett objekt (mål) in i området, reflekteras sändarens signal till mottagaren. Sändare och mottagare grupperas på lämpligt sätt och loberna dimensioneras för att täcka önskat område. Genom att mottagaren oftast är grindad till sändarens signal, som är känd, och att avståndet är kort, kan hög störfasthet erhållas. Laserzonrör används mot markmål (pansarvärnsrobotar) och är även mycket vanliga mot luftmål.



Figur 54. Principskiss av laserzonrör. (Källa: FHS)

Utvecklingen går mot närmare integrering av målsökare och zonrör för att ge bättre möjligheter att välja träffpunkt i målet; detta eftersom huvuddelen av egenskaperna i både målsökare och zonrör numera ligger företrädesvis i mjukvaran.

6.4 Utveckling

Flera amerikanska bedömare anser att utvecklingen av olika typer av lasersystem helt kommer förändra den taktiska situationen på stridsfältet fram till 2020. En utveckling som är intressant för militära ändamål är system som i realtid kan avbilda omvärlden tredimensionellt, koherent laserradar, med hög upplösning motsvarande den bild som fås av en TV-kamera. Exempel på intressanta tillämpningar är:

- Upptäckt av kamouflerade mål
- Navigering, styrning (primärt UAV)
- Automatisk måligenkänning (kräver någon form av bibliotek)
- Integration med andra sensorer, radar och laser/EO-sensorer som integreras kan ge möjlighet att upptäcka signaturanpassade eller dolda objekt

Kostnaderna för ovanstående system kommer att vara höga pga. dess komplexitet och det kan eventuellt hämma utvecklingen.

Ett annat utvecklingsområde är arbetet med att skapa en elektronisk näsa med en laser. Laserns höga upplösningsförmåga medför att den på molekylnivå kan identifiera kemiska substanser. Principen liknar en laserradar, dvs. den sänder ut en puls som reflekteras mot objektet och den reflekterade pulsen detekteras i mottagaren där den analyseras. Den höga upplösningen medför att man kan avgöra vilken molekyl som påträffats; detta kallas en Raman-signatur, vilken kan liknas med ett fingeravtryck. Fördelen med att använda laser som elektronisk näsa är att objektet kan vara upp till 100 meter bort. Denna metod kallas Avstånds-RRS (*Resonant Raman Spectroscopy*). För att identifiera Raman-signaturen krävs att det finns ett bibliotek att jämföra signaturen mot.

7. Hydroakustiska och marina elektromagnetiska sensorer

7.1 Inledning

Det är i huvudsak två typer av sensorer som nyttjas för marint bruk, hydroakustiska och elektromagnetiska. Hydroakustiska sensorer eller s.k. sonarer (*sound navigation and ranging*) delas in i kategorierna aktiva respektive passiva. Passiva sonarer kan detektera buller från sjögående farkoster på stora avstånd och används i militära sammanhang för att övervaka stora havsytor och vattenvolymer. Aktiva sonarer sänder ut en ljudpuls för att fånga ekon från objekt, enligt samma princip som en radar men i ett annat medium som har andra egenskaper. De primära militära tillämpningarna för aktiva sonarer är ubåtsjakt och minjakt. Andra områden för hydroakustik är undervattenskommunikation och navigering.

Räckvidden för ett sonarsystem beror på objektets signatur, jämför radarmålarea för radar, undervattensmiljön och vilken frekvens som systemet använder. Passiva sonarer kan ha räckvidder uppemot 100-tals kilometer i större hav med stora bullrande fartyg, medan räckvidden i grunda vattenområden med komplicerad botten mot svagt bullrande objekt kan vara så lite som några hundra meter. Används aktiva sonarer i grunda vatten med starkt kuperad botten är utmaningen att detektera och klassificera ekon från intressanta mål.

Utveckling av nya system sker främst inom områden såsom lågfrekventa aktiva släpsonarer, multistatiska sonarsystem med sändare och mottagare fysiskt åtskilda, torpedmålsökare för grunda vatten och syntetisk apertursonar (SAS). SAS är en utveckling från SAR, vilket är den flygburna motsvarigheten. Ett område som på senare tid fått ökat intresse är system som kan användas för att skydda fartyg mot lågkonflikthot kustnära och i hamnar.

Elektromagnetiska sensorer är i den svenska marina miljön ett intressant komplement till de akustiska, då framför allt skärgården är en komplicerad miljö med flervägsutbredning för ljudvågor som ökas ytterligare av de temperaturvariationer och salthaltsvariationer som finns. Kustnära vatten har också en bullernivå som är högre än ute på öppna hav.

Är inte ett fartyg signaturanpassat kommer det att generera detekterbara magnetiska och elektriska fält. Fälten som genereras karaktäriseras som signaturer då de är fartygsspecifika, och kan på så sätt användas för att upptäcka, klassificera och lokalisera ett objekt. De tre huvudområden man arbetar med för att kartlägga elektromagnetiska egenskaper hos ett objekt (fartyg) är elektrisk signatur, magnetisk signatur och lågfrekventa elektromagnetiska fält.

Mätsystemen kan vara antingen passiva eller aktiva. De passiva systemen använder ett objekts elektromagnetiska egenskaper för att detektera störningar i bakgrundsfälten som orsakats av det passerande objektet. De aktiva systemen sänder ut ett eget fält som det mäter och analyserar ekot ifrån.

7.2 Sonarsystem

Sonarsystem delas in i passiva respektive aktiva sonarsystem beroende på arbetssätt. Systemen har olika för- och nackdelar och det är den taktiska tillämpningen som avgör vilken typ av system som är lämpligt att använda.

7.2.1 Passiva sonarsystem

Ett passivt sonarsystem detekterar ljudvågor, buller, som objekt på eller under vattenytan oavsiktligt åstadkommer. Det kan exempelvis vara från ytgående fartyg, ubåtar, torpeder eller ett aktivt sonarsystem. Eftersom ett aktivt sonarsystem sänder ut ljudvågor, kan en passiv sonar detektera dessa signaler och på så sätt få en bäring på motståndaren. Passiva system används då man vill reducera risken för att röja sig. En ubåt är ett utmärkt exempel på en plattform där ett aktivt system inte är lämpligt just med tanke på röjningsrisken. Ett passivt sonarsystem har i en hel del fall längre räckvidd än ett aktivt system, och kan därmed vara lämpligt att använda för permanent övervakning av en volym eller som utlagda sonarbojar.

Över ett antal årtionden har utvecklingsmedel satsats på att konstruera fartyg och ubåtar som bullrar allt mindre för att bättre smälta in i det naturliga bakgrundsbrus som finns i den marina miljön. Detta är en utmaning och en nackdel för de passiva systemen då de får allt svårare att detektera objekt i bakgrundsbruset. Detta accentueras än mer om systemet är integrerat på en rörlig plattform då även bullret från den egna plattformen kommer påverka systemets prestanda negativt.

7.2.2 Aktiva sonarsystem

Ett aktivt sonarsystem har en sändare som skickar ut en puls, ljudsignal, som träffar ett objekt och reflekteras tillbaka till en mottagare, jmf med radarprincipen. På så sätt kan man få information om riktning, avstånd och eventuellt hastighet på objektet. Avståndet fås genom att mäta tiden det tar för pulsen att gå från sändaren ut till objektet och tillbaka igen till mottagaren. Det är inte bara ekot från målet man får in i mottagaren, utan också ekon från den omgivande marina miljön. De oönskade ekona kallas reverbation och härstammar från de ojämna begränsningsytorna, botten och ytan, vilka helt enkelt kallas yt- respektive bottenreverbation. Den reverbation som uppkommer på grund av reflektioner i vattenvolymen så som plankton, fiskstim m.m. kallas volymreverbation. Volymreverbationen är oftast liten jämfört med övriga störkällor, varför den brukar betraktas som försumbar. Aktiva sonarsystem kan förbättra signal-till-brusförhållandet genom att optimera pulsform och frekvens. Nackdelen med ett aktivt system är inte bara röjningsrisken utan att det också är mer energikrävande.

7.2.3 Sändare

För att kunna sända ut pulser i vattnet krävs att man kan omvandla elektrisk energi till hydroakustisk. Det sker med hjälp av en s.k. ljudomvandlare av vilka de flesta är reversibla, dvs. de kan omvandla åt båda hållen. En välkänd ljudomvandlare är högtalaren i en stereo, vilken omvandlar elektrisk energi till akustisk energi (ljudvågor). Skillnaden mellan hydroakustisk impedans (vatten) och akustisk impedans (luft) är att vatten inte sätts i rörelse lika lätt som luft; man säger att vatten har en högre specifik akustisk impedans än luft. Den specifika impedansen för vatten är 3 500 gånger högre än för luft. Den specifika impedansen definieras som produkten av ljudhastigheten och densiteten i mediet. För att sätta vatten i rörelse krävs betydligt större krafter än för luft, och material måste väljas som kan generera och känna av dessa krafter.

7.2.4 Signalbehandling i sonar

I analogi med ett radarsystem behandlas den mottagna signalen i ett sonarsystem i ett signalbehandlingssystem för att avgöra om det är ett mål, detektion, få fram bäring och, om möjligt, få avstånd samt klassificera målet. Sändaren i en sonar kan antingen vara roterande, där systemet stegvis roterar sändaren eller operatören styr den, eller vara fast med ett antal sändarelement som sänder i olika riktningar.

För att upptäcka ett mål gäller för en sonar, precis som för en radar, att det kan urskilja målekot ur bruset, dvs. att målekot ligger över ett visst tröskelvärde. Tröskelvärdet är till för att reducera antalet falska mål. Är värdet satt för

högt, kommer även en del riktiga mål inte att upptäckas. Sättande av ett tröskelvärde är en avvägning mellan sannolikheten att få falska mål kontra att inte detektera riktiga mål. När ett mål detekteras, erhålls en bäring till målet och kan avståndet samtidigt fås, har målet lokaliserats. Med en aktiv sonar får man fram avståndet till målet genom att mäta tiden det tar för pulsen att färdas från sändaren tillbaka till mottagaren. En passiv sonar kan också mäta avståndet under vissa betingelser. Med TAS (*Towed Array System*), vilken är en passiv sonar som släpas efter ett fartyg och som har ett sensorelement på ca 130 meter, kan avståndet beräknas med hjälp av avancerad signalbehandling av inkommande ekon där man utnyttjar elementets längd.

För att kunna följa ett mål krävs att man kan genomföra ett antal upprepade lokaliseringar. Genom de upprepade lokaliseringarna kan målets kurs och fart beräknas. När detta är känt kan systemet prediktera var målet kommer att befinna sig vid nästa kontakt och då söka inom ett mindre område. Det är även möjligt att klassificera ett mål då bullret som fartyget (målet) avger kan liknas vid ett fingeravtryck specifikt för den typen, men för att kunna klassificera ett mål krävs tillgång till någon form av register eller databas över olika mål som man kan jämföra målets utstrålade buller med.

7.3 Utveckling

Utvecklingen inom fartygs- och ubåtskonstruktion har medfört en allt tystare gång vilket ställer allt högre krav på sonarsystemen, inte bara tekniskt utan också hur det används taktiskt för att optimera prestanda.

7.3.1 Bistatiska och multistatiska sonarsystem

En traditionell aktiv sonar har sändare och mottagare nära varandra i samma system. I ett bistatiskt system är sändare och mottagare separerade, och ofta är de integrerade på två olika plattformar. En av de taktiska vinsterna med att separera sändare och mottagare är att plattformen som har mottagaren, t.ex. en ubåt, är passiv och röjer inte sin position. Med ett bistatiskt system kombineras fördelarna med ett aktivt och ett passivt system. Ingår det flera plattformar med mottagare som passivt lyssnar på samma sändare, erhålls ett multistatiskt system. Ofta kan ett betydligt större område täckas in genom att flera enheter samverkar; dessutom får målet svårt att manövrera utan att exponera sin största målarea (jmf med radarmålarea), vilket ökar chansen för detektion även av mycket tystgående objekt. Förutsättningen för att ett bistatiskt eller multistatiskt sonarsystem skall fungera är att den passivt mottagande plattformen vet varifrån sändpulserna skickas och när. Det innebär att komplexiteten i ett bi- eller multistatiskt system inte skall underskattas.

7.3.2 Lågfrekvent aktiv sonar (LFAS)

Trots att utvecklingen av passiva sonarer har gjort dem allt känsligare och bättre är det idag ändå svårt att upptäcka moderna tysta ubåtar. Det har medfört att industrin har gjort stora satsningar på lågfrekventa aktiva sonarer för att få fram ett motmedel mot de tysta ubåtarna. Förutsättningen för detta är utvecklingen inom digital signalbehandling, och att kostnaderna även har sjunkit markant.

Den drivande faktorn bakom utvecklingen har varit behovet av att detektera ubåtar ute på de stora oceanerna, där djupen är stora och salthalten orsakar en kraftig dämpning av ljudutbredningen vid höga frekvenser. Det har visat sig att lågfrekventa aktiva sonarer, som arbetar på frekvenser som ofta ligger under 2 kHz, har långa räckvidder med stora upptäcktsavstånd. Låga frekvenser innebär längre våglängder, och en nackdel med lågfrekventa aktiva sonarer är att de blir stora och effektkrävande. I Östersjön, som är ett grundhav, fungerar dessa system dåligt eller inte alls på grund av framför allt bottenreverbation. Därför studeras om lågfrekventa sonarer med något högre frekvens kan ge bättre prestanda i grunda hav som Östersjön.

7.3.3 Syntetisk apertursonar (SAS)

Tekniken för syntetisk apertursonar härstammar från radartekniken där en syntetisk aperturradar (SAR) har utvecklats. Storleken på en antenns apertur ger måttet på upplösning, i marina sammanhang upplösningen i bäringsled. Grunden för en syntetisk apertur är att man flyttar antennen utmed en linje och under tiden adderar signalerna koherent, dvs. i fas. Genom att göra på det sättet erhålls en mycket större apertur (antenn) och därmed en högre upplösning; man talar om en syntetisk, artificiell, antenn.

SAS utvecklas för både aktiva och passiva sonarer där målen och de tekniska utmaningarna skiljer sig lite åt. För aktiva syntetiska apertursonarer är utmaningen att kunna positionera den fysiska antennen så noggrant som i delar av våglängder. Det krävs för att kunna addera signalerna koherent. Utöver positioneringsnoggrannheten krävs också signalbehandlingsprogram för att ytterligare förbättra positioneringen. Ett militärt område som är intressant att utnyttja SAS till, är klassificeringen av minor. I fallet med passiv SAS är målet att åstadkomma noggrannare bäringsuppskattningar till målet. Tekniken kan t.ex. användas för att förbättra prestanda på traditionella *Towed Array Systems* (TAS), släpsonarer, eller för att få samma prestanda som ett klassiskt släpsonarsystem men med en kortare och mer lättmanövrerad släpsonar.

7.4 Elektromagnetisk vågutbredning i havet

Saltmolekylerna i havsvatten medför att havet är elektriskt ledande. Saltmolekylerna delar upp sig i positiva och negativa joner som kan transportera strömmen. En konsekvens av det är att fartyg rostar. Vattnets elektriska ledningsförmåga, konduktivitet, beror på många parametrar såsom temperatur, djup, densitet och salthalt. Temperaturen och densiteten varierar med djupet och salthalten varierar kraftigt i olika typer av hav. Den elektriska ledningsförmågan varierar alltså mycket beroende på var du befinner dig, både vad gäller geografiskt och på vilket djup; man säger att konduktiviteten är rumsberoende. I lokala rumsvolymer, en mindre del av en vattenvolym, bedöms havet som homogent och isotropt, alltså rumsoberoende och lika i alla riktningar.

För havsvattnets magnetiska egenskaper är däremot beroendet av olika parametrar en enklare fråga att reda ut. Vattens genomsläpplighet, permeabilitet, ligger nära den fria rymden och övriga parametrar påverkar försumbart. Vattnet kan alltså ses som transparent för magnetfält.

En stor påverkan på vattnets elektromagnetiska egenskaper för att bedöma fördelningen av elektriska fält och strömmar kommer från bottenförhållandena, särskilt inom grunda vatten och hav där en strömmängd som inte är försumbar kan ta vägen genom botten vilken är elektriskt ledande. Det finns ett antal parametrar kopplade till bottenförhållandena som påverkar de elektromagnetiska egenskaperna. Utan att gå in på detaljer kan konstateras att allt detta får till följd att den exakta ström- och fältbilden blir komplicerad.

För att förbättra sensorernas prestanda krävs god kunskap om det som nämnts ovan i den aktuella marina miljön.

7.5 Elektrisk och magnetisk signatur hos fartyg

Hur kommer det sig att fartyg har en elektrisk och magnetisk signatur? När ett fartyg konstrueras och byggs används en mängd olika material och då ofta metaller av konstruktionstekniska och ekonomiska orsaker. Det är sammansättningen av olika metaller och att vissa material är magnetiska som skapar de magnetiska och elektriska fälten.

Material som har egenskapen att de spontant sänder ut ett magnetiskt fält kallas ferromagnetiska material; järn och konstruktionsstål är bra exempel på sådana material. Det är främst tre ferromagnetiska egenskaper som påverkar fartygen magnetiskt:

- Restmagnetisering (remanens)
- Mekaniska påkänningar
- Inducerad magnetisering

När ett ferromagnetiskt material har blivit utsatt för och magnetiserats av ett magnetfält, kvarstår en viss magnetisering även när fältet tagits bort. Detta kallas restmagnetisering eller remanens. Det beror på att den inre magnetiska strukturen i materialet inte har återställts efter det att materialet varit utsatt för ett magnetfält. Remanensen från ett fartyg kan detekteras av en magnetisk sensor.

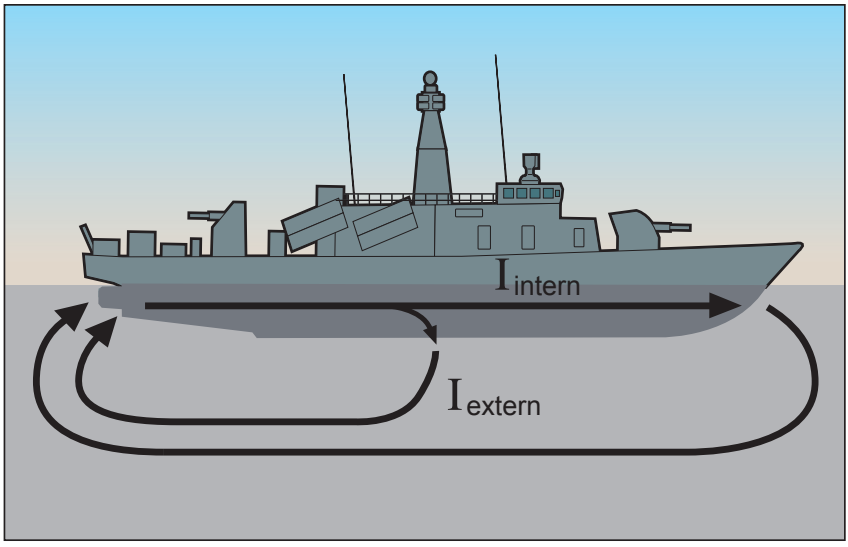
Utsätts ett ferromagnetiskt material för mekaniska påkänningar, ändrar det sin magnetisering. För ett fartyg som har skrov och överdel byggt i stål är detta av stor vikt, då det kommer att utsättas för påkänningar i havet. Påkänningarna från tunga laster, grov sjö m.m. kommer att leda till mikrodeformationer i materialet och därmed också ändringar i magnetiseringen. Den största delen av ett fartygs restmagnetisering och magnetisering pga. mekaniska påkänningar kan tas bort i en avmagnetiseringsanläggning genom en s.k. avmagnetiseringsprocess. Fartyget styrs då långsamt över ett elektromagnetiskt spolsystem som installerats på botten.

Som nämnts ovan är många fartyg byggda av stål och/eller har andra ferromagnetiska materiel i sin konstruktion. Detta kommer att åstadkomma ett tydligt bidrag av inducerat magnetisering som i varje tidpunkt beror av det jordmagnetiska fältets storlek och riktning relativt till fartyget. Effekten av detta blir att den magnetiska fältbilden kring fartyget påverkas; denna påverkan är lätt att upptäcka med magnetiska mätningar.

När ett fartyg rostar uppstår elektriska strömmar i vattnet kring fartyget. Dessa strömmar är detekterbara för en sensor. Orsaken till att metallen rostar, korroderar, är att den inte är stabil i den marina miljön som den befinner sig i. Därför uppstår en drivkraft att inta ett stabilare tillstånd, vilket medför att metallen korroderar. Korrosion sker i så kallade korrosionsceller, vilka består av anod, katod och elektrolyt. På ett fartyg består anoden och katoden av olika metaller som är i kontakt med varandra, t.ex. propelleraxeln som är i kontakt med skrovet via dess lager, och där elektrolyten är det omgivande vattnet genom vilken strömmarna flyter. Figur 55 på nästa sida visar en princip för hur strömmarna kan flyta pga. korrosion. En annan sekundär effekt av strömmarna är att de bidrar till fartygets magnetiska signatur, då strömmarna ger upphov till detekterbara magnetiska fält.

7.6 Elektromagnetiska sensorer

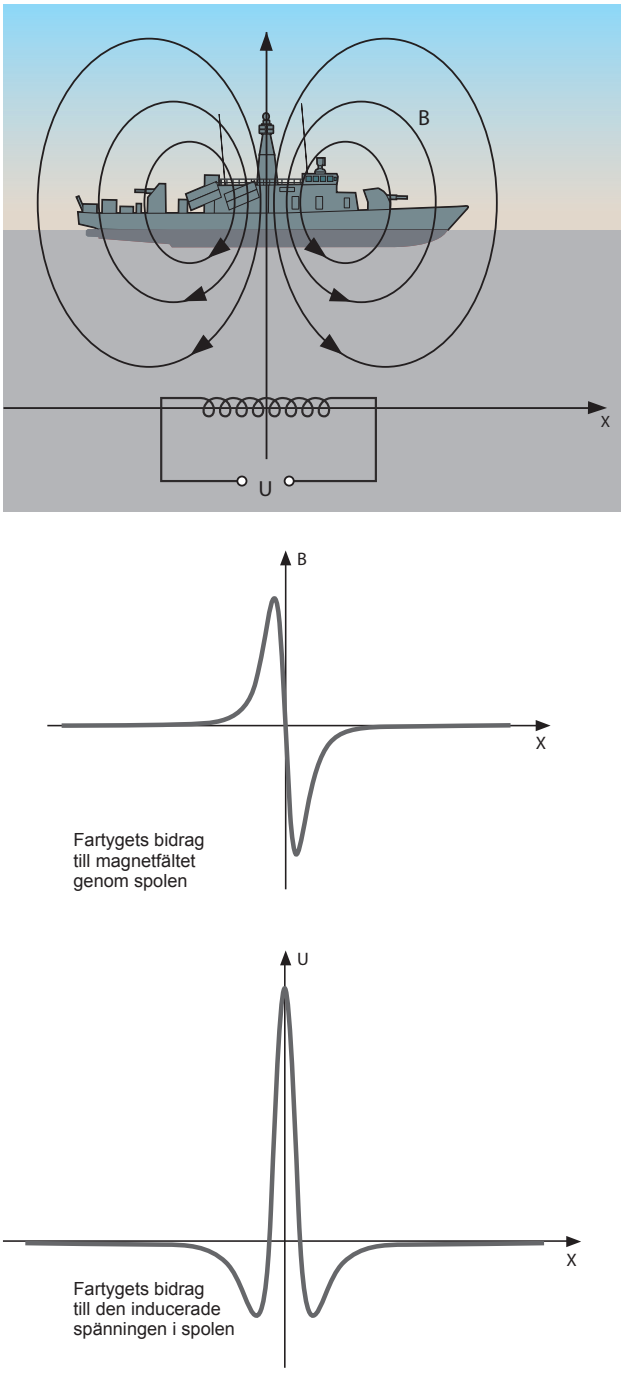
Magnetiskt aktiverade sensorer har funnits i bruk sedan andra världskriget, då magnetiskt aktiverade minor användes för att hindra sjöfarten. Minorna kände av fartygets passage genom en förändring av magnetfältet och minan utlöstes. En naturlig utveckling och tillämpning för elektromagnetiska sensorer är för övervakning och spaning.



Figur 55. Elektriska strömmar i och kring ett fartyg, orsakade av korrosion. (Källa: FOI)

Vektormagnetometrar är en typ av sensorer som mäter magnetfält. En vektormagnetometer är känslig för både magnetfältets styrka och riktning. De görs vanligen treaxliga så att alla fältkomponenter kan mätas. Prestanda på sensorn är starkt beroende av hur exakt man lyckats få de tre axlarna vinkelrätt mot varandra. Induktionsspolen är den enklaste typen av vektormagnetometrar, som bygger på Faradays induktionslag. Induktionslagen säger i korthet att den inducerade spänningen i slutna lindningsvarv är proportionell mot förändringen av magnetflödet genom spolen. En fördel med induktionsspolarna är att de är passiva, tillförlitliga och tål hårda miljöer såsom den marina. Ett militärt användningsområde är detektion av passerande föremål som t.ex. ytfartyg och ubåtar som lokalt stör den jordmagnetiska fältbilden. Se figur 56 för principiell funktion av induktionsspole.

Fluxgatemagnetometern mäter till skillnad från induktionsspolen själva fältstyrkan direkt. Mätningen sker genom att i en mätprob jämföra det omgivande magnetiska fältet med ett internt referensfält. Jämförelsen skapar en asymmetri av det magnetiska flödet i proben som kan nyttjas för att läsa av magnetfältet. Tre enaxliga sensorer kombineras för att hela fältet skall kunna mätas. Kritiskt för fluxgatemagnetometerns prestanda är att de tre sensoraxlarna är vinkelräta mot varandra med hög precision. Marina tillämpningar är ubåtsdetektion och magnetisk signaturanpassning för fartyg.



Figur 56. Principskiss på fartygspassage över induktionsspole. (Källa: FOI)

7.7 Fältspänningssensorer

Det naturliga sättet att mäta elektriska fältstyrkor i vattnet är att nyttja elektrodpar som har punktkontakt med vattnet och sitter på ett känt avstånd d från varandra. En elektrisk potentialskillnad U mäts av en voltmeter. Ur det beräknas fältstyrkan E = U/d. För att kunna mäta hela fältet till både storlek och riktning krävs att systemet har tre elektrodpar som sitter vinkelrät monterat mot varandra. Genom att öka elektrodavståndet kan sensorns känslighet förbättras på bekostnad av upplösningen. Sensorsystemen delas in i långbassystem och kortbassystem. Långbassystemen kan ha hundratals meter mellan elektronparen medan kortbassystemen vanligtvis har någon meter upp till något tiotal meter. Långbassystemet kan spana över stora ytor och har hög känslighet; det detekterar i första hand närvaron av en elektrisk källa som t.ex. en ubåt. Långbassystemen klarar oftast inte att lokalisera eller klassificera källan. Kortbassystemet klarar att upplösa rumsvariationer eftersom det är av samma storleksordning eller mindre än källan. Kortbassystemen har betydligt sämre räckvidd än långbassystemen, men har i gengäld bättre upplösning.

8. VMS (varnings- och motverkanssystem)

8.1 Inledning

Varnings- och motverkanssystem (VMS) är en delmängd av telekrig men röner stort intresse, inte bara tack vare att den ingår som en viktig komponent i plattformsskydd och *force protection* utan också för att den har potential att bli en viktig komponent i det nätverksbaserade försvaret. Ytterligare en anledning till intresset är att moderna VMS är komplexa system, vilket medför att det är en relativt dyr sensor och därför ofta kommer upp till avvägning vid anskaffning och utveckling av materiel.

VMS är ett samlingsnamn för ett antal olika system som arbetar inom olika frekvensområden beroende på vilket hot som det skall varna för och vilket form av motmedel som används. Det klassiska exemplet är en radarvarnare som är integrerad med en störsändare och där bägge delarna ligger inom frekvensområdet för radar. En robotskottsvarnare ligger inom ett helt annat frekvensområde anpassat för t.ex. en raketmotors emission; motmedlet kan vara facklor för att bekämpa en IR-robot. En laservarnare eller laserstörare arbetar återigen inom ett annat frekvensområde. Beroende på plattform och hot kan samtliga frekvensområden vara intressanta, alternativt prioriteras det största hotet. Trenden är dock att samtliga frekvensområden grovt indelat i radar, IR och laser är intressanta då hotbilden idag täcker samtliga av dessa frekvenser och hotsystemen blir alltmer sofistikerade. Samtidigt som den tekniska utvecklingen talar för att ett allt större frekvensområde behöver täckas in för att få ett komplett VMS, kan det vara bra att lägga in en liten brasklapp om att det inte alltid är de mest sofistikerade systemen som utgör det största hotet. Som exempel kan nämnas att ett väldokumenterat hot mot flygande plattformar är robotar med IR-målsökare; statistiken talar om att en majoritet av alla nedskjutna flygplan

och helikoptrar sedan mitten på 1970-talet beror på IR-robotar. Anledningen till att IR-robotar betraktas som ett avsevärt hot är att de är passiva, relativt okomplicerade att använda, lätta att transportera och spridda i hela världen.

En viktig del i VMS är dataförsörjningen av systemen, det som vi i dagligt tal kallar telekrigsbibliotek. Då flera olika system från olika leverantörer används inom Försvarsmakten (FM) medför det att dataförsörjningen blir alltmer komplex och resurskrävande. För att producera en datasats för ett system krävs inte bara kunskap om hur systemet fungerar utan också en god kunskap om hur det taktiskt utnyttjas. Prestanda på ett VMS beror inte enbart på konstruktionen utan också till stor del på kvaliteten på indata, t.ex. radarparametrar, och på hur telekrigsbiblioteket designas. Då VMS är ett område som är omgärdat av stor sekretess, innebär det att utbytet av erfarenheter och data är mycket begränsat. Det medför att kompetensen behöver finnas inom rikets gränser för att FM skall kunna säkerställa ett tillräckligt skydd för sin personal vid bl.a. internationella insatser.

8.2 VMS grunder

VMS förknippas primärt med ett plattformsskydd men informationen från systemet kan även användas för andra behov som t.ex. omvärldsuppfattning, lägesbild, underrättelser för högre chefer eller *force protection*. Själva namnet VMS (varnings- och motverkanssystem) indikerar att det finns en automatik mellan varning och motmedel. Att man vill ha automatik beror på att det ofta är frågan om mycket snabba tidsförlopp när ett hot har identifierats, men oftast kan operatören/piloten överrida systemet när så krävs. Motmedlen är antingen passiva, som i radarfallet t.ex. remsor, eller aktiva, som t.ex. störsändning.

Beroende på vilket frekvens- och därmed våglängdsområde som varnaren verkar inom, brukar man tala om radarvarnare och elektrooptiska varnare, där laservarnare är ett exempel på en elektrooptisk varnare. Ett VMS består i huvudsak av tre delkomponenter:

- Varnare
- Systemdator, inklusive hot- och ev. åtgärdsbibliotek
- Motmedel

Oftast presenteras hotinformationen på en av plattformens egna displayer men egna systemdisplayer förekommer, framför allt på äldre plattformar och system. Varnaren förmedlar information till VMS systemdator som genomför signalanalys, hotutvärdering och vid behov beordrar åtgärd av motmedel. Hotet presenteras för piloten/operatören på plattformsdisplayen. Den vanligaste

typen av varnare är radarvarnare, robotskottsvarnare och laservarnare. Beroende på hotbild kan en eller flera typer av varnare vara integrerad i plattformen. Systemdatorn för VMS skall klara av att hantera samtliga varnare med tillhörande motmedelsalternativ. Vilken form av motmedel som plattformen har beror på hotbild men också miljön som plattformen verkar i.

Exempel på motmedel är störsändning, rems- eller fackelfällning, bekämpning med eldenhet, rök, vattendimma eller aktivt pansar. En central roll för att varning och motmedelsåtgärd skall fungera har hot- och åtgärdsbiblioteket, det s.k. telekrigsbiblioteket, som laddas in i systemdatorn för VMS inför ett uppdrag. Dataförsörjningen av telekrigsbibliotek till VMS är en nyckelfaktor för framgång vid olika operationer; om inte telekrigsbiblioteket innehåller rätt hot med korrekta motmedelsåtgärder, kommer plattformen med stor sannolikhet att riskera slås ut.

8.2.1 Radarvarnare

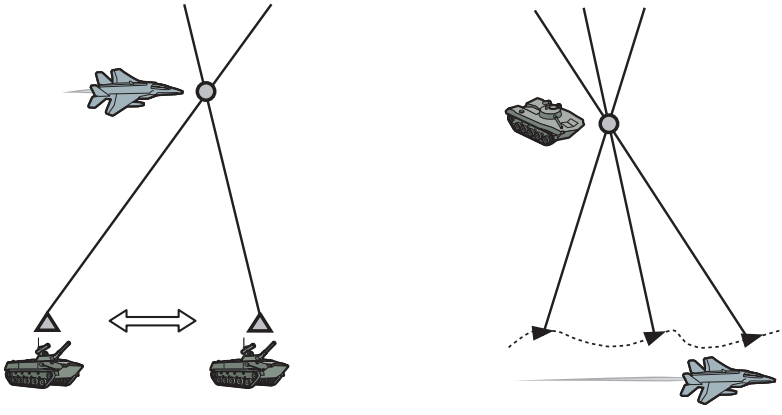
Oavsett frekvensområde arbetar varnaren enligt principen för envägsutbredning; pulsen behöver alltså bara gå en väg. Centralt för en radarvarnare är att den har kort reaktionstid för att upptäcka ett hot, varför den momentant måste täcka in alla frekvensområden över en sfärs yta för flygande plattformar och en halvsfär för mark- och sjögående plattformar. Varnarens uppgift är att upptäcka, klassificera och identifiera en sändare. Vidare önskas riktning till och, om möjligt, position på sändaren. Moderna varnare har även kapacitet att inhämta och lagra radarparmetrar för senare analys och produktion av datasatser till hotbibliotek. Principen för detektion hos en radarvarnare är analog med en radar där ett tröskelvärde sätts för att urskilja vad som är en puls respektive brus. Är signaleffekten högre än tröskelvärdet blir det en detektion. Hur högt tröskelvärdet sätts är en kompromiss mellan sannolikheten för detektion av en signal och risken för ett falsklarm. Enstaka pulser ger aldrig upphov till larm utan det krävs att flera pulser har detekterats och att varnarsystemet bedömer att de hör ihop med en och samma sändare för att larm skall ges. Räckvidden för en varnare är beroende av många parametrar som t.ex. egenskaperna hos radarsystemet, varnaren själv, signalmiljön m.m. Detta medför att beräkningen för räckvidden blir relativt komplex, men generellt kan sägas att om plattformen som varnaren sitter på inte har stor radarmålarea, kommer varnaren i de flesta fall att upptäcka radarsystemet innan radarn upptäcker plattformen tack vare att radarvarnaren arbetar enligt principen för envägsutbredning medan radarn arbetar enligt principen för tvåvägsutbredning.

När varnaren detekterat en radarsignal påbörjar den arbetet med att klassificera och identifiera signalen. Det är ett antal radarparametrar, beroende på konstruktion, som varnaren använder vid sin analys av signalen som t.ex.:

- PRF
- Pulslängd
- Pulsmodulation
- Bärfrekvens

Varnaren jämför dessa parametrar mot telekrigsbiblioteket för att identifiera signalen. Då många radarsystem ofta har likartade vågformer, t.ex. är F16 och JAS 39 mycket lika varandra i vissa arbetsmoder, kan identifieringen vara svår att göra. Ett sätt att hantera detta är under designen av hotbiblioteket, vilket behandlas längre ned i texten. Beroende på vilken arbetsmod som radarn är i, t.ex. spaning eller följning, använder den olika vågformer, vilket är viktig information för varnaren för att definiera nivån på hotet mot plattformen. Är hotet omedelbart aktiveras motmedel.

De flesta moderna radarvarnare klarar att ge riktning och position för ett hot. En av de vanligaste metoderna för riktningsbestämning i radarvarnare är monopulsmetoden, oftast amplitudmonopuls även om fasmonopuls eller en kombination förekommer. Monopuls innebär att riktningen bestäms för varje puls. I exempelvis flygfallet använder man fyra antenner med 90 graders täckning där man jämför den mottagna signaleffekten mellan antennerna och på så sätt får man ut en riktning. Antennerna har stora huvudlober, 90 grader, vilket medför att riktningsfelet kan bli rätt stort, bortemot 5–10 grader. Andra tillskott till riktningsfelet är lågt signal-till-brusförhållande eller reflexer nära antennerna som skapar variationer på amplituden. Riktningen är dock tillräckligt bra för att varnaren i kombination med analys av radarns arbetsmod initierar motmedel samtidigt som en varning visas på displayen för operatören/piloten.



Figur 57. Princip för krysspejling: samverkande enheter respektive egentriangulering. (Källa: FOI)

För att lokalisera en radar är det enklaste sättet att pejla riktningen till radarn från två olika positioner och se var pejlriktningarna korsar varandra; i krysset befinner sig radarn. Metoden brukar kallas krysspejling. Om man inte har tillgång till två system som samtidigt kan pejla en sändare kan man använda en ensam plattform, förutsatt att den rör sig med en relativt hög hastighet. Genom att plattformen rör sig skapar man en mätbas (se figur 57) genom sin egen rörelse; på så sätt kan man få fram ett pejlkryss på en stillastående sändare.

8.2.2 Elektrooptiska varnare

Syftet med en elektrooptisk varnare är detsamma som för en radarvarnare, dvs. att varna för att belysning av plattformen sker eller om ett inkommande hot. Inom elektrooptiken är det primärt tre typer av varnare som förekommer: UV-baserad varnare (robotskott), IR-baserad varnare (robotskott) och laservarnare.

En varnare som bygger på att UV-strålning detekteras (denna kallas också ofta för robotskottsvarnare), arbetar inom våglängdsområdet 0,2 till 0,3 mikrometer och detekterar flamman från en raketmotor. Detektion kan bara ske så länge som raketmotorn brinner och varnaren är en stirrande detektormatris med ca 90 graders täckning, vertikalt såväl som horisontellt. För att täcka en sfärs yta krävs flera detektorer på plattformen. Svagheten med en UV-baserad robotskottsvarnare är att tiden en raketmotor brinner är mycket kort, vilket ger mycket kort tid för upptäckt och riktningsbestämning.

En robotskottsvarnare som arbetar inom IR-området är uppbyggd enligt samma princip som en UV-varnare, men ligger istället inom 3–5 mikrometersfönstret. Den termiska strålningen i 3–5 mikrometerområdet från en robot har två komponenter, raketmotorns emission samt skrovets emission (aerodynamisk uppvärmning), varför tiden för upptäckt och riktningsbestämning blir längre.

Den tredje typen av elektrooptisk varnare är laservarnaren. Utvecklingen av laservarnare påbörjades under 1970-talet; de var då relativt enkla med relativt få laservåglängder. Idag är situationen annorlunda, det är ett betydligt större våglängdsomfång och typ av hotsystem som skall täckas in. Den moderna laservarnaren skall klara av att varna för laseravståndsmätare, belysare, laserradar och ledstrålelaser. Utöver detta tillkommer bländ- och störlasrar som ytterligare ökar kraven på varnarna. Med utökningen av olika lasersystem har också antalet våglängder som utnyttjas ökat betydligt.

Analogt med radarvarnaren är det vissa parametrar i lasern som är intressant för varnaren att detektera. Den vanligaste är pulsrepetionsfrekvensen (PRF), för att avgöra vilken typ av hotlaser som belyser varnaren och plattformen. Avancerade laservarnare kan också, precis som radarvarnare, använda sig av hotbibliotek för att identifiera hotsystem. En stor utmaning för laservarnarna

är att pulsade hotsystemlasrar sänder mycket korta pulser, ner mot nanosekunder, som skall detekteras, riktningsbestämmas och om möjligt identifieras.

8.2.3 Olika motmedel

Motmedel kan sättas in mot både elektrooptiska och radarsensorer för att skydda en eller flera plattformar. Motmedel är passiva respektive aktiva. Ett exempel på aktiva motmedel är störsändare, ett passivt motmedel är remsor. Syftet med att använda motmedel är att förhindra eller försvåra:

- Upptäckt av plattformen
- Inmätning av plattformen
- Låsning på plattformen
- Bekämpning av plattformen

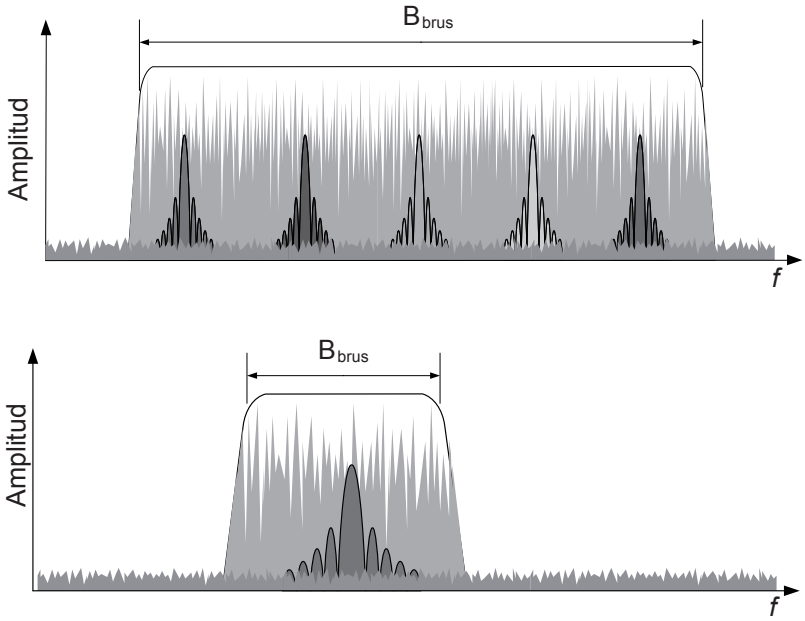
- Aktiva radarmotmedel

Mot radarsystem är de aktiva motmedlen indelade i maskerande störsändning och vilseledande störsändning. De passiva motmedlen består av remsor, reflektorer.

Maskerande störsändning, även kallad brusstörning, är en elektromagnetisk signal som genom slumpmässig modulation ändrar amplitud och/eller frekvens och på så sätt skapar ett brus i radarn. Syftet är försämra radarns signal-brusförhållande så mycket att ett måleko blir omöjligt eller svårt att detektera för radarn. För att brusstörning skall vara effektivt mot ett radarsystem måste bruset vara kraftigare än målekot. Radarsystem som använder pulskompression är svårast att störa med brus eftersom pulskompressionen innehåller en pulskod; radarn förstärker endast de signaler som innehåller pulskoden och undertrycker övriga signaler.

Brusstörning kan vara bredbandig eller smalbandig. Bredbandig störning kräver mycket energi, annars blir verkan begränsad. Lyckas däremot den bredbandiga störningen täcka hela radarbandet med tillräckligt mycket energi är den effektiv, då de flesta radarsystem inte har någon motåtgärd som de kan sätta in på kort tid. För att få avsedd effekt krävs att störsändaren har mycket hög uteffekt eller att den står nära mottagaren i radarsystemet.

Smalbandig brusstörning kräver betydligt mindre energi eftersom störsystemet fokuserar energin inom ett begränsat frekvensintervall (se figur 58 som visar principen för smal- respektive bredbandig störning). Störutrustningen vid smalbandig störning måste kunna känna av, detektera, inom vilket frekvensintervall radarsystemet sänder för att kunna anpassa sin störning till rätt frekvensområde. Lyckas den med det är smalbandig brusstörning effektiv.



Figur 58. Princip för bredbandigt (övre figuren) och smalbandigt (undre figuren) brus. (Källa: FOI)

Vilseledande störsändning syftar primärt till att åstadkomma en avhakning, dvs. att radarsystemet, ofta eldledningsradar eller målsökare, skall tappa sin låsning på målet, vilket kan åstadkommas på primärt tre sätt:

- Avståndsavhakning
- Hastighetsavhakning
- Vinkelavhakning

Ofta kombineras vilseledande störsändning med en passiv åtgärd som t.ex. remsfällning med syftet att radarn eller målsökaren skall låsa över på remsmolnet. Nedan beskrivs i korthet de olika avhakningsmetoderna.

Avståndsavhakning används för att få exempelvis en radar eller robot att beräkna framförhållningen felaktigt eller att låsa över på ett falskt mål som ett remsmoln. Avhakningen genomförs i tre steg:

- Första steget för störsändaren är att skapa ett skeneko för att dölja målekot. Det gör den genom att sända en kraftig puls till radarn med minimal fördröjning som får radarn att sänka sin förstärkning. När förstärkningen

sänks kommer målekot inte längre synas; det döljs av störsändarens skapade skeneko.

- Steg två är att sända störpulsen mer och mer fördröjt så att skenekot vandrar bort från målekot.
- I steg tre avbryter störsändaren sin sändning; eftersom radarn sänkt sin förstärkning kommer den inte hitta målekot i avståndsluckan utan går över i minnesföljning från senast kända och då felaktiga avstånd. Steg tre kan förstärkas genom att ett remsmoln läggs ut på det avstånd där störsändaren avbröt sin sändning; radarn kommer då eventuellt att låsa på remsmolnet.

Avståndsavhakning bör kombineras med en undanmanöver av plattformen (i detta exempel ett flygplan).

Hastighetsavhakning kan användas när ett radarsystem följer på doppler, dvs. den frekvensökning eller sänkning relativt till den egna sändfrekvensen som ett rörligt mål ger upphov till. En del jaktflygplan har sådana radarsystem. Genom att följa på doppler mäter man hastigheten och undertrycker på så sätt effektivt markklotter. Principen för hastighetsavhakning är lik avståndsavhakning, men i hastighetsavhakning manipulerar störsändaren istället hastigheten genom att störa dopplersvaret i målekot. Hastighetsavhakning sker också i tre steg:

- I det första steget skapar störsändaren ett skeneko för att dölja målekot genom att sända en kraftig puls till radarn med minimal fördröjning, vilket får radarn att sänka sin förstärkning. När förstärkningen sänks kommer målekot inte längre att synas; det döljs av störsändarens skapade skeneko. (Detta är analogt med avståndsavhakning.)
- Steg två är att skapa en falsk dopplersignal genom att stegvis försiktigt förändra frekvensen i störsignalen. Radarn kommer att uppfatta det som att plattformen ändrar hastighet. När radarn följer på fel hastighet går man över till steg tre.
- Det tredje steget innebär att man stänger av störsändaren; radarn kommer då att gå över i minnesföljning (analogt med avståndsavhakning). Även här är det lämpligt att plattformen genomför en undanmanöver. Avhakningsstörning är ett sätt att skapa sig tid för en undanmanöver.

Den tredje avhakningsmetoden kallas vinkelavhakning. Syftet med denna är att vrida bort radarantennen från målet. Vinkelavhakning är framför allt intressant att genomföra mot eldledningsradarer. En eldledningsradar strävar hela tiden mot att peka rakt mot målet (se kapitel 2 för en närmare beskrivning

av olika följningsprinciper för dessa radarsystem). För en nuterande sändare, vilken beskriver en cirkelrörelse kring målet och mäter in var i varvet den får störst signal, kommer den att sträva mot att få en signal som är lika stark varvet runt, dvs. att radarn pekar rakt mot målet som ligger i centrum av cirkeln. Vinkelavhakning sker i två steg:

- Första steget är att störsändaren mäter rotationshastigheten, nutationen, på eldledningsradarn för att få reda på hur snabbt radarn roterar. När det är fastställt går man över till steg två.
- Steg två innebär att störsändaren förstärker radarsignalen på samma ställe i rotationsvarvet varje varv. Låt oss som exempel säga att störsignalen kommer när radarn pekar rakt till vänster om målekot. Radarn tror då att den ligger för mycket åt höger och kommer att vrida antennen åt vänster, förfarandet upprepas och eldledningsradarn kommer hela tiden att vrida antennen mer och mer åt vänster; inom kort har den tappat målet. Nuterande eldledningsradarer är relativt enkla att vinkelavhaka varför moderna system har en annan följeprincip, vilken kallas monopulsteknik.

Grundprincipen för en monopulsradar är att den har fyra fasta lober för att beräkna vinkelinformationen. Radarpulsen sänds ut samtidigt i alla loberna genom fyra sändare (se kapitel 2 för en närmare beskrivning av monopulsradarn) och tas emot i fyra mottagare. Styrkan med monopulstekniken är att en enda puls innehåller all vinkelinformation från målekot. En nuterande radar kräver många eko-pulser för att få vinkelinformationen, vilket gör den mer sårbar. Konsekvensen av detta är att en monopulsradar är mycket svårare att haka av genom vinkelavhakning. Det finns dock sätt att vinkelavhaka en monopulsradar. Den effektivaste metoden bedöms vara att använda en bogserad störsändare (flygfallet).

En bogserad störsändare släpas i en vajer cirka 100 meter bakom flygplanet. Syftet är att en eldledningsradar eller robot skall gå mot störsändaren i stället för flygplanet eftersom störsändaren skapar ett kraftigare eko än flygplanet. Ofta är den släpade störsändaren bara en eko-förstorare men det finns några som också kan modulera signalen till viss del. Om en robot går mot den släpade störsändaren kommer troligen inte zonröret att utlösa roboten eftersom den fysiska storleken på störsändaren är för liten, utan den passerar helt enkelt förbi.

- Passiva radarmotmedel

De vanligaste passiva radarmotmedlen är remsor, reflektorer och signaturanpassning. Remsor var det första motmedlet mot radarsystem och är fortfarande idag ett av de vanligaste. Remsor är metallbelagda glasfibertrådar som reflekterar

radarstrålningen och genererar på så sätt ett stort radareko genom att skapa ett remsmoln. Tanken med remsmolnet är att dölja de skarpa målekona, eller att få ett hotsystem eller robot att låsa över på remsorna.

Radarreflektorer används för att skapa skenmål med stor radarmålyta. Skenmål mot radarsystem används ofta i flygsammanhang och är ofta riktat mot luftförsvaret. Skenmålen kan nyttjas för olika taktiska syften såsom bekämpning med signalsökande robot, att starta upp fiendens jakt, att tända upp radarstationer så att de kan lokaliseras samt även inmätning av parametrar i signalspaningssyfte och för VMS-hotbibliotek, eller för att rikta uppmärksamheten åt ett annat håll.

Signaturanpassning av plattformar görs för att förhindra eller försvåra upptäckt, inmätning, låsning och bekämpning av plattformen. En lyckad signaturanpassning medför att motståndaren aldrig upptäcker plattformen eller, vad som är sannolikare, att tidsfönstret för motståndare att kunna bekämpa plattformen blir för litet. En svårighet med signaturanpassning är man inte kan optimera plattformen mot bara en våglängd (frekvens), t.ex. radar, utan att den är en kompromiss mot ett stort antal olika våglängdsområden som radar, IR, optiskt, akustiskt, magnetism. Prioriteringsordningen går från störst hot till lägst hot för plattformen. Beroende på om plattformen är mark-, sjö- eller luftburen kan prioriteringarna bli olika. Inom radarområdet är absorbering av radarenergi och bortvinkling av radarenergi för att minska radarmålarean de viktigaste.

- Elektrooptiska motmedel

De aktiva elektrooptiska motmedlen domineras av lasertekniken; man benämner dem oftast antisensorlaser. Facklor mot IR-robotar betecknas som ett passivt motmedel. Antisensorlasrar används inom både det visuella och infraröda området. De kan användas för att blända, störa, vilseleda och också förstöra en sensor. Antisensorlasern används oftast mot spaningssensorer eller målsökare. En antisensorlaser invisas av något annat system eller sensor för att sedan kunna verka mot målet. (En närmare beskrivning av antisensorlasrar återfinns i kapitel 6.) Antisensorlasrar är en undergrupp i lasersystem och flera bedömare i USA anser att utvecklingen av olika lasersystem kommer att förändra den taktiska situationen på stridsfältet fram till 2020. En begränsande faktor är dock den höga kostnaden.

Facklor är en elektrooptisk typ av skenmål som är avsedd att användas mot IR-robotar. En fackla som skjuts ut från en plattform brinner i ett våglängdsområde som en målsökare arbetar inom. Enfärgsfacklor, som är den äldsta typen av facklor, emitterar i huvudsak inom våglängdsområdet 3–5 mikrometer. Avsikten är att roboten skall uppfatta facklan som ett intressantare mål och låsa över på den. Utvecklingen av facklor går mot att de skall kunna emittera

strålning i båda IR-våglängdsområdena som används, dvs. både 3–5 och 8–12 mikrometer. Denna typ av facklor kallas tvåfärgsfacklor. Orsaken till detta är den klasiska kampen om medel och motmedel där allt fler målsökare kan diskriminera de två våglängdsområdena och på så sätt välja bort en enfärgsfackla då den uppvisar mycket liten emission inom 8–12 mikrometersområdet.

Utvecklingen av avancerade IR-robotar med målsökare som kan diskriminera flera våglängder eller är bildalstrande har medfört att det behövs ett alternativ till facklor. En utveckling det satsas mycket på är DIRCM (*Directional Infrared Countermeasures*), en antisensorlaser som riktas in av t.ex. en robotskottsvarnare av UV- eller IR-typ.

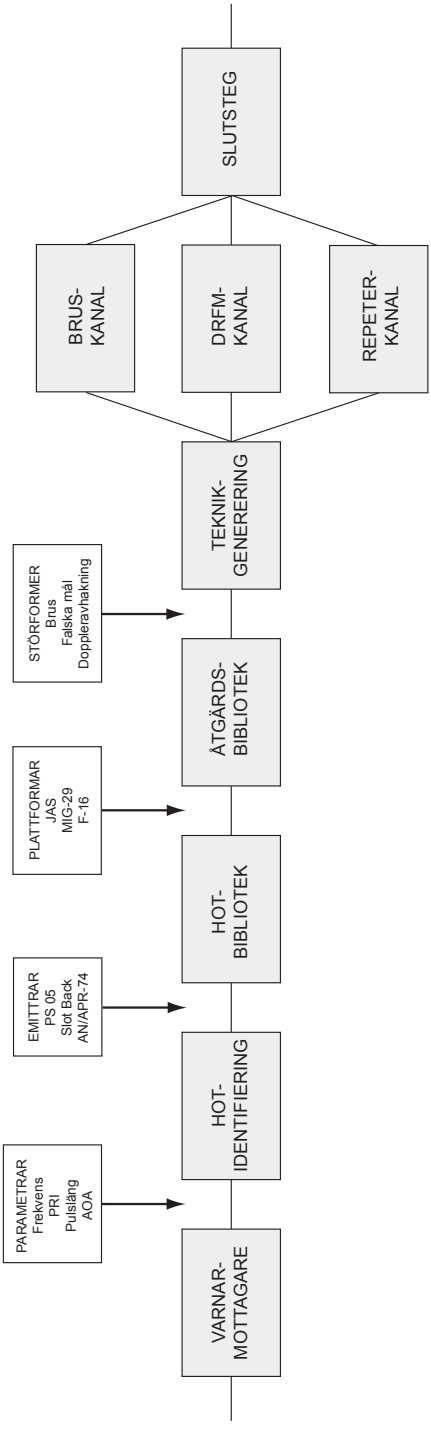
8.3 VMS Luft

8.3.1 Inledning

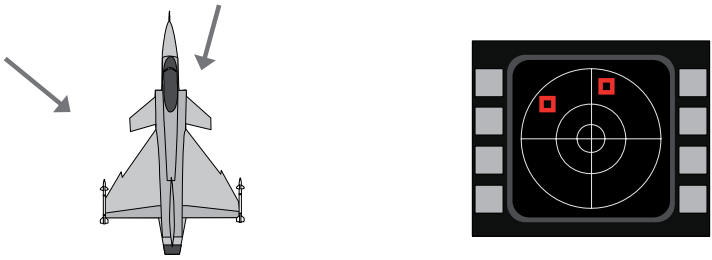
För att skydda en flygande plattform utnyttjas vanligtvis en radarvarnare och ett motverkanssystem. Varnaren detekterar, klassificerar och identifierar de signaler som tas emot. Detta sker genom att mäta in de inkommande signalernas parametrar och strukturera alla data för att sedan jämföra dem mot det telekrigsbibliotek, varnar- och åtgärdsbibliotek, som finns inladdat i systemdatorn. Parameterinmätning används för att identifiera emittrar (radarer) genom att värdera de parametrar som är karaktäristiska för radarn, t.ex. bärfrekvens, pulslängd, ankomsttid, antennsveptyp och frekvensmodulation.

Telekrigsblioteket är uppdragsorienterat, olika bibliotek används beroende på hur hotet bedöms vara för just det uppdraget och laddas in strax före start. En viktig aspekt på ett varnarsystem är tiden. Varnaren måste vara mycket snabb och reagera på mikrosekundsnivå, vilket ställer stora krav på systemet. Det medför att telekrigsbiblioteket behöver skräddarsys för att inte riskera problem med att identifiera hotet pga. tvetydigheter eller att identifieringen tar för lång tid. Motverkansdelen i VMS kan bestå av både aktiva och passiva system. Den aktiva komponenten är störsändaren och de passiva komponenterna är remskastare/fällare. Störsändaren behöver parameterinformation om de signaler som den skall störa. Informationen kan komma antingen från en integrerad mottagare i störsändaren eller från radarvarnaren, beroende på hur systemet designats för plattformen.

VMS skall även kunna hantera IR-hotet mot plattformen. Som skydd mot IR-robotar integrerar man även någon typ av robotskottsvarnare i systemet. Motverkansdelen i IR-fallet är traditionellt facklor men målsökarna i IR-robotar blir alltmer sofistikerade och klarar av att sortera ut att en fackla är ett skenmål och går på plattformen. De mest moderna IR-robotarna har bildalstrande målsökare och då fungerar inte fackelfällning. För att möta det nya hot som de nya



Figur 59. Principiellt blockschema för ett VMS med varnare, biblioteksfunktion och motverkan (störning). (Källa: FOI)



Figur 60. Schematisk skiss som visar hur presentationen av hot kan se ut på en varnarindikator. (Källa: FOI)

målsökarna utgör har man utvecklat ett antisensorsystem som benämns DIRCM (*Directed Infrared Countermeasures*) som bländar eller förstör målsökaren.

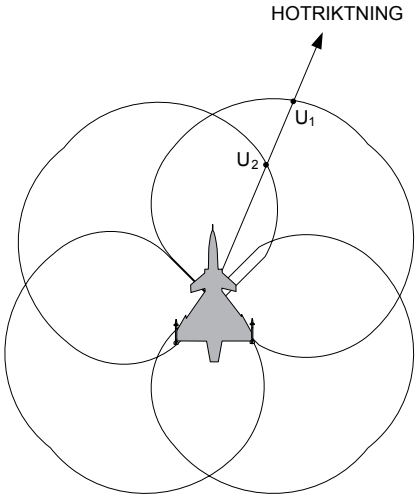
VMS-systemet skyddar inte bara flygplanet mot hot. Det understöder dessutom flygföraren så att denne har en korrekt omvärldsuppfattning, dels för att kunna sätta in rätt motåtgärder och dels för att kunna anpassa sitt uppträdande. Det centrala i omvärldsuppfattningen är att piloten har kunskap om vilka plattformar och luftvärnssystem som finns i den närmaste omgivningen och luftrummet. De olika plattformarna inklusive lv-system listas i prioritetsordning med det farligaste hotet först. Presentationen av hoten för piloten kan se ut på ett antal olika sätt beroende på vilken metodik som har valts. Ett vanligt förfarande är att placera symbolen för hotet på indikatorn i samma riktning som hotets bäring och avståndet till centrum representerar hur farligt hotet är; ju högre prioritet, desto närmare centrum. En variant är att placera det farligaste hotet ute i periferin på indikatorn. Fördelen med den senare är att presentationen inte blir så grötig och därmed enklare för piloten att tolka.

När ett hot har identifierats föreslår systemet en åtgärd; detta kan också ske automatiskt beroende på hotets farlighet och tidsfaktorn.

8.3.2 Riktningsbestämning

Varningssystemet skall inte bara kunna mäta in radarsignalens parametrar utan också ge en riktning till hotet som beskrivits ovan. Riktningsbestämning kan genomföras med olika metoder som t.ex. amplitudmonopuls, fasmonopuls och långbasinterferometri. För VMS är amplitudmonopuls den metod som bedöms som vanligast.

Vid amplitudmonopuls är antennerna placerade så att de är riktade i lite olika riktning, man kan säga att de skelar. Varje mottagen puls i de båda antennerna kommer attt ha en unik kombination av amplitudstorlekar (se figur 61). Fördelen med denna metod är att man inte behöver känna till frekvensen på signalen och att den är bredbandig. Den noggrannhet som erhålls ligger på cirka 5 grader, vilket bedöms som godtagbart.



Figur 61. Hotriktningen fås genom att jämföra signalen i varje antennriktning. Kombinationen av U1 och U2 ger en bestämd riktning. (Källa: FOI)

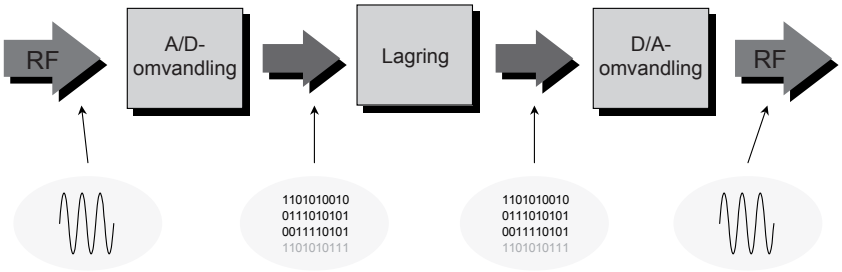
Antenninstallationen är ofta gjord i vingspetsarna på flygplanet och med 45 graders vinkel i azimut, vilket ger en god runtomtäckning.

8.3.3 Störning

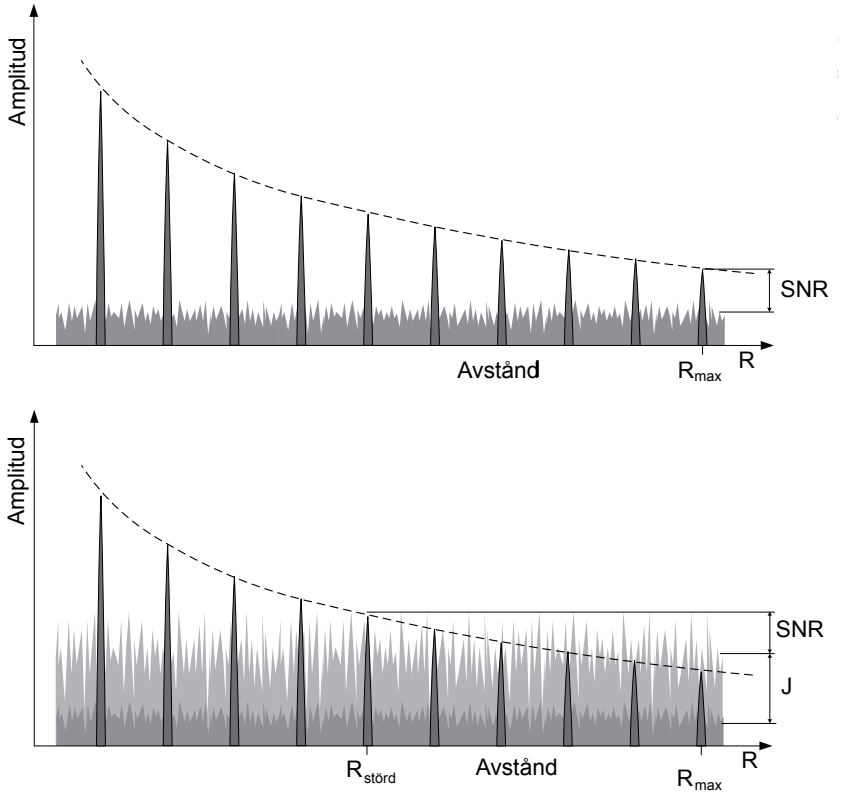
Nedan kommer olika störtekniker i korthet att beskrivas. Repeterstörning genomförs med modulatorer som lägger på den mottagna radarsignalen en brusmodulering, amplitudmodulering eller ett frekvensskift och på så sätt kan man med hjälp av en förstärkare generera en godtyckligt falsk radarmålarea.

DRFM-störning (Digitalt RadioFrekvensMinne) genomförs med hjälp av en DRFM-störkapsel, som spelar in och lagrar radarsignalen i ett digitalt minne som sedan kan återutsända radarsignalen vid godtyckligt vald tidpunkt. Den återutsända signalen är mycket naturtrogen och radarsystemet har svårt att skilja den från ett riktigt måleko. Den analoga RF-signalen, radarpulsen, digitaliseras i en A/D-omvandlare och lagras digitalt i ett minne. I minnet kan signalen lagras så länge som önskas; när man sedan vill sända ut den, går den via en D/A-omvandlare och sänds ut som en naturtrogen radarpuls (se figur 62).

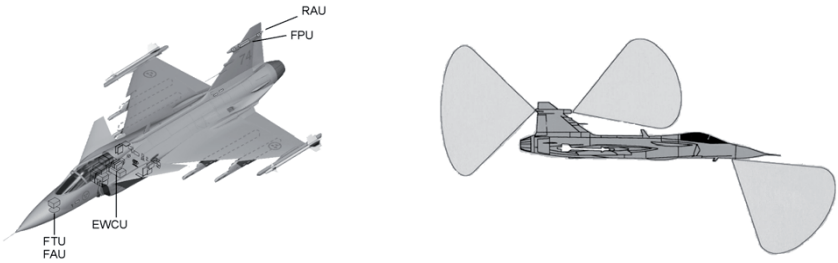
Med brusstörning skapas en högre brusnivå i radarn som döljer målekon och då särskilt ekon som är svagare, dvs. längre bort. I figur 63 visas principen för hur brusstörning fungerar.



Figur 62. Princip för hur DRFM är uppbyggt. (Källa: FOI)



Figur 63. Figurerna visar principiellt hur ekot (spetsig stapel) växer i styrka med minskat avstånd. I den undre figuren har brusstörning tillförts. (Källa: FOI)



Figur 64. Sändarantennernas placering för EWS-39 på JAS. RAU är *Rear Antenna Unit*, FPU är *Fin Pod Unit* och FAU är *Forward Antenna Unit*. (Källa: FOI)

Ett modernt VMS måste kunna anpassa sina störformer beroende på hur hotradarn ändrar sin arbetsmod. Om hotet är ett annat jaktflygplan som använder sin nosradar för spaning, inmätning eller följning så kommer radarn ha olika karaktäristik i de olika arbetsmoderna. Det är då viktigt att ha störmoder som anpassar sig efter den arbetsmod som nosradarn på det fientliga jaktflygplanet använder. Figur 64 visar ett exempel på hur störsändarantennerna kan placeras på ett flygplan.

8.4 VMS Sjö

8.4.1 Inledning

Marina sjöstridskrafter opererar ute till havs, kustnära eller i skärgård på och under ytan. Den marina miljön och de uppgifter som plattformarna skall lösa medför att det finns skillnader i telekrigssynpunkt jämfört med mark och flygförband, vilket också innebär att det blir vissa skillnader på utformningen av VMS.

De marina plattformarna använder sin utrustning för telekrigsinsatser i ett bredare perspektiv där VMS är en delmängd. De större fartygen har ofta möjlighet att också signalspana mot tekniska system (TES), t.ex. radar, och kommunikationsspana (KOS). Fartygen har ofta en operatör ombord som sköter systemen, vilket medför att de har möjlighet att välja mellan manuell och automatisk mod.

Marina fartyg från minsvepare och uppåt i storlek har normalt någon form av telekrigsförmåga och därmed VMS i någon form. Vanligast är att fartyget har en enklare teknisk signalspaningsutrustning (TES) som används för varning. Till detta kopplas normalt någon form av motmedelssystem i form av rems och/eller IR-motmedelskastare. Vissa av dessa system kan dessutom nyttja

kombinationsammunition som har förmåga att påverka radar- och IR-målsökare, TV och lasersikten. Utöver detta medför fartyg som har ytstrids- och luftförsvarsuppgifter dessutom ofta någon form av radarstörare. Utrustning för att störa optik mot olika typer av optronik, såsom robotar såväl som kikare, är spritt inom flera mariner.

8.4.2 VMS inom Sjö

TES används för följande uppgifter i marina sammanhang:

- Egenskydd genom upptäckt av tidskritiska hot som robotar (varning) samt invisning av luftförsvarssystem och motmedel (motverkan)
- Skapande av underlag för bekämpning
- Underrättelseinhämtning och plattformsidentifiering för att skapa en omvärldsuppfattning

Spaningssystem inom optronikområdet används för följande uppgifter inom marina sammanhang:

- Upptäckt av inkommande missiler (passiv robotskotts- och robotvarnare)
- Upptäckt av optik riktad mot egen plattform
- Invisning av IR och laserstörare
- Underlag för insats med facklor och rök

För att arbeta med TES-utrustning som då inkluderar VMS brukar det oftast vara en operatör som hanterar utrustningen. Optikspanare och laservarnare kan arbeta autonomt med möjlighet att förse ledningssystemet med information.

Motverkan mot radarmålsökare genomförs mot inkommande robotar i avhakande syfte och mot motståndarens radar för att minska räckvidden på spaningsradarn. Störningen mot målsökaren i roboten kombineras med att samtidigt göra insats med rems- och IR-motmedel för att på så sätt få en säkrare och snabbare avhakning mot roboten. Är fartyget inte utrustat med radarstörare, används rems- och IR-motmedel i kombination med undanmanöver. Pyrotekniskt genererade motmedel innehåller antingen rems, rök eller IR-facklor alternativt en kombination av dessa. Dessa motmedel används tillsammans med undanmanöver för att avhaka robot eller försvåra sikten för ledstrålestyrda vapen.

Störning mot radar kan genomföras på olika sätt:

- Brusstörning (maskerande)
- Falska mål (mättande, avhakande)
- Vinkelavhakning
- Hastighetsavhakning
- Avståndsavhakning
- Kombinationer av punkterna ovan
- Pyrotekniska motmedel

Störning mot optronik kan genomföras på olika sätt:

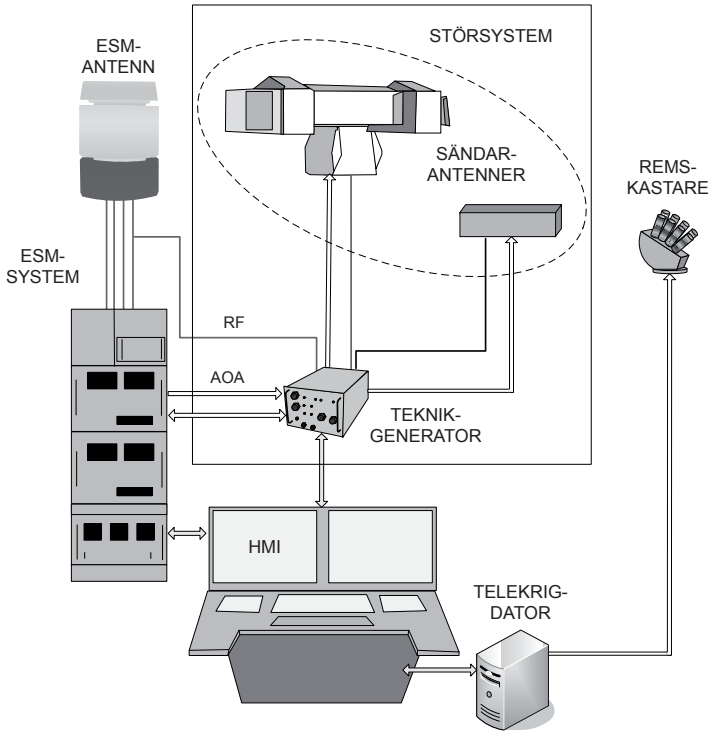
- Pyrotekniska motmedel
- Laserstörare
- IR-störare

Denna typ av störning används mest i form av avhakningsinsats mot robotar med IR- eller kombinationsmålsökare. Laserstörare mot optik har ett stort värde vid inomskärsoperationer för att skydda fartyg som t.ex. har uppgiften att röja minor.

TES (VMS) används för följande uppgifter för ubåtssystemet:

- Egenskydd genom upptäckt av tidskritiska hot (hkp, flyg, ubåtsjaktfartyg)
- Skapande av underlag för bekämpning genom korrelering av sonarinformation
- Underrättelseinhämtning över tiden

Figur 65 visar på principiell uppbyggnad på ett VMS för en fartygsapplikation. Den vänstra delen i bilden är varnardelen med antenn (ESM) som mäter in radarpulser. Antennen har möjlighet att bestämma i vilken riktning som radarpulsen kommer in. De karaktäristiska radarparametrarna mäts in och jämförs mot ett hotbibliotek för identifiering. Efter hotutvärdering påbörjas motverkan genom störsändning med lämplig störform från åtgärdsbiblioteket och/eller remsutskjutning.



Figur 65. Principiell uppbyggnad av VMS för fartygsapplikation. (Källa: FOI)

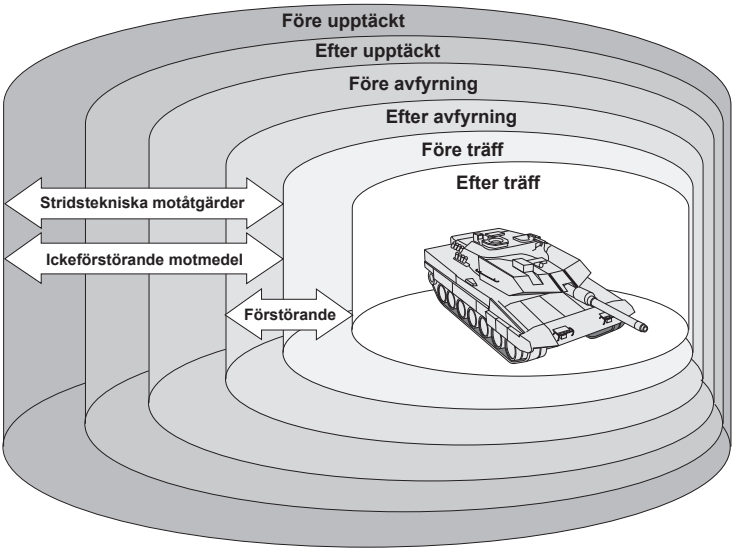
8.5 VMS Mark

8.5.1 Inledning

Till skillnad från Luft och Sjö finns idag, 2006, ännu inget VMS operativt på stridfordon eller motsvarande i FM. Studier pågår inom området och det som redovisas nedan grundar sig till stor del på dessa studier och försök. En skillnad som bör noteras är att i flyg- och sjöfallet skall träff undvikas helt med hjälp av motmedel medan i markfallet har plattformen i sig ofta ett ballistiskt skydd, vilket medför att den kan klara den restverkan som finns kvar från projektilen/roboten efter insats av motmedel.

8.5.2 Systemuppbyggnad

VMS skall ses som en integrerad del av en plattforms eller förbands överlevnad. Interaktion kommer att finnas mellan de olika skalen, och det är viktigt att ingen del suboptimeras. VMS är inte en isolerad del av en plattforms



Figur 66. ”Skyddslöken” i VMS Mark. (Källa: FM, Illustration: Samuel Svärd)

överlevnad utan skall verka i alla faser i ”skyddslöken” (se figur 66) utom i ”efter träff” beroende på typ av VMS och när i duellen som hotet upptäcks. Utmärkande för VMS är dock att interaktionen med hotet påbörjas innan den egna plattformen träffas. VMS kan nyttjas för att:

- Ge högre skyddsnivå i alla riktningar
- Komplettera skyddet i riktningar där brister finns
- Minska vikt med bibehållen skyddsnivå

En viktig del i utformningen av VMS är plattformens grundläggande egenskaper och då särskilt det ballistiska skyddet. Det ballistiska skyddet påverkar utformningen av förstörande motmedel. Förstörande motmedel interagerar i huvudsak med den inkommande stridsdelen; det kan ske på varierande avstånd från den plattform som skall skyddas, beroende på vilken motverkansform som används. Det ballistiska skyddet skall tåla de belastningar som uppstår då motmedlet antänds samt förhindra penetration av den restverkan som fortfarande finns kvar av stridsdelen efter att motmedlet har interagerat med hotet. Om plattformen inte har tillräckligt ballistiskt skydd, finns risk för att interaktionen mellan motmedlet och hotet endast kommer att förvärra effekterna av

restverkan. Det är viktigt att tydligt definiera vad det ballistiska skyddet skall klara av och vad VMS skall klara av.

En annan del som ingår i systemuppbyggnad är SAT (Signatur Anpassnings Teknik). Denna lägger ett grundskydd för plattformen genom att reducera dess signatur i så stor utsträckning som möjligt för att försvåra upptäckt, klassificering och identifiering och därmed reducera motståndarens tidsfönster för bekämpning, samtidigt som det egna tidsfönstret kan utökas och ge tid för stridstekniska åtgärder. En välanpassad signatur kan tillsammans med användandet av motmedel få en bra effekt exempelvis vid avskärmning (rök) eller vilseledning. Man skall dock vara medveten om att användande av VMS ur vissa aspekter ökar den egna plattformens signatur. Aktiva sensorer kan detekteras på mycket långt håll och många sensorer har optik, vilket kan upptäckas med optikspanare.

8.5.3 Motverkanssystem i VMS

Varnardelen inom ett VMS är relativt generisk inom de tre arenorna. Varnarsensorerna arbetar inom olika våglängdsområden och ger en varning till systemet om de detekterar ett hot. Det är miljön och hotbilden som avgör vilka typer av sensorer som används.

Det som framför allt skiljer ett VMS för markbundna plattformar från exempelvis ett VMS för luftfallet är motverkanssystemen. Det har sin koppling till att duellsituationen i markfallet är mer komplex än vad som normalt uppstår i luft- och sjödomänen, t.ex. att antalet plattformar på en liten yta är betydligt fler och att tidsförhållandena kan vara mycket korta då många av hoten ger kort förvarningstid. Inom markdomänen handlar inte VMS enbart om ökad skyddsförmåga genom att påverka inkommande stridsdelar utan det måste också stödja operatören från det att duellen påbörjas till dess att hotet är nedkämpat eller inte kan påverka egen plattform eller förband. Inom markarenan räknar man också med att plattformen har ett visst ballistiskt skydd.

Inom markarenan delas motverkan upp i tre typer: Stridstekniska motåtgärder, icke förstörande motmedel (*soft kill*) och förstörande motmedel (*hard kill*).

8.5.4 Motverkanssystem för plattform

Stridstekniska motåtgärder genomförs som regel manuellt. Operatören/operatörerna får stöd av systemet genom en hotvarning. Stridstekniska motåtgärder är tidskrävande och varningen skall helst komma innan avfyrning har skett. Övriga motverkansformer bör alltid kombineras med stridstekniska motåtgärder för att öka möjligheten till överlevnad. Effekten av en stridsteknisk motåtgärd är starkt beroende på att den utförs vid rätt tillfälle och på rätt sätt. Felaktigt

utförd motåtgärd kan öka hotets möjligheter till effekt. Av den anledningen är presentationen av hotinformation till operatören mycket viktig.

Icke förstörande motmedel är åtgärder som syftar till att minska hotets träffsannolikhet. Detta kan genomföras semiautomatiskt eller automatiskt. Automatiska motåtgärder används då tiden inte medger att operatören kan vara inblandad i motverkansförloppet. Semiautomatiska motmedel används när tiden medger detta eller andra faktorer gör att automatiska motmedel inte kan användas, t.ex. säkerhet, krav på identifiering av hot m.m. Primärt är det plattformens egna sensorer som används. Icke förstörande motmedel bör kombineras med stridstekniska motåtgärder.

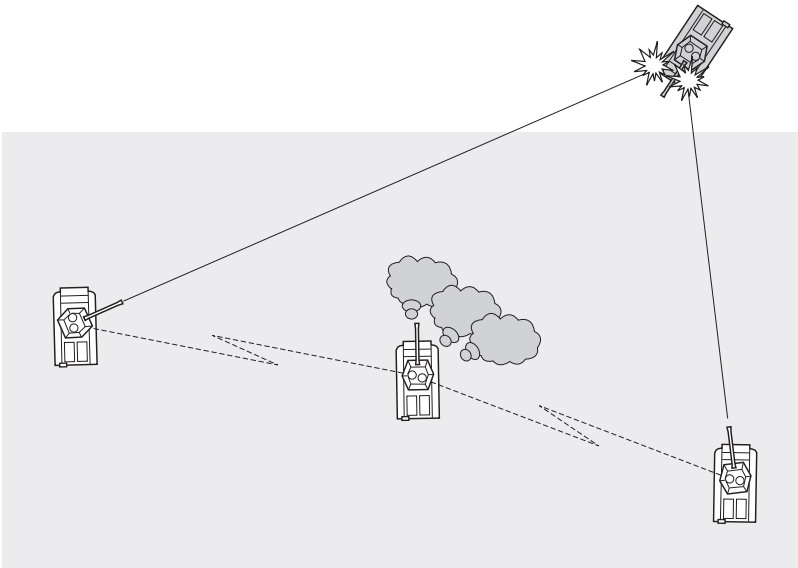
Förstörande motmedel innebär att man mekaniskt påverkar den inkommande stridsdelen och/eller hotets styr- eller invisningsfunktion. Förstörande motmedel genomförs alltid automatiskt. Anledningen till detta är den mycket korta förvarningstiden samt att dessa motmedel kräver stor precision. Denna typ av motmedel arbetar med sensorinformation från den egna plattformen. All förstörande motmedel bygger på att plattformen har tillräckligt bra ballistiskt skydd för att fånga upp kvarvarande restverkan. Förstörande motmedel skall kombineras med stridstekniska motåtgärder.

För att erhålla det skydd som VMS förväntas kunna ge, krävs att hela kedjan från varning till motverkan fungerar. Om någon del i kedjan inte fungerar återstår endast det ballistiska grundskyddet.

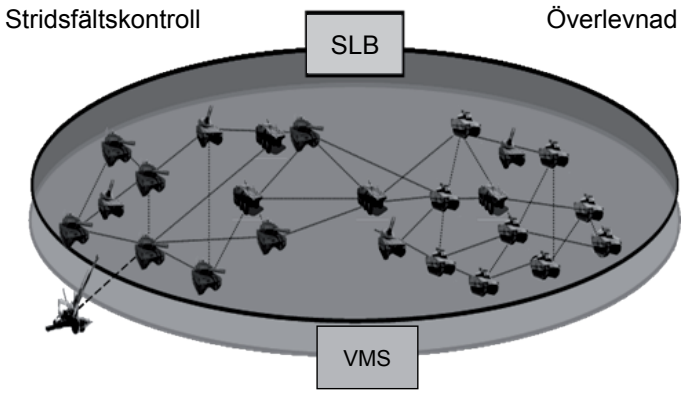
8.5.5 Motverkan i förband

För att kunna hantera hela duellsituationen krävs att både den inkommande stridsdelen och den som levererade stridsdelen hanteras. Stridstekniska motåtgärder, som syftar till att antingen bekämpa/neutralisera den som levererade hotet alternativt manövrera till en plats där hotsystemet ej kan påverka den egna plattformen, måste vidtas. En enskild vagn bedöms ha begränsade möjligheter att påverka hotet. Den kommer ha fullt upp med att överleva den inkommande stridsdelen. Möjligheten att påverka leverantören av stridsdelen är beroende av den egna plattformens skyddsnivå och eldkraft. Ett lätt bepansrad fordon med underlägsen eldkraft kommer troligtvis inte kunna påverka hotet medan t.ex. en stridsvagn kommer att ha helt andra möjligheter.

Studier visar att högst effekt uppnås med stridstekniska motåtgärder i kombination med VMS om man lämnar den enskilda plattformen och övergår till förband. Genom att sända hotinformation till andra plattformar inom förbandet kommer möjligheterna att påverka hotsystemet att öka avsevärt. Den som inte direkt är utsatt för bekämpning har helt andra förutsättningar att bekämpa hotet (se figur 67). Hotinformation från andra plattformar ger på så sätt ett förhandsläge mot hotet.



Figur 67. Den utsatta vagnen kommer ej ha möjlighet att påverka den som levererade hotet.
(Källa: FM, Illustration: Samuel Svärd)



Figur 68. Exempel på överföring av information inom förband. (Källa: FM)

Översändning av hotinformation ger ökad omvärldsuppfattning inom hela förbandet. Den ökade omvärldsuppfattningen kan användas för omedelbara stridstekniska åtgärder för de plattformar som är direkt berörda, men också som beslutsunderlag för chefer i högre nivåer (se figur 68).

8.6 Sensorer för signalspaning

Signalspaning kan bedrivas mot i princip alla aktiva sensorer och sändare inom det elektromagnetiska spektrumet. En stor fördel med signalspaning är att den är passiv och därigenom inte röjer sig, varför motståndaren alltid måste ta hänsyn till att det kan finnas signalspaning i området. Den goda yttäckningen och förmågan att lokalisera, samt att i vissa fall även kunna identifiera, medför att signalspaning har egenskaper som ur ett ledningsperspektiv är attraktivt. Lägger man in signalspaning på en tidsaxel genomförs verksamheten med behovskrav från sekunder till uppemot år. Beroende på tidskravet brukar man dela in signalspaning i två delar: ES (elektronisk support) och SIGUND (signalunderrättelsetjänst). ES arbetar i tidshorisonten sekunder till timmar och har striden i fokus, varför ES genomförs av Försvarsmakten, medan SIGUND arbetar i ett längre tidsperspektiv, från timmar till uppemot år, där Försvarets radioanstalt, FRA, har tyngdpunkten. En exakt gräns mellan ES och SIGUND är svår att dra då verksamheterna går i varandra i viss mån. Skall en skiljelinje dras, får ES anses stödja taktiska aktiviteter och nedåt inkluderande telekrig, medan SIGUND stödjer från regeringsnivån ned till taktiska chefer. Vidare levererar SIGUND även tekniska data som är underlag för bl.a. telekrigsbiblioteksproduktion.

Signalspaning delas in i två delar: kommunikationsspaning (KOS) och teknisk signalspaning (TES). KOS innehåller två komponenter, varav den ena är att lokalisera och genom krysspejling positionera sändaren samt identifiera vilken typ av sändare det är för att sätta in den i ett organisatoriskt sammanhang, och den andra är att lyssna av, och även spela in, vad som sägs under kommunikationen. Teknisk signalspaning är mer inriktad på, utöver lokalisering, att identifiera och registrera en sändares parametrar såsom prf, sändfrekvens och pulslängd för att avgöra typ av sändare inom t.ex. radarområdet. Denna information ligger sedan bl.a. som grund för att producera telekrigsbibliotek till VMS. Radarvarnare på plattformar arbetar enligt samma princip som en signalspaningssensor, men i VMS sammanhang har den som primärt syfte att skydda plattformen.

En signalspaningssensor arbetar med att sortera signalerna efter särskiljande parametrar, sådana som skiljer ut sändaren. För pulssortering (för dessa parametrar krävs endast en puls) används framför allt:

- Infallsriktning
- Pulslängd
- Bärfrekvens

Utöver detta kan signalspaningen bestämma andra egenskaper hos radarn såsom pulsrepetionsfrekvens, antenndiagram, arbetsmod (sökning) eller vinkelföljningsmod (monopuls, lobnutation), men för detta krävs två eller flera pulser för att kunna bestämma egenskaperna. Exempel på slutsatser som kan dras är typ av radar, prestanda avseende vinkel- respektive avståndsupplösning, position och störskyddsegenskaper.

Inmätta signaldata kan användas både tekniskt och taktiskt. Exempel på data som kan mätas in är frekvens och frekvensväxlingsmöjligheter som talar om hur ofta radarn kan byta frekvens, mellan vilka frekvenser den kan hoppa och vilken PRF radarn använder. Vidare kan man efter analys bestämma pulskoden som används för pulskompression. Dessa data kan användas taktiskt för att optimera störeffekten, såsom när störaren bör startas upp och hur störformen skall vara utformad. Ur ett tekniskt perspektiv kan samma data användas som underlag för att klassificera radarn och kombinerat med andra data användas till hotbiblioteksproduktion.

KOS inom VHF-området genomförs från olika plattformar; räckvidden är beroende av höjden som signalspaningsantennen befinner sig på. Ett flygplan som befinner sig på 3 000 meters höjd täcker ett område med en radie på 250 km, medan en markpejl täcker en yta med en radie på 30 km, för att upptäcka en 50 W sändare. Global signalspaning sker med satelliter på frekvensområden från VHF-området och uppåt, och även relativt svaga signaler fångas upp. Ett växande område är att använda UAV:er för signalspaning, som en följd av att sensorerna minskar både i storlek och vikt.

8.7 Dataförsörjning VMS

För att moderna varnings- och motverkanssystem skall ha avsedd verkan krävs att de laddas med omvärldsinformation, s.k. telekrigbibliotek. Dessa bibliotek innehåller information dels om emittrar (sändare) och vapensystem, för identifiering, dels om olika motmedelsåtgärder, för egenskydd. Utan denna information fungerar inte telekrigsystemen fullt ut.

Vissa typer av system kan verka med begränsad funktionalitet i de fall de är bemannade av en signalspaningsoperatör, medan det för andra system uppstår ett fullständigt funktionsbortfall om information saknas. Utan information om emittrar (sändare) och vapensystem kan systemen inte identifiera signaler från omvärlden. På sin höjd kan man avgöra vilken kategori av emitter det

är frågan om (flyg, luftvärn etc.) men det går inte att bestämma nationalitet och/eller exakt typ. Kan man inte säkert identifiera omgivande emittrar är det också omöjligt att avgöra om de är farliga eller inte, och det går följaktligen inte att bedöma om egen insats är nödvändig för att skydda den egna plattformen. Vidare finns risk för vådabekämpning av egna plattformar.

Utan kunskap om vilka motmedelsåtgärder som är effektiva mot olika fientliga system går det heller inte att skydda sig mot dessa. Det som är effektivt mot ett system kan ha direkt motsatt verkan mot ett annat. T.ex. kan radarstörning vara effektivt mot vissa typer av vapen, men mot en signalsökande robot blir effekten att roboten får lättare att bekämpa sitt mål. Att fälla remsor kan vilseleda vissa typer av robotar, medan andra bara ser ett större mål och lättare hittar sitt mål.

För att kunna producera ett hot- och åtgärdsbibliotek, telekrigsbibliotek, krävs att det finns kunskap inom ett antal olika discipliner inom telekriget och en väl anpassad produktionslina. Grunden för att tillverka bibliotek är kunskap inom följande fyra områden:

- Information om vilka vapensystem och emittrar som kan uppträda i den fysiska arenan. Det omfattar såväl fientliga, egna, neutrala och civila system. Detta kallas med en engelsk term för EOB, *Electronic Order of Battle*.
- Goda tekniska underrättelser om ovan nämnda vapensystem och emittrar.
- God kännedom om de egna telekrigsystemens funktionalitet och kapacitet.
- Goda taktiska kunskaper avseende både egen och motståndarens taktik.

Att känna till vilka vapensystem och emittrar som kan uppträda i och i närheten av operationsområdet är avgörande för att tillverka bibliotek. Vid tillverkning måste man begränsa antalet emittrar och vapensystem i biblioteken, dvs. det går inte att ta med allt som finns därför att VMS systemdator inte klarar att hantera så mycket information på tillräckligt kort tid. Dessutom kan det uppstå problem för systemet att identifiera en sändare om det finns för mycket och till delar onödig information. Det är också viktigt att även ha med neutrala och civila system för att kunna identifiera och avskriva dessa system vid en hotanalys, bl.a. för att undvika vådabekämpningar.

Att ha goda tekniska underrättelser om vapensystem och emittrar krävs för att få god kvalitet på biblioteken. Identifiering av emittrar görs ibland med hjälp av mycket små skillnader i de mottagna signalerna, vilket ställer stora krav på information om emittrarnas karakteristik. Även information om vapensystemens prestanda, t.ex. räckvidder, är viktiga för att programmera varnings- och motverkanssystemet (VMS) rätt. Denna information erhålls genom egen signalspaning och teknisk underrättelsetjänst.

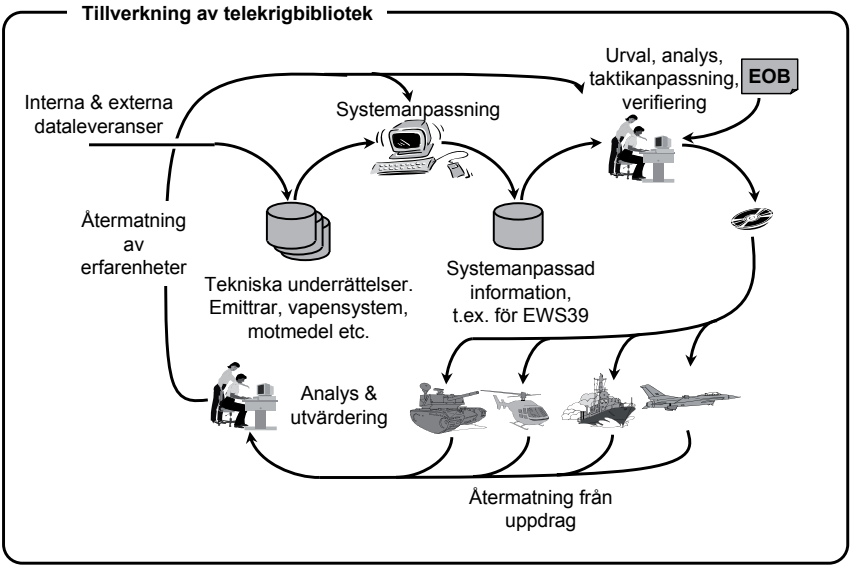
Informationen finns inte inprogrammerad i VMS vid leverans från industrin, utan varje nation ansvarar själv för att samla in och bearbeta denna information så att den passar de egna telekrigsystemen. Varje VMS skräddarsys för det egna landets och plattformers behov. Denna typ av information omgärdas ofta av hög sekretess, varför det är nödvändigt att ha kompetensen och tillgången till information inom rikets gränser.

Det krävs även god kunskap om de egna varnings- och motverkanssystemens funktionalitet och kapacitet. Olika varnarsystem för identifiering uppfattar ofta samma emitter på olika sätt. Det beror dels på systemets olika karakteristik på t.ex. antenner och annan mottagarutrustning, dels på hur systemet bearbetar signaler samt dess sätt att karakterisera signaler. För att tillverka bra bibliotek för identifiering krävs att man har god kunskap om dessa egenskaper för sitt system. Även motmedelsystemens funktionalitet och kapacitet är viktig att känna till, t.ex. kan olika störutrustningar ha olika prestanda. Även för fällarsystem för facklor och remsor krävs god kunskap om de egna systemen för att kunna tillverka effektiva bibliotek. Denna information finns inte inprogrammerad när systemet köps och går heller inte att köpa, utan måste tas fram av varje nation själv, ofta genom långa och komplexa utprovningar. Denna information är, som tidigare nämnts, alltid omgärdad av mycket hög sekretess.

Baserat på ovanstående information skräddarsys telekrigbiblioteken för respektive plattform och uppdragstyp. Det är t.ex. stor skillnad på innehållet i ett bibliotek avsett för ett marint system, där det oftast finns en operatör som tolkar informationen från systemen, och ett bibliotek avsett för ett flygande system, där piloten inte har tid att tolka informationen i samma utsträckning. Hotbilden skiljer sig också väsentligt åt, vilket påverkar hur telekrigsbiblioteket utformas. Det ställs även olika krav på bibliotekens innehåll beroende på uppdragstypen. Vid t.ex. flygning på hög höjd med en JAS 39 är vissa vapensystem ofarliga pga. att dess maximala höjd är lägre än flyghöjden, medan ett uppdrag med en JAS 39 på låg höjd medför en helt annan hotbild, varför det kan krävas två bibliotek, ett för varje typ av uppdrag. För att kunna väga in sådana aspekter krävs taktisk kunskap av de personer som tillverkar dessa bibliotek, dels om den egna plattformen men också, om möjligt, kunskap om motståndarens taktik och uppträdande.

Efter genomfört uppdrag genomförs såväl taktiska som tekniska analyser av hur telekrigsystemen och dess bibliotek fungerat. Den kunskap och de erfarenheter man får från dessa analyser används bl.a. för att ytterligare förbättra telekrigbiblioteken och därigenom få bättre funktionalitet i telekrigsystemen, och att bidra till effektivare och säkrare insatser för förbanden. Processen att tillverka telekrigbibliotek beskrivs schematiskt i figur 69.

Data från externa och interna leverantörer struktureras och lagras i olika databaser beroende på innehåll. Datan betraktas som rådata och kan inte användas



Figur 69. Principiell process för tillverkning av telekrigsbibliotek. (Källa: FM)

i telekrigsystemen, varnings- och motverkanssystemen, utan anpassning. För att datorn i ett VMS skall kunna hantera informationen krävs att den anpassas, vilket sker vid systemanpassningen. När detta är genomfört lagras den anpassade datan i en ny databas som är dedikerad för ett visst VMS. När ett bibliotek skall produceras är det ur denna databas man hämtar information och gör sitt urval av emittrar m.m. När biblioteket är producerat, verifieras det innan det sänds ut till förbanden för användning. Efter genomfört uppdrag återmatas information för analys och utvärdering. Vid behov uppdateras databasen för att förbättra kvaliteten på nästa bibliotek som produceras.

Tidsaspekten för att tillverka telekrigsbibliotek varierar beroende på i vilken fas i systemets livscykel man befinner sig. Vid införskaffande av ett nytt telekrigsystem krävs djupgående analys och utprovningar för att lära känna systemet och komma fram till hur informationen skall anpassas för att ge bästa möjliga effekt. Det handlar ofta om flera år innan tekniskt och taktiskt väl fungerande bibliotek kan produceras. Därför är det viktigt att denna process påbörjas så tidigt som möjligt, långt innan systemen är färdiga att levereras till förbanden.

Vid nya missioner, i nya geografiska områden, krävs också en längre förberedelsetid. Då handlar det inte om att lära sig systemen, utan om att lära sig signalmiljön och hotmiljön i missionsområdet. Det gäller att ha en korrekt

Electronic Order of Battle och att anpassa eventuell ny information till de egna telekrigsystemen. Det kan handla om från veckor till månader i förberedelsetid, beroende på tillgång till information och komplexitet.

Man får också vara beredd på att göra större modifieringar av biblioteken i inledningsskedet av nya missioner. Under en pågående mission kan det dyka upp ny information som påverkar innehållet i biblioteken, t.ex. nya hotsystem och emittrar. Dessa måste då införlivas i biblioteken. Denna process löses normalt inom loppet av timmar eller dagar. Detta arbete underlättas väsentligt om det finns erfaren telekrigspersonal på plats vid en mission som kan samarbeta såväl med förbanden som med stödorganisationer hemma i Sverige.

För att lösa de korta tidsförhållandena som gäller under en mission har man ett mobilt produktionssystem med personal på plats med förbandet under missionen, och kontakt med grundorganisationen i Sverige. Det som inte kan lösas på plats skickas hem för att bearbetas på hemmaplan med de större resurser som finns att tillgå där.

Inom Försvarsmakten ansvarar Försvarsmaktens Telekrigstödenhet (FM TK SE) för att förse förbanden med telekrigbibliotek, hot- och åtgärdsbiliotek, till sina telekrigsystem. FM TK SE är en försvarsmaktsgemensam organisation som har ansvar för Försvarsmaktens samtliga operativa telekrigsystem. De har ett nära samarbete med förbanden, andra delar av Försvarsmakten samt närliggande myndigheter, t.ex. FMV, FOI och FRA.

9. Datafusion

Informationen från en enda sensor är oftast inte tillräckligt för att ge operatören all den information han/hon behöver för att fatta ett beslut. Det krävs information från flera sensorer eller multisensorsystem för att t.ex. få bättre yttäckning, säkrare klassificering eller identifiering och noggrannare positionering. Den process som bearbetar data från en eller flera sensorer så att det blir presenterbar och förstålig information kallas datafusion. Datafusion är en väsentlig del i multisensortekniken och kan enkelt sägas vara ett sätt att reducera datamängder utan att i motsvarande grad minska informationsinnehållet.

Det finns många olika typer av sensorer inom det elektromagnetiska spektrumet; de levererar information på olika sätt och med olika kvalitet. Genom datafusion där man kombinerar data från flera olika typer av sensorer kan ofta en högre noggrannhet, säkerhet och positionering erhållas.

Kraven på vad sensorer och multisensorsystem skall klara av skiljer sig mycket beroende på vilken typ av användare som skall använda informationen. En soldat, ett flygplan eller en ledningscentral har alla behov av att få information från sensorer men användarkraven är olika.

Soldaten:

- Kräver detaljerad lägesbild över ett relativt litet område
- Är beroende av andra sensorer, men klarar begränsad informationsinhämtning på egen hand
- Fattar beslut inom sekunder-minuter
- Kan ha tid att efterfråga information från nya sensorer

Flygplanet:

- Kräver medelstor yttäckning
- Har ofta egna sensorer som står för majoriteten av informationsinhämtningen
- Kan kräva att beslut fattas inom delar av en sekund
- Kan sällan skicka ut nya sensorer, men kan välja mellan olika tillgängliga sensorer
- Förfogar över delsystem som utgör autonom datafusion

Ledningscentralen:

- Kräver stor yttäckning men med låg detaljnoggrannhet
- Tar emot data från många olika typer av källor med ibland motstridig information
- Har ett perspektiv som sträcker sig över flera timmar/dagar
- Har relativt gott om tid att sända ut nya sensorer för att komplettera existerande data

Sammantaget visar denna enkla sammanställning att kraven på sensorer och datafusion skiljer sig åt. Tillgången till sensorer är och kommer att förbli begränsad, så för att få ut maximal information av sensorerna och datafusionen krävs att sensorerna styrs enligt ett regelverk som klargör vad som gäller för resursutnyttjande och vid resursbrist. En förutsättning för att sensordatafusion skall bli effektiv och användbar för alla nivåer är tillgången till ett nätverk.

Fördelarna med att fusionera data i ett multisensorsystem eller på högre nivå med ett relativt stort antal sensorer är flera:

- Sensorer mäter olika typer av signaler och om de härrör från samma objekt, kan skilda objektegenskaper extraheras från respektive sensor. Med redundant information kan tillförlitligheten och robustheten ökas.
- Sensorsystemen kan göras adaptiva, dvs. de kan styras av den information som tas fram. Detta leder till att data från en sensor, t.ex. en IR-sensor, kan påverka styrningen av en annan, t.ex. en radarsensor.
- Det ger möjlighet att utnyttja sensorer som arbetar inom skilda våglängdsområden. Detta förbättrar informationen i det ostörda fallet, men framför allt försvårar det möjligheten till utstörning inom samtliga våglängdsområden samtidigt.

- Genom nätverkskoppling av sensorer kan sensordata flexibelt sändas dit data behövs, antingen för fusion eller för andra ändamål.
- Utan fusion flödar mängder av disparata data, och det blir svårt att beakta mer än en sensor i taget.
- Med fusion fås vinster när ofullständiga data sammanställs, t.ex. bäringar eller akustiska data.
- Med fusion kan passiva sensorer utnyttjas i högre grad för att reducera röjningsrisk.
- Fusion skapar möjlighet att automatiskt klassificera mål.

För att kunna hantera sensordata och därmed datafusion strukturerat krävs någon form av arkitektur. Två ytterligheter är centraliserad respektive distribuerad arkitektur. Fördelen med en centraliserad arkitektur, där data från alla sensorer skickas till en centralpunkt i nätverket för datafusion, är att med denna typ av arkitektur behandlas alla rådata samtidigt. Detta ger teoretiskt högsta möjliga kvalitet på det fusionerade slutresultatet. Nackdelen är att det kräver stor bandbredd för att kunna skicka alla data och att systemet dessutom blir sårbart. Den distribuerade arkitekturen kräver att data förbehandlas i sensorn innan det skickas vidare. Det innebär att datan är komprimerad och inte innehåller så mycket information när den skall fusioneras. Jämfört med centraliserad arkitektur behöver då inte lika mycket data sändas i nätet och det är inte lika sårbart eftersom informationen är distribuerad. I verkligheten används oftast en kombination av de bägge ytterligheterna.

Källförteckning

FM, 1997: *Telekrig: Lärobok för armen* (Stockholm: Försvarsmakten).

FM, 2004: *Lärobok i telekrigföring för luftvärnet* (Stockholm: Försvarsmakten).

FM, 2005: *DLuftO: Doktrin för luftoperationer*, M7740-774022 (Stockholm: Försvarsmakten).

FMV, 2005: ”Teknisk Prognos 2005”, VO Stra Mtrl, 21121:57900/2005.

FOI, 2001: *Elektromagnetiska vapen och skydd ,* FOI orienterar om nr. 1 (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut FOI).

FOI, 2004: *Sensorer*, FOI orienterar om nr. 3 (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut FOI).

FOI, 2005: *Telekrig*, FOI orienterar om nr. 5 (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut FOI).

Grenander, Gunnar, 1986: *Vapenlära för armén: Vapenlära A* (Stockholm: Chefen för armén i samarbete med Försvarets läromedelscentral (FLC)).

Handbok Telekrig Maritima arenan, utgåva 2006 ä1.

Harney, Robert C., 2004: ”Combat Systems: Volume 1, Sensor Elements, Part I, Sensor Functional Characteristics”, 30 January.

Harney, Robert C., 2004: ”Combat Systems: Volume 2, Sensor Elements, Part II, Sensor Technologies”, 30 January.

Harney, Robert C., 2004: ”Combat Systems: Volume 3, Engagements Elements, Parts I & II, Electromagnetic Weapons & Projectile Weapons”, 30 January.

Ny Teknik, nr. 50, 2006.

Rapport studie/studieförsök VMS strf (ATK SF 99067), 2006-04-03, bilaga 1 (utkast).

Stimson, George W., 1998: *Introduction to Airborne Radar* (Mendham, N.J.: Mendham).

Wistrand, Gunnar, 2001: ”Tekniska utvecklingstrender”, Analys 23210:2515/2001, FMV.

Om bokens författare

Boken har skrivits av lärare vid Försvarshögskolan (FHS). Dessa har som regel lång erfarenhet från sitt ämnesområde och/eller har disputerat inom detsamma.

KRISTIAN ARTMAN är överstelöjtnant i Flygvapnet och flygingenjör.

ANDERS WESTMAN är major i Armén. Westman var lärare i Militärteknik vid Försvarshögskolan i Stockholm 2002–2006.

Serien ”Lärobok i Militärteknik”

Nr. 1 Kurt Andersson, Kristian Artman, Magnus Astell, Stefan Axberg, Hans Liwång, Anders Lundberg, Martin Norsell och Lars Tornérhielm, *Lärobok i Militärteknik, vol. 1: Grunder* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-72-7.

Nr. 2 Kristian Artman och Anders Westman, *Lärobok i Militärteknik, vol. 2: Sensorteknik* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-73-4.