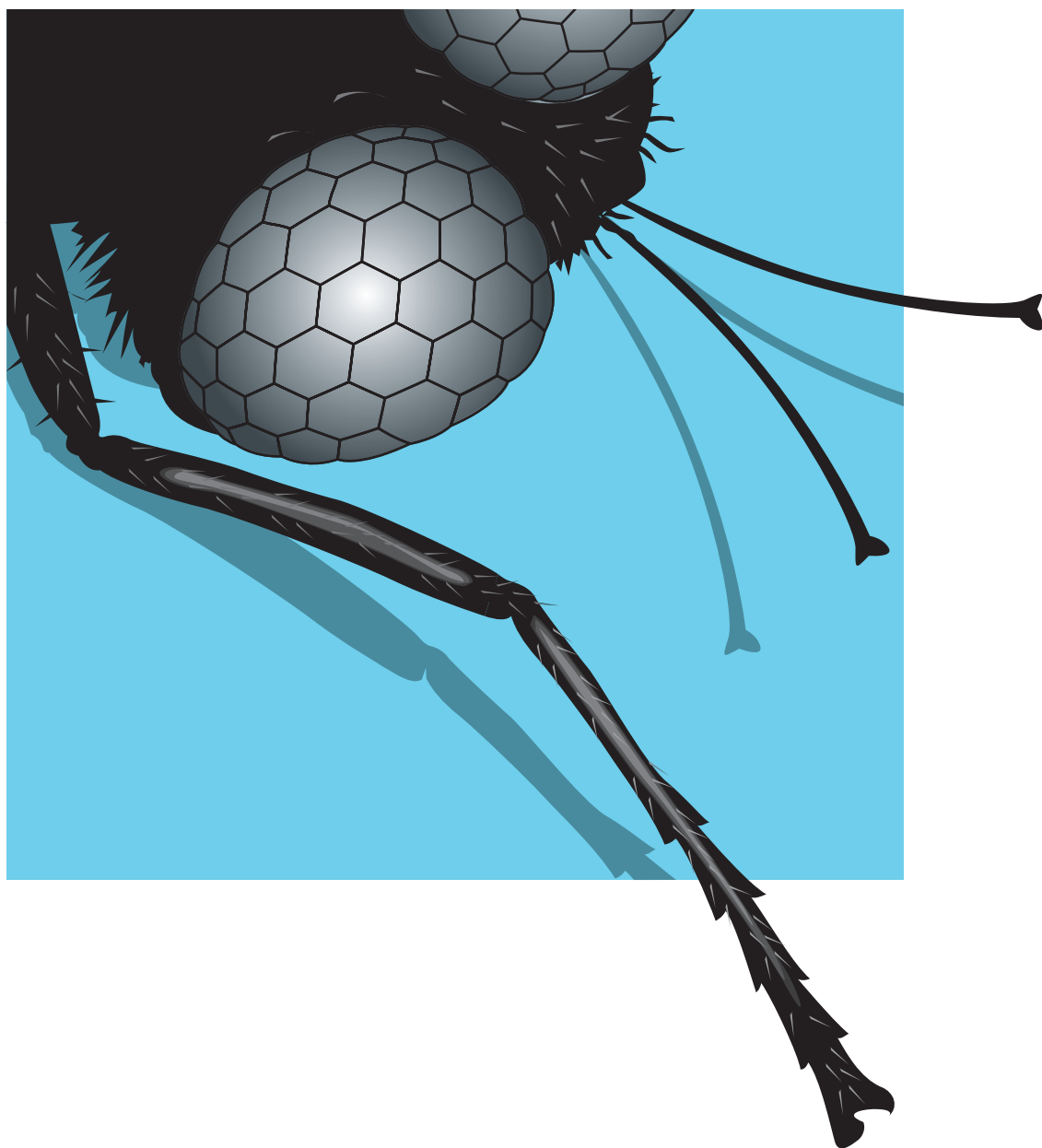


Sensorer



I detta OM-nummer behandlas sensorer för försvarstillämpningar. Det är ett stort, aktuellt och dynamiskt område med intresse inom flera samhällssektorer.

FOI (tidigare FOA) har vid flera tillfällen i ett tidigt skede bedrivit forskning inom nya delområden. Några exempel är utvecklingen av teknik för värmekameror, datorbaserad bildbehandling och avbildande VHF-UHF-radar. De accentuerade marina satsningarna från ubåtsjaktens dagar på 1980-talet har medgivit utveckling av bättre akustiska och elektromagnetiska sensorsystem samt att avancerade modeller för taktiskt operatörsstöd tillkommit.

Dagens forskning styrs bland annat av behovet av tillgång till aktuell lägesbild. Detta gäller för alla nivåer inom försvaret, från den övergripande nivån ned till den i främmande land utposterade enskilde soldaten. Aktuell lägesbild är viktig även för andra verksamheter som exempelvis trafik- och miljöövervakning. Ett stöd till detta är utvecklingen av nätverkssystem där noder i nätverket utgörs bland annat av samverkande sensorer.

Några möjliga framtida trender inom sensorområdet är användning av avancerade algoritmer, multifunktionsaperturer, miniatyrisering och autonomitet.

Allt detta pekar på att sensorforskning är ett område med en spännande framtid. Jag hoppas att FOI med denna skrift kan öka medvetandet inom Totalförsvaret och övriga samhället för betydelsen av sensorutvecklingen och några av dess tillämpningar.



Madelene Sandström
Generaldirektör

Sensorer

Den här boken kan beställas från
TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT (FOI)

INNEHÅLL

INLEDNING	5
HYDROAKUSTISKA SENSORER	10
ELEKTROMAGNETISKA SENSORER FÖR MARINT BRUK	19
SENSORER FÖR SEISMIK OCH AKUSTIK	30
KEMISKA SENSORER (LUKTSENSORER)	35
ELEKTROOPTISKA SENSORER	36
RADARSENSORER	54
SIGNALSPANINGSSSENSORER	73
DATAFUSION, SENSORSTYRNING OCH SENSORER I NÄTVERK	78
MOTVERKAN MOT SENSORER	86
FÖRKORTNINGAR	91
LITTERATURLISTA	93

Redaktion: Åke Wiss, Göran Kindvall. **Medverkande experter:** Anders Alm, Eva Dalberg, Eva Hedborg-Karlsson, Martin Holmberg, Peter Karlsson, Fredrik Kullander, Björn Larsson, Dietmar Letalick, Björn Lindgren, Björn Lundqvist, Per Morén, Malin Mårtensson, Anders Nelander, Lars Petterson, Dan Strömberg, Ain Sume, Thomas Svensson. **Illustrationer:** Martin Ek.

Storheter och beteckningar

Följande storheter förekommer i text och faktarutor:

Storhet	Enhet	Enhets-beteckning	Kommentar
Längd	meter	m	
Tid	sekund	s	
Massa	kilogram	kg	
Ström	ampere	A	
Kraft	newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
Energi	joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
Effekt	watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
Spänning	volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$
Resistans	ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
Elektrisk laddning	coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
Frekvens	hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
Tryck	pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
Vinkel	radian	rad	$1 \text{ rad} = 180/\pi^\circ \text{ (grader)} = 10800/\pi' \text{ (bågminuter)}$
Rymdvinkel	steradian	sr	

I skriften används även följande beteckningar:

Storhet	Storhetens beteckning	Enhet	Kommentar
Våglängd	λ	m	
Effekttäthet	I eller S	W/m^2	I lasersammanhang används ofta irradians synonymt. För en pulsad källa används energitäthet J/m^2 .
Divergens	θ	rad	
Transmission	η	-	Procent
Elektrisk fältstyrka	E	V/m	
Impedans	Z	Ω	
Bandbredd	B	Hz	
Effekt	P	W	
Magnetfält	H	A/m	

Se'nso'r (från latinets *sen-tire*, 'känna (av)'), anordning som känner av absolutvärdet eller ändringen av en fysikalisk storhet (som tryck, temperatur, flödes hastighet, pH-värde eller intensiteten för ljus, ljud eller radiovågor) och omvandlar informationen till en form som lämpar sig för ett datainsamlade system. Sensor är även en annan benämning på givare och inkluderar då även signalbehandling; ibland används termen enbart för den primära omvandlaren.

Källa: Nationalencyklopedin och Merriam Webster's Online Dictionary (www.britannica.com)

För synligt ljus är ögat den sensor vi är mest bekanta med. Det vi ser beror inte enbart på ljusstyrkan utan även på kontraster och skillnader i färg relativt bakgrunden. Det ljus föremålet sänder ut till ögat påverkas också av absorption, spridning och reflektion i luften. Dessa fenomen påverkas i sin tur av meteorologiska faktorer.

Olika sensortekniker har olika typiska egenskaper. För varje sensorteknik varierar dessutom sensorernas specifika egenskaper, exempelvis med frekvensen.

I denna skrift avses med sensorer system avsedda för att detektera och karakterisera olika typer av objekt eller verksamheter. Detektionen sker utifrån de karakteristika som objekten

sänder ut eller reflekterar, främst mekaniska eller elektromagnetiska vågfenomen.

Sensorer presenteras inom områdena hydroakustik, elektromagnetik för marint bruk, seismik, akustik, luktsensorer, elektrooptik, radar, samt signalspaning. Detta innebär att sensorer inom exempelvis NBC-området inte behandlas.

För att skapa större förståelse för den verklighet i vilken sensorerna skall fungera finns, utöver beskrivningar av de olika sensortyperna, även avsnitt som beskriver datafusion och sensorstyrning samt motverkan mot sensorer.

Passiva och aktiva sensorer

Övergripande kan sensorer indelas i två huvudtyper. *Passiva sensorer* sänder inte ut någon egen signal, utan består enbart av mottagare. Objektet uppträcks genom att det emitterar (avger) eller reflekterar en detekterbar signal (ljud, värme, ljus, vibrationer, lukt etc.). Exempel på passiva sensorer är IR-sensorer och signalspanings-sensorer. *Aktiva sensorer* utnyttjar en sändare som sänder ut en signal mot objektet. Signalen fortplantas i mediet, reflekteras i objektet och fångas upp av en mottagare. Exempel på aktiva sensorer är radarsensorer och aktiva sonarer.

Mediet

Mediet mellan sensorn och objektet påverkar signalens utseende. En vågs utbredning, oavsett om denna sker i luft, vatten

eller mark, påverkas av ett antal faktorer, exempelvis dämpning, strålbrytning, strålspridning och flervägsutbredning. Dessa faktorer måste hanteras vid analysen av signalen.

Val av sensorer

Sensorer kan bäras av plattformar i alla medier. Sensorer används för olika syften såsom spaning, övervakning, eldledning, navigering, varning och målsökning.

Valet av sensor och frekvensområde görs utifrån syftet, och är alltid en kompromiss mellan olika krav, såsom:

- räckvidd
- täckningsgrad
- rumslig upplösning
- tidsupplösning
- röjningsrisk.

Till detta kommer en rad andra begränsningar. Sensorer på en plattform kan exempelvis ha begränsningar vad gäller fysisk storlek och vikt beroende på plattformens lastkapacitet. För plattformar som bär många sensorer är det dessutom viktigt att säkerställa att sensorerna inte stör varandra.

En sensortyp har både för- och nackdelar jämfört med andra sensortyper. Genom att kombinera olika sensortyper fås en multisensor. Exempelvis lämpar sig okyllda IR-sensorer, som är mer effektsnåla och mindre skrymmande än kyllda, för små, mobila multisensorer, vilka i övrigt kan innehålla t.ex. akustiska, seismiska och magnetiska sensorer.

Vågutbredning

Enligt ovan är sensorer i huvudsak system som kan detektera mekaniska eller elektromagnetiska vågfenomen. Nedan presenteras några grundläggande egenskaper hos dessa vågfenomen.

En vågrörelse uppkommer och breder ut sig genom att energi växlar mellan två olika former. För elektromagnetiska vågor utgörs dessa former av elektrisk och magnetisk energi. För mekaniska vågor utgörs formerna av rörelseenergi (kinetisk energi) och elastisk energi (fjädringsenergi, deformationsenergi), vilken har samma karaktär som

LIKHETER MELLAN MEKANISKA OCH ELEKTROMAGNETISKA VÅGOR

De mekaniska och de elektromagnetiska fenomenen är olika till sin natur, men för bägge typerna av vågor gäller att de:

- transporterar energi men inte materia.
- kan passera varandra utan att påverka varandra (superpositionsprincipen).
- kan böja av runt hörn.
- beskrivs av liknande matematiska samband, t.ex. den s.k. vågekvationen.

lägesenergi (potentiell energi). En fysikaliskt fullständig benämning på mekaniska vågor i analogi med elektromagnetiska vågor är därför elastokinetiska vågor.

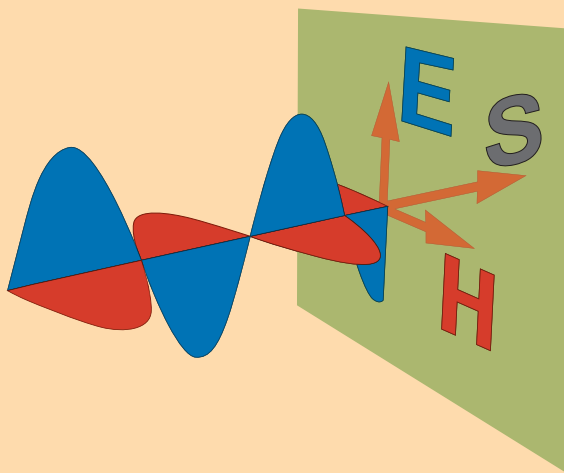
Mekaniska vågor kräver ett materiellt medium för sin utbredning, elektromagnetiska vågor kräver inget sådant medium.

ELEKTROMAGNETISKA VÅGOR

Elektromagnetiska vågor har alltid funnits runt omkring oss. De bildas naturligt som termiskt brus, av åska och i Vintergatan. Den tydligaste formen är vanligt ljus. Teorin för elektromagnetiska vågor beskrivs av Maxwells ekvationer från 1864, från vilka man drog slutsatsen att ljus är en sådan våg, med mycket kort våglängd, eftersom ekvationernas predikterade våghastighet var densamma som ljusets uppmätta $3 \cdot 10^8$ m/s i vakuum (299 792 458 m/s för att vara exakt). Elektromagnetiska vågor i form av radiovågor påvisades experimentellt av Hertz år 1888, varefter utvecklingen och den praktiska användningen accelererade.

Medan en orörlig laddning endast genererar ett statiskt elektriskt fält (med avståndsberoende $\sim 1/R^2$) och en konstant ström genererar ett statiskt magnetfält, behövs accelererade laddningar, d.v.s. en tidsvarierande ström, för att generera strålning av elektromagnetiska vågor. Dessa vågor kan utbreda sig i en dimension, som i en kabel eller vågledare, i två eller fritt i alla tre rumsdimensioner, men vi begränsar oss nedan till det senare fallet. Strålningen beskrivs genom det *elektriska fältet* E [V/m] och det *magnetiska fältet* H [A/m]. Det är oftast praktiskt att tänka sig strömmar som oscillerar på ett sinusformigt sätt i tiden med en viss frekvens, f [Hz], och genererade vågor får då våglängden $\lambda = c/f$. En godtycklig tidsvariation kan sedan alltid sättas samman genom en summation (eller integration) av frekvenskomponenter.

Då strålningens källa, den elektriska strömmen, har en riktning (är en vektor) har även E - och H -fälten det. På stort avstånd från sändaren kan vågen lokalt betraktas som plan och både E och H ligger då i fas med varandra (är tidssynkrona). De är dessutom vinkelräta dels mot varandra, dels mot utbredningsriktningen samt har en bestämd relation så att $E/H = Z_0 \approx 377 \Omega = \text{vågimpedansen}$. Vågens *effektäthet* S [W/m²] ges av produkten av fälten, se figur F1. Vågen från en källa divergerar dock och i fri rymd avtar fälten alltid som $1/R$ och effektätheten som $1/R^2$. Riktningen på det elektriska fältet benämns vågens *polarisation* och en given fältriiktning kan alltid delas upp i två fördefinierade polarisationskomponenter, t.ex. vertikal, horisontell, högercirkulär eller vänstercirkulär.



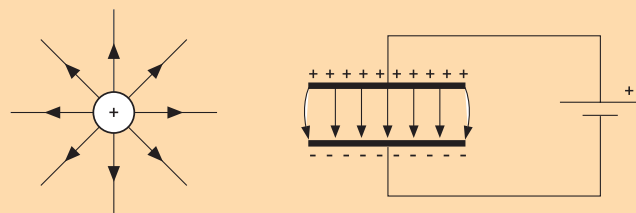
Figur F1. Linjärpolariserad plan elektromagnetisk våg. De elektriska och magnetiska fälten ligger vinkelrätt och i fas med varandra.

När vågen väl kommit ut i vakuum (luft är ofta likvärdigt med vakuum) utbreder den sig i rät linje med konstant hastighet för alla frekvenser. En puls kommer därför att behålla sin form. Om mediet inte är vakuum kan det ha *förluster* (t.ex. en viss elektrisk ledningsförmåga) och vågen dämpas så att den förutom sin divergens också avtar exponentiellt. Mediet kan också vara *dispersivt* så att olika frekvenskomponenter går med olika hastighet varvid hastigheten för själva pulsens envelopp går långsammare, med en s.k. *grupphastighet*, och också så att pulsformen distorderas.

Om mediet är inhomogent, d.v.s. dess egenskaper varierar med position, händer olika saker. Om inhomogeniteten är svag kommer vågen att böjas av, t.ex. som vid ett höjdberoende brytningsindex i atmosfären och kortvågors reflektion i jonosfären. Vid större inhomogenitet kan vågen brytas och reflekteras som vid en diskontinuerlig övergång från ett material till ett annat. Vid en mycket kraftig inhomogenitet, t.ex. ett främmande objekt i vågens väg, kommer vågen helt eller delvis att spridas ut i omgivningen.

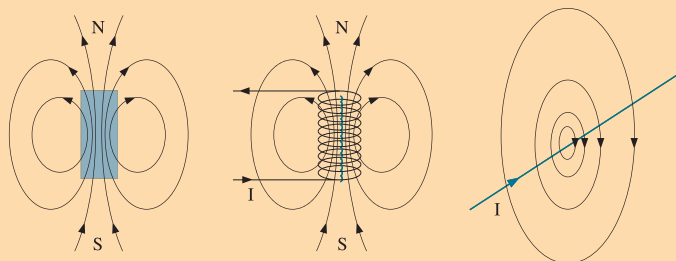
Elektriska och magnetiska fält

Elektriska fält skapas av positiva och negativa laddningar. De mest illustrativa exemplen ges av plattorna i en kondensator som har laddats upp genom att kopplas till ett batteri, elektriska plus och minuspoler samt enstaka laddningar, se figur F2. Den elektriska fältstyrkan E är den elektriska potentialskillnaden (spänningen) per längdenhet och mäts i volt per meter (V/m). Laddade partiklar som befinner sig i ett elektriskt fält påverkas av en kraft.



Figur F2. Elektriska fältets utseende kring en enstaka positiv laddning i fria rummet samt mellan två uppladdade plattor.

rotation rörelse runt sin egen axel, det så kallade 'spinner', vilket kan jämföras med en elektrisk ström. Magnetfält kan beskrivas av den magnetiska flödestätheten B som mäts i Tesla (T). Enheten Tesla är ett stort mått och vanliga fältstyrkor ligger i nano-, mikro-, och milliteslaområdena (10^{-9} , 10^{-6} respektive 10^{-3} T). Exempelvis är den jordmagnetiska fältstyrkan i Sverige ca 50 mikrotelsla. Magnetfältet förmedlar magnetisk kraftverkan. Det påverkar elektriska laddningar i rörelse och får en kompassnål att ställa in sig i dess riktning.



Figur F3. Magnetfältets utseende kring stavmagnet, strömspole och strömförande elektrisk ledare. I betecknar strömstyrka. S resp. N betecknar syd- resp. nordpol.

Magnetiska fält orsakas av elektriska laddningar i rörelse. De kan exempelvis genereras av strömspoler och permanentmagneter, se figur F3. I de sistnämnda alstras magnetismen av elektronernas rörelse kring atomkärnan och av deras

Såväl elektriska som magnetiska fält är vektorstorheter, vilket innebär att de både har storlek och riktning. De elektriska fälten är riktade från positiv laddning mot negativ laddning, medan de magnetiska går från nordpol till sydpol. De elektriska och magnetiska vektorfälten eller fältbilderna är ofta komplicerade.

MEKANISKA VÅGOR

Mekaniska vågor kan fortplantas i såväl fasta kroppar som i vätskor och gaser. Om en atom i en fast kropp förskjuts från sitt jämviktsläge påverkar den sina grannatomer med en kraft som i stort är proportionell mot förskjutningen. En våg kommer att utbreda sig i kroppen. Man talar om longitudinella vågor om atomernas rörelseriktning sammanfaller med vågens utbredningsriktning och transversella vågor om den är vinkelrät däremot, se figur F4. I vätskor och gaser är endast longitudinella vågor möjliga. Undantaget är transversella vågor på ytan av en vätska, men dessa vågor beror av gravitationen och ytspänningen.

Ljudvågornas fysikaliska natur

Akustisk energi är en mekanisk energiform. Ljudvågor fortplantas i ett medium genom rörelse hos partiklar i detsamma. Vågen karakteriseras av sin riktning, ljudstyrkan (amplituden), våglängden och ljudhastigheten.

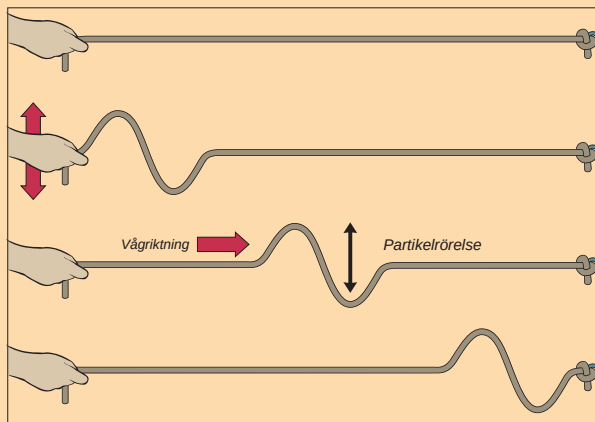
Avståndet mellan två förtunningar/förtätningar definieras inom fysiken som en våglängd, λ . Inom akustik är det vanligare att man använder sig av frekvens, f . Frekvensen är ett mått på antalet svängningar som sker under en sekund och förhåller sig till våglängden enligt

$$f = c/\lambda,$$

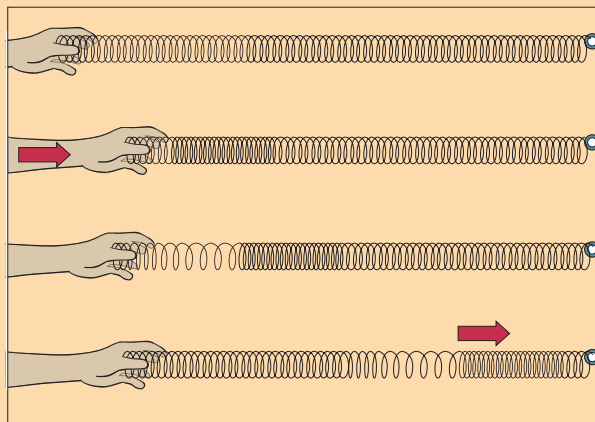
där c är den hastighet varmed vågrörelsen utbreder sig. För oceanvatten är ljudhastigheten cirka 1 500 m/s. Avvikelserna beror på skillnader i salthalt och temperatur. I Östersjön, där salthalten är lägre, är ljudhastigheten ungefär 1 430 m/s (spridningsområdet är cirka 1 400–1 500 m/s). I luft är ljudhastigheten lägre (ca 340 m/s) och ökar med temperaturen. Frekvensen kan även beskrivas som inversen av periodtiden T , d.v.s. den tid det tar för vågen att förflytta sig en våglängd.

Vid ljudvågers utbredning i fasta kroppar uppträder vid deformationen även skjuvkrafter, varigenom transversella vågor uppstår. Ett exempel på sådana vågor är de som uppstår när man slår an en sträng. Ljudvågorna är hörbara om frekvensen ligger mellan ca 20 Hz och 20 000 Hz. Ljud med lägre frekvenser brukar kallas infraljud och ljud med högre frekvenser ultraljud.

Transversell våg



Longitudinell våg



Figur F4. Transversella och longitudinella vågor.

Inledning

Buller som sjögående farkoster sänder ut i vattnet kan detekteras på stora avstånd med passiva akustiska undervattenssensorer, så kallade passiva sonarer (sonar, sound navigation and ranging). Militärt används passiva sonarer i spaningssystem, exempelvis för övervakning av stora havsytor och vattenvolymer, och som sensorer i minor och torpedmålsökare.

Två väsentliga användningsområden för aktiva sonarer, där sonaren själv sänder ut en ljudpuls i syfte att detektera ekon från objekt, är minjakt och ubåtsjakt. Två andra tillämpningsområden för hydroakustisk teknik är undervattenskommunikation och navigering. Sonarer och hydroakustisk teknik används också i civila tillämpningar såsom vid fiske och oljeutvinning, samt vid oceanografisk kartläggning av havsområden.

Ett sonarsystems räckvidd mot ett målobjekt varierar mycket starkt beroende på objektets

signatur, den undervattensmiljö spaningen sker i och det frekvensband sonaren använder. Vid spaning med kvalificerade passiva sonarer mot starkt bullrande fartyg i större hav kan detektionsavstånd på 100-tals km uppnås. I andra situationer, såsom vid spaning mot en svagt bullrande ubåt eller vid minjakt i ett område med litet vattendjup och 'svår' botten, kan detektionsavstånd på några hundra meter vara mer realistiskt. I vissa fall erhålls praktiskt taget ingen upptäcktsförmåga alls, varvid behov av andra sensortyper föreligger. Eftersom havet, speciellt kustnära, är fullt av både biologiska och av människan skapade bullerkällor, används i passiva sonarsystem kvalificerade analysfunktioner för bland annat klassificering av mål. Vid spaning med aktiv sonar i grunda vatten med svår, starkt kuperad botten är den stora utmaningen att urskilja och klassificera ekon från intressanta mål.

Under efterkrigstiden har so-

narsystemen blivit mer sofistikerade inte minst genom datoriserad signalbehandling. Samtidigt har ytfartyg och ubåtar under flera decennier blivit allt tystare och därmed svårare att upptäcka.

Idag sker satsning på nya system såsom:

- Lågfrekventa aktiva släpssonarer.
- Multistatiska sonarsystem, där sändare och mottagare är fysiskt åtskilda.
- Torpedmålsökare med förbättrad förmåga till målsökning och målföljning i grunda vatten.
- Syntetisk apertursonar (SAS).

Andra områden som har fått och fortsatt kommer att ha hög prioritet är obemannade farkoster och snabbt utläggningsbara sensorer, aktiva högupplösande sonarer för minsökning samt system som kan utnyttjas för att skydda fartyg mot lågkonflikthot i hamnar och kustnära farvatten.

Vågutbredning

För att kunna dimensionera eller bedöma prestanda hos ett akustiskt undervattenssystem krävs kännedom om hur ljudet fortplantar sig från en punkt till en annan.

Utbredningsförlust

Om mediet hade oändliga geometriska dimensioner och samtidigt vore homogent skulle en

ljudvåg från en rundstrålande ljudkälla fortplanta sig rätlinjigt och spridas över en allt större sfärisk yta. Ljudintensiteten, d.v.s. ljudeffekten per ytenhet, skulle då avta med ökande avstånd omvänt proportionellt mot kvadraten på avståndet (sfärisk utbredning). Därutöver tillkommer den dämpning av ljudvågen som blir följden av energiförluster till mediet. Fe-

nomenet kallas för absorption och är starkt beroende av ljudets frekvens.

För det aktuella mediet, havet, gäller att det varken har oändlig utsträckning eller är homogent. Därför är ljudutbredningen inte sfärisk. Särskilt i djupled är mediet mycket begränsat; uppåt av vattenytan, nedåt av botten. Ljudintensiteten på

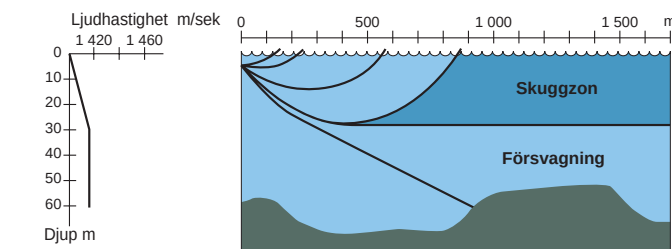
större avstånd från ljudkällan ges som en summa av ett flertal ljudvågor, dels den direkta vågen, dels de vågor vilka en eller flera gånger reflekterats mot ytan och botten, så kallad flervägsutbredning. Om både ytan och botten reflekterar vågorna med låg energiförlust, uppstår cylindrisk utbredning. Detta innebär att den utstrålade ljudeffekten sprids på en mot avståndet proportionell cylinderyta. Ljudintensiteten avtar omvänt proportionellt mot avståndet.

Oftast ligger den verkliga ljudutbredningen mellan sfärisk och cylindrisk.

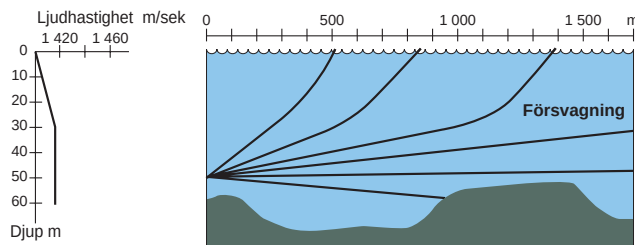
Ljudavböjning

Ljudhastigheten i vatten bestäms av densitet och kompressibilitet, vilka i sin tur är beroende av temperatur, salthalt och det statiska trycket (djupet). Eftersom havsvattnet ständigt tillförs och avleds värme genom strålning och konvektion (värmetransport), främst via ytskiktet, kommer vattentemperaturen alltid att variera, kraftigt i de övre vattenskikten, obetydligt eller inte alls på de större djupen. Resultatet blir kraftiga årstidsvariationer och även dygnsvariationer, speciellt sommartid då solstrålningen ger en märkbar temperaturhöjning hos ytskiktet. Inte minst gäller detta Östersjön, som är ett relativt grunt hav i en klimatzon med tydliga årstidsväxlingar.

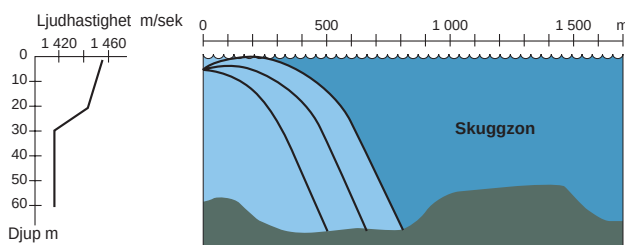
För salthalten gäller att den är tämligen konstant i ytskiktet och ökar något med ökande djup oberoende av årstiderna. Utanför kuster, där tillflödet av sötvatten är stort, kan dock mycket komplicerade och i ti-



Figur 1. Exempel på ljudavböjning i Östersjön vintertid, när ljudkällan är ytligt belägen.



Figur 2. Exempel på ljudavböjning i Östersjön vintertid, när ljudkällan befinner sig djupt.



Figur 3. Exempel på ljudavböjning i Östersjön sommartid, när ljudkällan befinner sig nära ytan.

den varierande temperatur- och salthaltsvariationer i djupled förekomma.

Ljudhastighetsvariationer i djupled medför att ljudvågorna böjs av uppåt eller nedåt beroende på om ljudhastigheten ökar eller minskar med tilltagande djup. Denna ljudavböjning, eller refraktion, illustreras med hjälp av några exempel, se figur 1-6. Av figurerna framgår att refraktionen medför dels en omfördelning av ljudenergin i mediet, dels fel vid riktningsbestämning i djupled. Omfördelningen kan innebära både

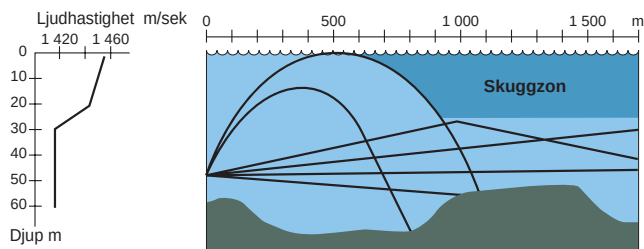
förstärkning och försvagning av ljudintensiteten i en viss punkt. I många fall fås till och med en 'skuggzon', vilken medför en kraftig räckviddsbegränsning. I figurerna 1, 3 och 5 har antagits att ljudkällan befinner sig på ca 5 meters djup och endast direktvågen beaktas. Om istället ljudkällan sänks ner till ca 50 m djup fås en dramatisk förbättring av räckvidden mot mål mitt i vattenvolymen, se figurerna 2 och 4.

Vintertid kan en ljudkanal även uppstå i själva ytskiktet. De från en ytlig ljudkälla utgående

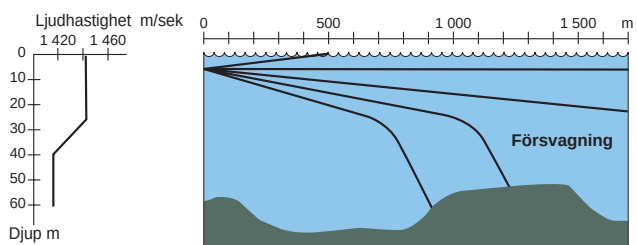
Ljudvågorna böjs av uppåt och reflekteras mot ytan, se figur 6. En förutsättning för att detta skall resultera i en räckviddsökning är dock att havsytan är lugn. Vid brytande vågor störs ljudutbredningen av en mängd små luftbubblor i ytskiktet. Absorptionen blir då så hög att den vinst som fås genom gynnsam ljudavbøjning helt går förlorad.

Då bottendjupet är ringa, som t.ex. i Östersjön, orsakas ljudhastighetsvariationerna endast av temperatur- och salthaltsvariationerna. Det statiska trycket blir alltför litet för att ha någon nämnvärd inverkan på ljudhastigheten.

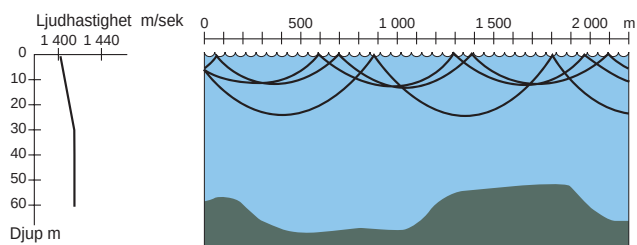
I oceanerna är däremot djupet ofta så stort, att ökningen av ljudhastigheten med ökat djup inte kan förbises. Detta leder till att ljudhastigheten först minskar med ökat djup, p.g.a. temperatursänkning, för att sedan öka igen när trycket blir tillräckligt högt. Det skapas ett hastighetsminimum på ca 1 500 meters djup, där ljud föredrar att fortplanta sig och en s.k. ljudkanal bildas. Denna djupa ljudkanal existerar året om.



Figur 4. Exempel på ljudavbøjning i Östersjön sommartid, när ljudkällan befinner sig djupt.



Figur 5. Exempel på ljudavbøjning i Östersjön under hösten, när ljudkällan befinner sig nära ytan.



Figur 6. Exempel på en ytlig ljudkanal som bildas i Östersjön under vintern.

Passiva och aktiva system

Sonarsystem kan vara passiva eller aktiva. Passiva system lyssnar efter oavsiktligt utsända ljudvågor, buller, från marina objekt såsom ytfartyg, ubåtar, torpeder eller andra undervattensfarkoster. De kan även fånga upp signaler från motståndarens aktiva sonarer. Passiva system används i situationer där röjningsrisken anses vara för stor för att aktiva system skall vara användbara, t.ex. för en ubåt som vill undvika att röja sin

position eller för minor. Passiva system kan även användas vid övervakning, antingen som mer permanenta bottenfasta system eller som snabbt utläggningsbara sonobojar. I många fall har passiva system längre räckvidder mot bullrande mål än aktiva system.

Nackdelen med passiva system är att moderna undervattensfarkoster och ytfartyg utstrålar allt mindre buller. Därmed hörs

de inte så tydligt i det naturliga bakgrundsbruset som alltid finns närvarande i undervattensmiljön. I de fall då sonarsystemen är monterade på rörliga plattformar kommer de också att störas av strömningsbuller och buller från den egna plattformen. Detta påverkar passiva system mer än aktiva.

Aktiva system sänder ut ljudsignaler, vilka träffar ett mål-objekt, reflekteras och fångas

SONAREKVATIONEN – RÄCKVIDDSBESTÄMNING

Sonarekvationerna används för att beräkna räckvidden hos en sonar och för att beskriva vilka faktorer som påverkar densamma. Tre olika ekvationer används beroende på om passiv eller aktiv spaning används, och, i det senare fallet, om det är bruset eller reverberationen från den utsända pulsen som dominerar. Alla termerna i sonarekvationerna anges i decibel, vilket innebär att termerna adderas och subtraheras.

För att komma fram till sonarekvationerna utgår vi från en viss utsänd energi (eng. Source Level, SL). Denna energi kommer att minska p.g.a. geometrisk spridning och energiförluster till mediet (eng. Transmission Loss, TL). I det aktiva fallet dras denna term bort två gånger eftersom vågen här färdas fram och tillbaka till målet. I det aktiva fallet adderas även målstyrkan (eng. Target Strength, TS), vilken anger hur starkt eko som erhålls från målet. Från den återstående energin dras sedan den rådande brusnivån (eng. Noise Level, NL). Brusnivån får dock ett reducerat bidrag genom användandet av riktad antennverkan (eng. Directivity Index, DI), d.v.s. mottagaren är känsligast i ett visst vinkelintervall, varför bruset, som kommer från alla riktningar, får mindre inverkan. I det aktiva fallet, då reverberationen (eng. Reverberation Level, RL) dominerar bruset, används denna term istället för bruset. Vi har nu kommit fram till signal-till-brusförhållandet (eng. Signal-to-Noise ratio, SNR) respektive signal-till-reverberationsförhållandet (eng. Signal-to-Reverberation ratio, SRR) som råder efter det att hänsyn tagits till riktverkan. För att avgöra om detektion fås sätts ett tröskelvärde (eng. Detection Threshold, DT) och om SNR eller SRR är större än detta värde fås detektion. Hur tröskelvärdet sätts beror på hur stor sannolikhet för detektion respektive falsklarm man vill ha samt vinster p.g.a. signalbehandling. Genom att bilda differensen mellan SNR eller SRR och DT fås vad som i sonarsammanhang kallas signalöverskottet (eng. Signal Excess, SE). Detektion fås då SE är större än noll, och vi har nu nått fram till sonarekvationerna;

Passiva:

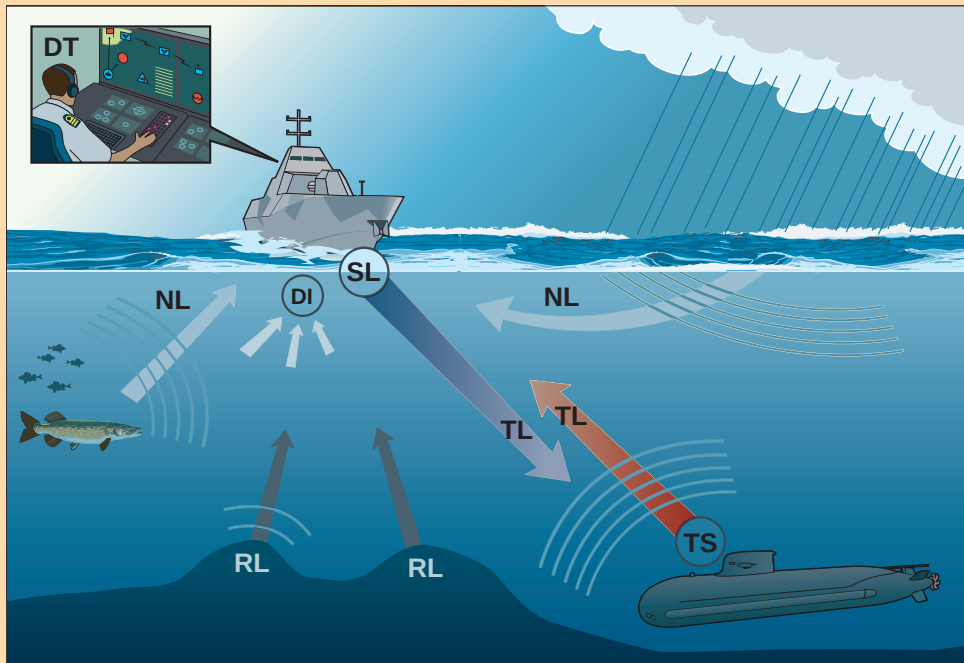
$$SE = SL - TL - (NL - DI) - DT$$

Aktiva, brusbegränsade:

$$SE = SL - 2*TL + TS - (NL - DI) - DT$$

Aktiva, reverberationsbegränsade:

$$SE = SL - 2*TL + TS - RL - DT$$



Figur F5. Figuren illustrerar de termer som ingår i sonarekvationen. Räckvidden begränsas antingen av störkon, s.k. reverberation (RL), eller av det omgivande bakgrundsbruset (NL).

upp av en eller flera mottagare och ger information om bl.a. närvaro, riktning och avstånd till objektet. Den sistnämnda informationen ges direkt av tiden mellan sändning och mottagning. Vid utsändandet av en signal återfås inte bara ekon som härstammar från målobjektet, utan även ekon från den omgivande miljön, s.k. reverberation. Dessa orsakas av små reflektorer i mediet samt av de ojämna begränsningsytorna (botten och ytan). Reverberationen som härstammar från begränsningsytorna kallas vanligen yt- respektive bottenreverberation medan den reverberation som uppkommer p.g.a. reflektorer i vattenvolymen (plankton, fiskstim, luftbubblor m.m.) kallas volymreverberation. I allmänhet är volymreverberationen försumbar i jämförelse med övriga störningskällor. Reverberationen från begränsningsytorna ställer krav på att välja en optimal pulsform och att utnyttja signalbehandlingsmöjligheterna fullt ut.

Målekot, den reflekterade pulsen, kan göras större, inte bara genom att öka den utsända signalens styrka, utan även genom att välja en optimal pulsform och rätt frekvens. Därmed blir det möjligt att med hjälp av signalbehandling av den mottagna signalen förbättra signal-till-brusförhållandet. På senare tid har intresset för lågfrekventa aktiva sonarer (LFAS) ökat. Detta beror på att lägre frekvenser ger längre räckvidder eftersom låga frekvenser dämpas mindre än höga.

Nackdelarna med aktiva system gentemot passiva är, förutom röjningsrisken, att de kräver mer energi.

Sändning och mottagning kan ske från samma plattform, monostatiskt, eller separerat, bieller multistatiskt. Det senare kan utformas så att en bottenfast sändare skickar ut pulser som efter att ha reflekterats mot ett mål tas emot av en rörlig mottagare, kanske monterad på en ubåt. Detta kombinerar fördelarna med både aktiva och passiva system, d.v.s. ubåten röjer inte sig själv men kan dra nytta av de bättre signal-till-brusförhållanden som aktiva system kan uppnå.

Ljudomvandlare

För att kunna ta emot eller sända ut akustiska vågor i ett medium krävs att energi överförs mellan den elektriska domänen och mediet. En sådan energiöverföring sker med hjälp av s.k. ljudomvandlare.

De flesta omvandlarna är reversibla, d.v.s. de kan omvandla åt båda hållen. En vanlig stereohögtalare är en välkänd ljudomvandlare. En stereo sänder elektrisk energi till högtalaren som omvandlar den till ljudvågor. En omvandling från elektrisk till akustisk energi har skett.

En vanlig högtalare fungerar däremot inte bra i vatten. Detta beror på att vatten är mycket mer motvilligt än luft att sättas i rörelse, vatten sägs ha en högre specifik akustisk impedans än luft. Den specifika impedansen ges som produkten av ljudhastigheten och densiteten i mediet.

Den specifika impedansen i vatten är ca 3 500 gånger högre än i luft. Detta innebär att större krafter måste överföras till vattnet för att tvinga det i

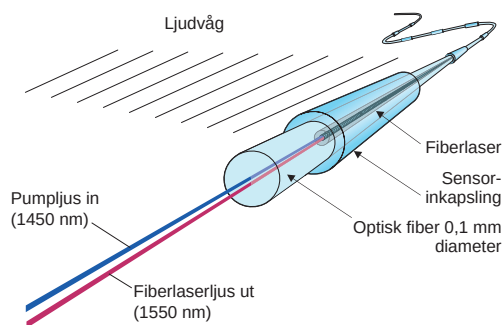
rörelse. Material måste därför väljas så att de kan generera och känna av dessa krafter, s.k. impedansanpassning.

En sorts material, som har passande egenskaper, är de s.k. piezoelektriska. Dessa är de mest förekommande i dagens ljudomvandlare. Exempel på andra typer av material är de magnetostriktiva.

Piezoelektricitet och magnetostriktion bygger på att material med speciell struktur, som komprimeras i en viss riktning, ändrar sina inre elektriska och magnetiska fält (mottagare). Omvänt gäller att om materialen utsätts för ett fält så röjs de och ger upphov till akustiska vågor (sändare). I piezoelektriska material skapas elektriska fält som i sin tur ger upphov till motsatta ytladdningar på materialens fram- och baksidor. Skillnaden i laddning mellan ytorna kan sedan direkt mätas som en spänningsskillnad. För magnetostriktiva material gäller att magnetiska fält alstras, vilka mäts indirekt genom användning av induktion.

Fiberoptiska hydrofoner

Fiberoptiska hydrofoner utnyttjar en töjning i fibern på grund av tryckvariationer, vilken mäts med hjälp av laser. För hydroakustik används interferometrisk sensortechnik för att möjliggöra detektion av svaga ljudsignaler. Genom att koppla samman flera interferometrar i fiberoptiska nätverk kan olika typer av antenner konstrueras. Några tillämpningar som varit drivande för fiberoptiska sensorer inom hydroakustiken är mindre komplexa och mindre skrymmande kabelsonarer



Figur 7. Princip för fiberlasersensorkedja.

(towed array sonar, TAS), helt icke-elektriska, kraftoberoende bottenfasta sensornätverk med tiotals mils spännvidder samt flankmonterade antenner med ytintegrerande sensorelement.

Fiberlasersensorer

På senare tid har intresset för små marina undervattensplattformar ökat, vilket bidragit till att så kallade fiberlasersensorer studerats. Fiberlasersensorer

möjliggör som interferometrisk sensorer detektion av hydroakustiska signaler. Till skillnad från spolar på mellan 10 och 100 meter fiber fångas signalen upp längs med ett fibersegment på några få centimeter. Fibersegmentet är dopat med erbium och utgör i sig själva lasern. Då så kallat pumpljus sänds in i fibern exciteras erbiumet och fiberlasern börjar lysa med en väl definie-

rad våglängd. Denna nya teknik gör det möjligt att konstruera i sammanhanget mycket tunna och flexibla sonarkablar. I den forskning som för närvarande bedrivs är målsättningen att få fram teknik för t.ex. obemannade undervattensfarkoster och snabbt utläggningsbara sensorer. För att göra fiberlasern specifikt känslig för ljud krävs en inkapsling som förstärker ljudets inverkan på fiberlasern. Genom att mäta frekvensvariationer i laserljuset erhålls information om hur trycket varierar. Med flera lasrar som lyser vid olika våglängder koplade längs samma fiber fås en array som förmår att bestämma ljudets infallsriktning. Med en särskild fiberoptisk förgrening separeras ljuset från de olika lasrarna varigenom signalerna på respektive laserelement kan särskiljas.

Sonarsignalbehandling

När en signal har mottagits behandlas den i ett antal steg som syftar till att avgöra om ett mål finns närvarande (detektion), var det befinner sig i avstånd och bäring (lokalisering), samt bestämma måltyp (klassificering) alternativt bestämma individ (identifiering).

Lobbildning

Normalt befinner sig de mål eller källor som skall studeras på stort avstånd från sensorerna. Det medför att det är rimligt att anta att vågfronten för signalerna, som strålar ut från målet, är plan då den når sensorerna. En plan vågfront karakteriseras endast av en rikt-

ning, varför endast bäringen till målet, och inte dess position, kan bestämmas. Det är möjligt att tidsfördröja de mottagna signalerna för att förstärka de signaler som kommer i en viss riktning jämfört med övriga riktningar, s.k. lobbildning.

I ett spaningssystem bildas lobar i alla riktningar runt antennen för att kunna spana efter mål horisonten runt. Vanligtvis presenteras därefter effekten i signalen som funktion av bäring och tid, med hjälp av en bäring-tid-skrivare (eng. BTR, bearing time recorder). Det är ofta genom avläsning i BTR-diagrammet som ett avlägset mål först detekteras.

Upplösningen i bäring beror på antennens apertur, d.v.s. dess utsträckning vinkelrätt mot vågfronten. Ju större apertur, uttryckt i våglängder, ju finare detaljer kan upptäckas.

Om målobjektet istället befinner sig i närfältet till sensorn, så att vågfronten är sfärisk, finns också möjligheter att direkt bestämma målets position.

Detektion

För att detektera ett objekt krävs att det kan särskiljas från bakgrunden i den mottagna signalen. I sonarsammanhang registreras ofta energin hos den mottagna signalen och då ener-

gin överskrider ett tröskelvärde ger systemet larm. Hur tröskelvärdet sätts beror på hur stor sannolikhet för detektion respektive falsklarm som önskas. Önskas en låg falsklarmsrisk kommer tröskeln att gå upp och därmed kommer en del riktiga målobjekt att missas. Ett annat sätt att detektera är att låta en operatör lyssna kontinuerligt på insignalen och larma då vissa ljud hörs.

Beroende på hur mycket information som finns om de eftersökta signalerna kan mer specialiserade detektorer användas. Ett exempel är då ett aktivt sonarsystem används. Den utsända signalen är då känd och den optimala detektorn är då det matchade filtret (replikakorrelatorn). I detta korreleras mottagen signal med en kopia (replika) av den utsända pulsformen och resultatet jämförs med ett tröskelvärde.

Lokalisering

Lokalisering innebär att målobjektets position relativt sensorerna bestäms. Avståndet till ett mål fås i ett aktivt system ur vågutbredningshastigheten och gångtiden för ekot från den aktiva sändaren.

Mer avancerade lokaliseringsmetoder, s.k. modellbaserad lokalisering, kan åstadkommas med hjälp av vågutbredningsmodeller. En målposition antas och beräkningar görs utgående från vågutbredningsmodellen av hur signalen skulle se ut i sensorerna om den sanna positionen för målobjektet vore den ansatta positionen. Genom att söka igenom möjliga målpositioner och minimera skillnaden mel-

lan de uppmätta respektive framräknade signalerna kan den mest troliga målpositionen uppskattas. Denna metod kallas fältanpassad processering (eng. Matched Field Processing).

Lokalisering kräver vanligen användning av en antenn med sensorer, men med en bredbandig källa och flervägsutbredning går det att lokalisera en källa med en sensor. Detta förutsätter att bottengeometrin är känd. Genom att mäta tidsskillnaderna mellan de olika utbredningsvägarna och associera dem med rätt utbredningsväg är lokaliseringen av källan ett lösbart geometriskt problem. Notera att då avståndet mellan källa och sensor ökar minskar gångtidsskillnaderna och lokaliseringsnoggrannheten minskar drastiskt. I slutändan är det noggrannheten i tidsskillnadsuppskattningarna som är avgörande för lokaliseringsnoggrannheten.

Målföljning

Målföljning innebär att ett rörligt mål följs, vilket betyder att upprepad lokalisering av målet görs (jämför exempelvis med radarpresentation). Om målets kurs och fart är kända kan målets bana förutsägas, vilket gör det möjligt att leta inom ett mindre område.

Klassificering och identifiering

Utstrålat buller och toner från en farkost ger ett slags fingertryck för densamma. Innehållet studeras vanligen i ett lofargram, där signalens effekt visas som funktion av tid och frekvens. Med ett register över olika fartyg och deras domi-

nanta toner, kan lofargrammet ge en uppfattning om vilken källa det är fråga om.

En vanlig komponent i det utstrålade bullret är kavitation (bildandet av gasbubblor som tillväxer för att sedan implodera). Analys av buller orsakat av kavitation kan medge bestämning av axelfrekvens och antal propellerblad.

Ytterligare en komponent kan vara en farkosts hastighet relativt sensorn, d.v.s. dess doppler. Med ett aktivt system kan dopplern fås från replikakorrelatorn.

I ett passivt system är det betydligt svårare att bestämma ett måls fart, men om målets TPK (Turns Per Knot, 'varv per knop') och axelvarvtalet är kända kan hastigheten bestämmas. Detta förutsätter naturligtvis att klassificeringen redan nått så långt att fartygsklassens TPK är känd.

Det finns idag även exempel på mer automatiserade klassificeringsalgoritmer, som använder exempelvis neurala nätverk. Nätverket har då tränats på en stor mängd data från olika farkoster och kan sedan skilja ut vilken av dessa en mottagen signal kommer från. Bättre upplösning på den ljudbild som tas emot förklarar klassificeringen. Här kan högupplösande metoder såsom SAS (syntetisk apertursonar) vara ett hjälpmedel.

Exempel på hydroakustiska system

Lågfrekvent aktiv sonar, LFAS

Trots utvecklingen mot allt större och känsligare passiva spaningsantenner har förmågan att upptäcka moderna och tysta ubåtar blivit sämre. På senare år har därför utvecklingen inom aktiva sonarer varit intensiv, mycket beroende på att kostnaderna för digital signalbehandling sjunkit drastiskt.

I jakten på allt längre räckvidder har sonarindustrin tagit fram lågfrekventa aktiva sonarer (LFAS), vilka visat sig ge stora upptäcktsavstånd mot undervattensmål i djuphaven där salthalten orsakar stora förluster för ljudutbredning vid höga frekvenser. För LFAS finns system som arbetar på frekvenser som ofta ligger under 2 kHz. En nackdel med dessa frekvenser är att sändarna blir stora och effektkrävande.

I grunda vatten, som t.ex. Östersjön, är det bottenreverberationen som begränsar upptäcktsavstånden och system som används operativt i djuphaven fungerar dåligt eller inte alls här. Därför studeras om LFAS med något högre frekvenser jämfört med vad som är vanligt internationellt kan ge bättre prestanda i grunda hav. De högre frekvenserna ger möjlighet att använda större pulsbandbredd. Dessutom kan smalare lobber uppnås utan att antennen blir för stor. Nackdelen är att prestanda hos ett sådant system inte kan konkurrera med de mer lågfrekventa systemen vid operationer i djuphaven.

Bi- och multistatiska sonarsystem

I ett aktivt monostatiskt so-

narsystem är sändare och mottagare placerade intill varandra. I ett bistatiskt sonarsystem är sändare och mottagare separerade, ofta placerade på två olika plattformar. Om flera mottagande eller sändande element tillförs ett monostatiskt eller bistatiskt system blir det samverkande systemet multistatiskt. Ett multistatiskt spaningsystem kombinerar fördelarna från både passiva och aktiva system samtidigt som det ger högre prestanda än ett monostatiskt system. Ofta kan ett betydligt större område täckas in om flera system kan samverka. Det blir också ett kostnadseffektivt system då flera mottagare, som kan göras billiga, kan dela på en betydligt dyrare sändare. Flera mottagare som inte avslöjar sin position genom aktiv sändning kan lyssna efter målekon från samma sändare. Ett mål har då liten möjlighet att manövrera utan att blotta sin största målarea och därmed ge en detekterbar reflex till åtminstone någon av mottagarna. Dessutom ökar sannolikheten för att kunna lokalisera ett målobjekt med ett multistatiskt system jämfört med ett monostatiskt.

Flera sändare kan ingå i systemet och sända växelvis. Genom att låta sändarna vara rörliga så att de kan byta position mellan sändningstillfällena kommer motståndaren att få mycket svårt att upptäcka och bekämpa systemen. Detta ställer krav på att de egna enheterna känner positionen för samtliga sändare och mottagare. På så vis kan t.ex. en ubåt ingå som passiv mottagare i ett multistatiskt

system under förutsättning att den vet varifrån och när sändarpulserna skickas.

Torpedmålsökare

En målsökare på t.ex. en torped skall klara av att upptäcka mål, klassificera dem och därefter bestämma om den skall låsa på målet eller inte. En torpedmålsökare måste kunna verka vid höga farter och mot snabba mål. Dessutom måste den klara hög upplösning samtidigt som den skall rymmas i torpeden. Detta innebär att höga frekvenser måste användas. Eftersom ljudvågornas absorption i vattnet ökar med frekvensen begränsas målsökarens räckvidd, ofta till någon kilometer. Eftersom Östersjön har relativt låg salthalt och därmed lägre absorption går utvecklingen här mot högre frekvenser för att på så vis nå en bättre upplösning. Därmed ges bättre möjligheter till målklassificering.

Målsökare används oftast både i aktiv och passiv mod.

Syntetisk apertursonar, SAS

En antens apertur ger ett mått på upplösningen i bäringsled. I dagsläget börjar nya metoder användas för att öka aperturen utan att för den delen öka den fysiska längden på antennen. Grundidén bygger på att man flyttar antennen och adderar resultaten från de olika positionerna koherent, d.v.s. i fas. På det sättet kan betydligt större aperturer uppnås och därmed erhålls en betydligt högre upplösning. Man talar om att skapa en syntetisk apertur, en teknik som härstammar från radartechniken, syntetisk apertur-



Figur 8. Illustration av möjligheter med syntetisk apertursonar. Till vänster ett foto på 'målet'. I mitten en bild av målet som det ses av en traditionell aktiv sonar. Till höger har samma sonardata analyserats med syntetisk apertur och detaljerna i målet framträder.

radar (SAR).

SAS är under utveckling både när det gäller aktiva och passiva system. För det aktiva fallet är utmaningen att, i delar av våglängder, kunna bestämma den fysiska antennens positioner. Detta för att erhålla en så koherent addition av delbilderna som möjligt. Detta kräver oftast inte bara ett bra positioneringssystem, utan dessutom signalbehandlingsmetoder för att ytterligare förbättra positioneringen, s.k. autopositionering.

Figur 8 visar ett exempel på hur

mycket bättre upplösning man kan få i en sonarbild genom att använda en syntetisk apertur jämfört med den fysiska.

Aktiva SAS-system används t.ex. för att från små undervattensfarkoster klassificera minor.

För passiva SAS-system är målet att i första hand få fram högkvalitativa bäringsuppskattningar till målet. Detta erhålls med hjälp av ett modellbaserat angreppssätt, d.v.s. man ställer upp en modell av verkligheten och beräknar värden som antennen borde ta emot. Därefter matchas dessa

värden med verkligt uppmätta, och modellen anpassas så att skillnaden minimeras. Ju fler mätvärden och positioner som tillförs, d.v.s. ju längre syntetisk apertur som används, desto bättre anpassning fås och därmed bättre bäringsestimater.

Passiv syntetisk aperturteknik kan exempelvis användas för att förbättra bäringsbestämningsförmågan hos en kabelsonar (TAS), eller för att uppnå lika goda prestanda hos en kort, mer lättmanövrerad kabelsonar, jämfört med en sonar av traditionell typ.

Inledning

I havsmiljöer med öppna vatten är de hydroakustiska metoderna mycket kraftfulla. Den svenska skärgården är dock en komplicerad miljö. En av orsakerna är den flervägsutbredning för ljudvågorna som fås i våra grunda vatten, vilken dessutom förstärks genom de tydliga salthalts- och temperaturvariationer som råder här. En annan orsak är att strandnära vatten kan utgöra en 'bullermiljö', eftersom vågorna genererar ljud både när de slår upp mot stranden och när de 'rör om' i bottenliggande klapperstensfält. Det behövs därför andra metoder som kompletterar de akustiska.

Fartyg alstrar, om de inte är signaturanpassade, detekterbara elektriska och magnetiska fält som kan avslöja deras närvaro i sjöområdet. Dessa fält kan vara stora om fartyget är sammansatt av en kombination av olika metallmaterial. De genererade fälten är fartygsspecifika och kallas signaturer. Dessa fält kan användas för detektion, lokalisering och klassificering. Farty-

get avslöjar sig bl.a. genom:

- En elektrisk signatur, som är förknippad med elektriska strömmar i vattnet, ofta av galvaniskt ursprung,
- En magnetisk signatur,
- Utsändning av lågfrekventa elektromagnetiska fält vars ursprung exempelvis kan vara propellerns modulation av den statiska källan.

Dessutom kan fartygets interna elektriska system vara anslutet till skrovet och på så vis läcka ut ström i vattnet. Utöver detta är de totala magnetiska och elektriska fälten som fartyget utsänder kopplade till varandra. Denna koppling sker dels genom det faktum att det bildas ett magnetfält runt en elektrisk ström (jfr magnetfältet runt en strömförande elektrisk ledare), dels genom att tidsvarierande elektriska fält genererar tidsvarierande magnetiska fält och omvänt.

Ett passivt elektromagnetiskt mätsystem utnyttjar ovan

nämnda elektromagnetiska egenskaper hos ett fartyg. Det detekterar störningar i bakgrundsfälten orsakade av det passerande fartyget. Ett aktivt system, däremot, sänder ut ett eget fält samtidigt som det mäter och undersöker svaret. Närvaro av fartyg eller andra främmande föremål kan exempelvis uppenbara sig i ändrade vågutbredningsförhållanden på grund av fartyget, eller genom reflektioner och förstörda symmetriegenskaper hos svaret.

De uppmätta storheternas ursprung och karaktär är minst lika intressanta som sensorerna själva. Dessutom är kunskaper om de elektromagnetiska bakgrundsfälten viktiga, eftersom signalerna från föremålen som skall detekteras ofta är dränkta i brus. Goda kunskaper om detta brus kan minska riskerna för både falsklarm och missade upptäckter.

Havsvatten som medium för elektromagnetisk vågutbredning

Havsvatten är en elektriskt ledande vätska. Detta beror bland annat på att saltmolekyler i vattnet delar upp sig i positiva och negativa joner som kan transportera den elektriska strömmen. Viktiga konsekvenser i det här sammanhanget är att fartyg rostar eller korroderar fortare och att elektromagnetiska vågor dämpas.

Vattnets konduktivitet (elektriska ledningsförmåga) beror på många parametrar, som t.ex. salthalt, temperatur, densitet, djup och föroreningar. Exempelvis varierar vattentemperaturen från +30 °C i tropiska vatten till lägre än -1 °C i polarområden. Densiteten ökar med djupet (temperaturberoende) och salt-

halten varierar från 0,001‰ i sötvatten till 40‰ i saltvatten. Utöver sådana variationer kan skiktningar i vattnet förekomma. Konduktiviteten är med andra ord rumsberoende, men oftast är det tillräckligt att betrakta havet som homogent och isotropt (rumsberoende och lika i alla riktningar) i lokala rumsvolymmer. Ofta approximeras ha-

vets elektriska egenskaper med planskiktade strukturer som är giltiga för lokala områden.

Betydligt enklare förhåller det sig med havsvattnets magnetiska egenskaper. Permeabiliteten ligger nära den fria rymdens och varierar försumbart med övriga parametrar. Detta betyder att vattnet kan betraktas som transparent för magnetfält.

Det räcker dock inte med att bara studera själva vattnets elektromagnetiska egenskaper för att bestämma fördelningen av strömmar och elektriska fält. Även bottenförhållanden, som exempelvis sedimentering, berg och lutning, spelar in. Detta gäller speciellt i grunda vatten, eftersom en icke försumbar strömmängd kan ta vägen genom en elektriskt ledande botten. Utöver detta skall vissa bestämda randvillkor vara uppfyllda vid gränserna mellan olika medier, exempelvis berg-sediment, sediment-vatten samt vatten-luft. Allt detta innebär att den exakta ström- och fältbild kan vara tämligen

komplicerad. För att förbättra sensorsystemens prestanda avseende detektion, lokalisering och klassificering behövs därför relativt detaljerade kunskaper om miljön. Dessa kunskaper används sedan för att kalibrera de beräkningsmodeller som tillämpas på mätdata.

Att havsvatten är elektriskt

ledande har stor inverkan på den elektromagnetiska vågutbredningen. I havsvatten sker en frekvensberoende dämpning av de elektromagnetiska vågorna, vilken begränsar sensorernas räckvidd.

DÄMPNING AV ELEKTROMAGNETISKA FÄLT

I lösningen till ekvationen för elektromagnetisk vågutbredning genom en bra elektrisk ledare (t.ex. havsvatten) dyker dämpningsfaktorn $e^{-z/\delta}$ upp, där z är färdlängden genom mediet och δ är det så kallade penetrationsdjupet. Innebörden är att vågens amplitud dämpas med en multiplikativ faktor av 0,368 ($= e^{-z/\delta}$, med $z = \delta$) då den propagerar längden δ genom mediet. För en bra elektrisk ledare är $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$, där f är vågens frekvens, μ är mediets permeabilitet (för vatten är $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am) och σ är mediets ledningsförmåga. Exempelvis är penetrationsdjupet för plana elektromagnetiska vågor i havsvatten med en genomsnittlig ledningsförmåga av 4 S/m ca 250 m vid 1 Hz och sjunker till mindre än 5 m vid 3 000 Hz. För Östersjövattnet (i Stockholmsregionen) med en typisk ledningsförmåga av 0,8 S/m är motsvarande penetrationsdjup 560 respektive 10 m. På grund av denna dämpning av de elektromagnetiska vågorna begränsas det intressanta frekvensområdet främst till ULF (från engelskans Ultra Low Frequency, 0-0,3 Hz) och ELF (Extremely Low Frequency, 0,3-3 000 Hz).

Varför sjöfarkoster har magnetisk och elektrisk signatur

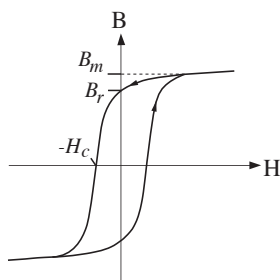
Av konstruktions- och funktionstekniska skäl är fartyg sammansatta av flera olika material, ofta metaller. Exempelvis består skrovet ofta av stål, medan armaturer och propellrar är tillverkade av brons, mässing eller rostfritt stål. Dessutom är propelleraxlarna lagrade i ett lagermaterial. Det är de magnetiska materialen och sammansättningen av olika metaller som genererar magnetiska och elektriska fält som gör att

magnetometrar och elektriska sensorer kan avslöja fartygets närvaro i sjöområdet.

Nedan behandlas inte utsändning av elektromagnetisk strålning från t.ex. elektriska strömmar, elektriska system och andra apparater. Inte heller behandlas den modulation av den statiska källan som fås t.ex. av propellerns eller propelleraxelns rotation.

Magnetisk signatur genom fartygets ferromagnetiska egenskaper

Fartyg avslöjar sig för magnetometrar genom att magnetiserade delar i deras konstruktion eller andra föremål ombord sänder ut magnetfält. Förmågan att spontant sända ut ett magnetfält är en egenskap hos ferromagnetiska material. Exempel på sådana material är järn och olika konstruktions-



Figur 9. Skiss av en teknisk magnetiseringskurva (hystereskurva) för ett ferromagnetiskt material.

H = magnetiserande fält,

B = magnetfältstyrka,

B_m = mättnadsfältstyrka,

B_r = remanens,

H_c = koercivfält.

stål. Permanentmagneter räknas självklart också till denna grupp. Karakteristiskt för ett ferromagnetiskt material är dess magnetiseringskurva, (hystereskurva), se figur 9. Det är främst genom tre ferromagnetiska egenskaper som fartygen avslöjar sig magnetiskt: restmagnetisering eller remanens, mekaniska påkänningar och magnetostriktion samt inducerad magnetisering och påverkan av fältbilden.

Restmagnetisering

Restmagnetisering eller remanens innebär att då en ferromagnetisk materialbit har utsatts för och magnetiserats av ett magnetfält kvarstår en viss magnetisering även efter det att fältet tagits bort (se figur 9). Denna egenskap är kännetecknande för ferromagnetiska material och ett resultat av att materialbitens inre magnetiska struktur inte har återuppnåtts efter processen. Fältet från en sjöfarkosts restmagnetisering kan detekteras med hjälp av magnetiska sensorer.

Mekaniska påkänningar och magnetostriktion

Magnetostriktion innebär en formförändring hos ferromagnetiska material då de magnetiseras. Även det omvända förhållandet gäller, d.v.s. att ett ferromagnetiskt material som utsätts för mekaniska påkänningar ändrar sin magnetisering. Detta är av stor betydelse för fartyg vars skrov och överbyggnader är gjorda av stål, eftersom de med tiden utsätts för både interna (från fartygets egenvikt) och externa (t.ex. tunga laster, grundstötningar och rörelser) belastningar, vilka leder till små deformationer och därmed också ändringar av magnetiseringen. Ett exempel är ubåtar, eftersom de utsätts för mycket höga vattentryck i undervattensläge.

Ett fartygs magnetiseringsbidrag från remanens och mekaniska påkänningar kan till större delen tas bort i en så kallad avmagnetiseringsprocess, som äger rum vid en avmagnetiseringsanläggning. Eftersom fartygen ständigt utsätts för magnetfält och mekaniska belastningar bör de med jämna mellanrum uppsöka en sådan anläggning för avmagnetisering. Kärnan i processen utgörs av applicerandet av ett tidsvarierande magnetfält i närheten av fartyget. Detta kan exempelvis göras genom att fartyget långsamt kör över ett elektromagnetiskt spolsystem som installerats på havsbotten.

Inducerad magnetisering och påverkan av fältbilden

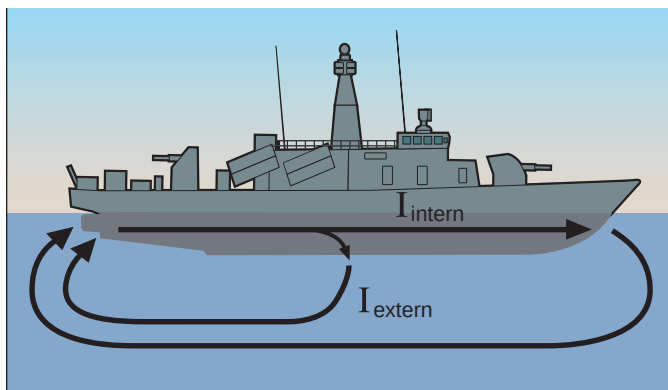
Då ett material magnetiseras av ett yttre magnetfält påverkas den omgivande fältbilden.

Detta gäller speciellt för stora magnetiseringar, vilket är fallet för ferromagnetiska material. Denna påverkan beror bl.a. av materialbitens form via en geometrisk faktor, den så kallade avmagnetiseringsfaktorn. Påverkan kan illustreras genom att det ferromagnetiska materialet 'försöker dra åt sig' magnetiska flödeslinjer från fältet. I praktiken fungerar det magnetiserade materialet som en magnet, vars magnetfält adderas till det yttre fältet som på så vis påverkas.

Eftersom många fartyg är byggda av stål eller innehåller andra ferromagnetiska material, kommer de att få ett betydande inducerat magnetiseringsbidrag, som i varje tidpunkt beror av det jordmagnetiska fältets storlek och riktning relativt fartyget. Detta resulterar i en påverkan av den magnetiska fältbilden kring fartyget som är lätt att upptäcka med magnetiska mätningar. Det går att minska effekterna av den inducerade magnetiseringen betydligt. Genom att kontinuerligt mäta fältet kring fartyget och samtidigt enligt mät- och beräkningsresultat skicka elektrisk ström genom ett spolsystem som omger fartyget kan den inducerade magnetiseringen mer eller mindre kompenseras bort.

Galvanisk alstring av elektriska strömmar i vattnet

Metallkorrosion är en viktig orsak till detekterbara elektriska strömmar i vattnet runt fartyg. Grundorsaken till metallkorrosion är att metallen inte är stabil i den omgivande miljön. Det finns en drivkraft för omvandling av metallen till ett stabilt



Figur 10. Interna och externa elektriska strömmar i och kring ett fartyg orsakade av korrosion (schematisk bild).

tillstånd, t.ex. metalljon och metalloxid. Metallkorrosion sker i elektrokemiska eller galvaniska celler, så kallade korrosionsceller. En sådan cell består av anod, katod och elektrolyt. Vid anoden sker en oxidation av metallen (avgivande av elektroner) och vid katoden sker en reduktion (upptagande av elektroner).

Hos fartygens korrosionsceller består de båda elektroderna (anoden och katoden) av olika metaller som är i galvanisk kontakt med varandra, t.ex. propelleraxeln som via dess lager är ansluten till fartygsskrovet. Den elektriska kretsen sluts genom vattnet (elektrolyten), genom vilket korrosionsströmmen flyter. Strömmarna är både material- och miljöberoende. I processen angrips den oädlare metallen, medan den ädlare skyddas. Olika metalls grad av ädelhet för ett givet korrosionsmedium kan avläsas i en galvanisk spänningsserie. Exempel på miljöparametrar som påverkar korrosionen är vattnets salthalt, temperatur, syrehalt, strömningshastighet och surhetsgrad. Beskrivningen ovan gäller dc-bidraget till fartygens elektriska signatur. På olika sätt

alstras också tidsvarierande bidrag. Det kan exempelvis vara propelleraxelns rotation i sitt trycklager i fartygets akter. Då axeln roterar varierar den elektriska kontakten mellan axel och lager, vilket medför att korrosionsströmmen blir tidsmodulerad. Ett annat exempel är att fartygets elsystem kan vara anslutet till skrovet, t.ex. genom dåligt balanserade jordningar till vattnet.

För att skydda fartyg mot kor-

rosion anbringas ofta offeranoder av zink på skrovet, vilka korroderar bort eftersom de är oädlare än de övriga materialen. Offeranoderna måste bytas ut med jämna mellanrum. Offeranoderna skyddar visserligen fartyget mot nedbrytande korrosion, men istället fås en stor mätbar korrosionsström mellan fartygets olika delar och offeranoderna. Det finns också aktiva korrosionssystem som skickar ut en motverkande elektrisk ström i vattnet. Även denna är lätt att detektera, speciellt om den sänds ut i pulssad form.

En sekundär effekt av de korrosionsrelaterade elektriska strömmarna, som bildas såväl externt i det omgivande vattnet som internt i fartyget, är att de bidrar till fartygets magnetiska signatur. Detta är ett resultat av att strömmarna i sin tur ger upphov till detekterbara magnetfält.

Naturliga störkällor	Icke-naturliga störkällor
Atmosfäriskt brus • Blixurladdning. • Solvind. • Periodiska variationer, t.ex. jonosfärisk 'tid-vattenseffekt' p.g.a. jordens rotation runt sin egen axel relativt Månen.	Elektriska installationer • Kraftledningar • Transformatorer • Övrig elektrisk apparatur
Havs rörelseinducerat brus • Storskaliga vattenrörelser (havs- och tidvattenströmmar) • Småskaliga vattenrörelser (vågor och dyningar samt svall från båtar)	Sensor- och apparatbrus • Sensor- och vattenrörelser • Elektrodbrus hos elektriska sensorer • Förstärkarbrus
Geologiskt brus • Jordens geologi	

Tabell 1. Exempel på elektromagnetiskt bakgrundsbrus.

Elektromagnetiskt bakgrundsbrus

För att hitta fartygens signaler i mätdata behövs ofta kunskaper om det elektromagnetiska bakgrundsbruset. Detta brus kan vara genererat på naturlig väg, t.ex. i atmosfären, via havsströmmar eller av den

geologiska bakgrundsmiljön. Det kan också ha sitt ursprung i mätutrustningen och de elektriska installationer som finns i omgivningen. I tabell 1 presenteras några av de viktigaste storkällorna, som försvårar arbetet med att tolka uppmätta data.

Det havsrörelseinducerade bru-

set kan vara dominerande, speciellt för frekvenser under 1 Hz och nära havsytan. Vid stora djup kan det till och med vara det enda detekterbara bruset, eftersom fält från källor i atmosfären dämpas allt eftersom de propagerar genom vattnet.

Användning av marina elektromagnetiska sensorer

Det finns många användningsområden för marina elektromagnetiska sensorsystem, både tänkbara och redan förverkligade. Bortsett från magnetiska kompasser för navigering går det marina intresset för elektriska och magnetiska fält samt lågfrekventa elektromagnetiska fält tillbaka till tiden för andra världskriget. Då användes magnetiskt aktiverade minor i stor utsträckning för att hindra sjöfarten. Dessa minor var utrustade med magnetiska sensorer som kände av fartygens passage. En del av dagens magnetiskt detonerade minor är utrustade med intelligent logik så att de kan se skillnad på främmande farkoster som skall bekämpas och minsvep som oskadliggör minor.

En av de kanske mest naturliga tillämpningarna är övervaknings- och spaningssystem. Sådana system kan realiseras på olika sätt. På strategiskt valda platser runt kuster och i skärgårdar finns fasta magnetfältsensorer som känner av när farkoster passerar över eller i närheten av dem. En ny typ av sensorsystem som bygger på mätningar av elektriska fält istället för magnetiska är på gång. Dessa sensorsystem kan göras i både kortbas- och

långbasutförande, och har betydligt större räckvidder än de magnetiska. Genom att utnyttja information från flera geografiskt utspridda sensorer kan farkosten även lokaliseras i rummet. För att 'bakvägen' kunna bestämma källans (den främmande farkostens) styrka och position krävs avancerade beräkningsmodeller och algoritmer samt goda kunskaper om utbredningsmediet.

Hos de moderna marina försvarssystemen kopplas spaningssystem ihop med minsystem. Här återfinns exempelvis elektriska spaningssystem som i kombination med akustiska system spanar efter fientliga fartyg för att sedan bekämpa dem med en modern typ av minor, i praktiken bottenliggande torpedsystem.

Det finns också mobila sensorsystem för att vid behov övervaka eller spana i områden där inga fasta system finns. Spaningssensorer av olika slag kan också tänkas vara monterade på fjärrstyrda eller autonoma undervattensfarkoster som kan ta sig in i områden där motståndaren har herraväldet. Spaning efter undervattensfarkoster (och ytfartyg) kan även göras från luften genom detektion av de magnetiska anomalier

de ger upphov till. Metoden går under benämningen MAD (från engelskans Magnetic Anomaly Detection).

Sensorer för magnetfält

Sensorer för magnetfält kan delas in i totalfältsmagnetometrar och vektormagnetometrar.

Totalfältsmagnetometrar är enbart känsliga för magnetfältets styrka, d.v.s. dess riktning påverkar inte det uppmätta värdet. Exempel på ett sådant instrument är cesiummagnetometern.

Vektormagnetometrar är känsliga för både storlek och riktning hos magnetfältet. De görs vanligtvis treaxliga så att alla fältkomponenter kan mätas. Instrumentets kvalitet beror då starkt på hur pass väl man lyckats få de tre axlarna vinkelräta mot varandra. Idealiskt skall var och en av axlarna vara fullständigt okänslig för fältkomponenter riktade längs någon av de andra. Exempel på vektormagnetometrar är induktionsspolar, fluxgate-magnetometrar och SQUID-magnetometrar (Superconducting QUantum Interference Device).

FYSIKALISK INDELNING AV SENSORER FÖR MAGNETFÄLT

En naturlig indelning av magnetfältssensorer i olika grupper bygger på vilken fysikalisk princip som utnyttjas. Sensorer vars funktion bygger på magnetfältets påverkan av den elektriska ledningsförmågan grundar sig exempelvis på olika slags magnetoresistans och elektrontunnling. Funktionen hos induktionsspolar, fluxgatemagnetometrar och supraledande SQUID-magnetometrar baserar sig på styrning och/eller direktmätning av det magnetiska flöde som de exponeras för. En grupp sensorer bygger på magnetfältets beroende egenskaper hos atomers kärn- och elektronspinn. Magnetometrar med helium-3-kärnor och helium-4-atomer, i vilka man använder sig av kärn- respektive elektronspinnresonanser, är bara ett par exempel ur denna grupp. Även magnetostriktiva material, vars dimensioner varierar med pålagt magnetfält, och magnetooptiska material, som vrider planpolariserat ljus i närvaro av ett magnetfält, används för magnetiska sensorer. Exempel ur dessa grupper är magnetostriktiva interferometrar och Faraday-rotationsmagnetometrar.

Vektormagnetometrar kan kopplas samman parvis och bilda så kallade gradiometerkonfigurationer. Den enklaste formen av gradiometer består av två magnetometrar som är placerade på ett bestämt avstånd från varandra och kopplade så att de arbetar mot varandra. Det är av största betydelse att

magnetometrarnas axlar är noggrant upplinjerade så att de är perfekt riktade åt motsatt håll (d.v.s. antiparallella). Därmed kan det magnetfältsbidrag som är gemensamt i de båda magnetometrarna helt och hållet släckas ut i utsignalen från gradiometern. Resultatet är en effektiv reduktion av magnetfält

som varierar endast över stora längdskalor. Detta innebär att små och lokala fältvariationer bättre kan detekteras.

Vektormagnetometrar

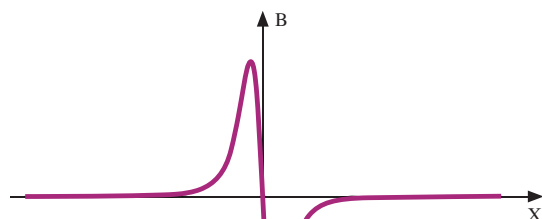
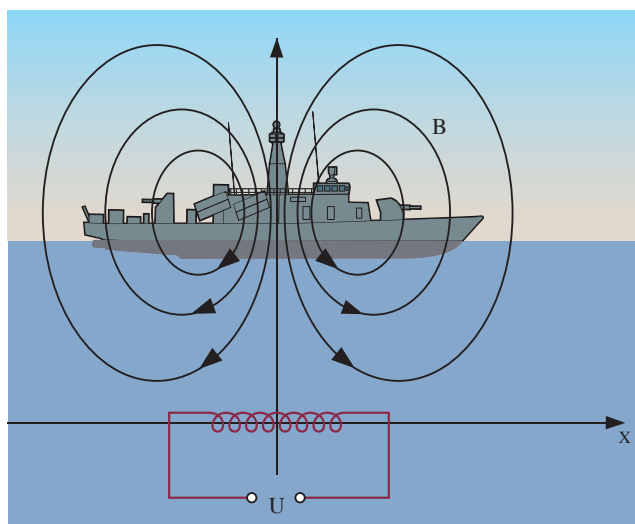
Induktionsspolen

Induktionsspolen är den enklaste typen av sensor för precisionsmätningar av magnetfält. I sitt allra enklaste utförande består den av en enkel luftlindad slinga, men den kan t.ex. också vara långsmal och lindad runt en kärna av ett material med hög permeabilitet (brant och hög hystereskurva). Fördelen med en kärna är att känsligheten ökar. Välkonstruerade system baserade på induktionsspolar kan detektera fält ner till pikotesla, och det finns ingen övre begränsning för deras mätområde.

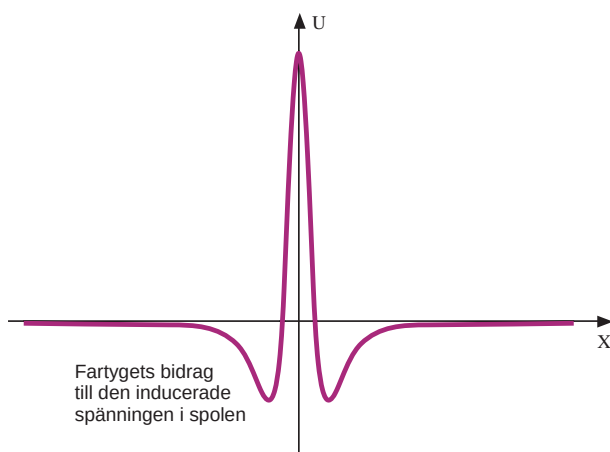
Induktionsspolens funktionssätt bygger på Faradays induktionslag, vilken säger att den inducerade elektriska spänningen i slutna lindningsvarv är proportionell mot tidsderivatan (ändringen per tidsenhet) hos

Exempel på vektormagnetometrar				Ex. på totalfältsmagnetometer
	Induktionsspole	Fluxgate	SQUID	Cesiummagnetometer
Magnetområde	Ned till pT	10 pT–1 mT	Ned till fT	1 pT–0,1 mT
Bygger på princip	Faradays induktionslag	Induktionslagen samt ickelinjäriteter i ferro-magnetisk kärna	Supraledning	Zeemaneffekt
Fördelar	Tillförlitliga Stabila Enkel elektronik	Robust Enkel Billig i drift	Hög känslighet Hög upplösning	Hög upplösning Relativt okänslig för rörelser som vibrationer och rotationer
Nackdelar	Spolarna skrymmande och tunga	Sämrare på att mäta totalfältet p.g.a svårigheter att få sensoraxlarna perfekt ortogonala	Kräver låg temperatur, som dessutom måste vara stabil	Blind för vissa fältriktningar Stor och drar mycket effekt

Tabell 2. Sammanfattande egenskaper för några magnetiska sensorer för marint bruk.



Fartygets bidrag
till magnetfältet
genom spolen



Fartygets bidrag
till den inducerade
spänningen i spolen

Figur 11. Fartygspassage över induktionsspole.

magnetflödet genom spolen. Två huvudtyper kan särskiljas från varandra, nämligen stationära spolar, som endast kan detektera tidsvarierande magnetfält, och rörliga spolar, som även kan mäta statiska fält.

Induktionsspolarerna arbetar alltid passivt, d.v.s. utan drivsignal. Hos spolar med kärna används fältet som skall mätas för att magnetisera materialet. De luftlindade spolarerna kan med fördel användas till gradiometerkonfigurationer, där två motlindade spolarer är seriekopplade.

Ett par fördelar med induktionsspolarer är att de är tillförlitliga och kan göras stabila så att de tål hårda miljöer. En annan fördel är att elektroniken för att avläsa fältet kan göras relativt enkel. Den stora nackdelen är dock att spolarerna kan vara både skrymmande och tunga.

Ett mycket viktigt användningsområde för induktionsspolarer finns inom geofysiken, där de exempelvis kan användas för att registrera variationer i geomagnetiska fält. En annan användning är detektion av passerande föremål (t.ex. fordon, ytfartyg och ubåtar) som lokalt stör den jordmagnetiska fältbildningen, se figur 11.

Fluxgatemagnetometern

Till skillnad från induktionsspolarerna, som är känsliga för magnetfältets tidsderivata, mäter fluxgatemagnetometern själva fältstyrkan direkt. Detta görs genom att i en mätprobb jämföra det omgivande fältet som skall mätas upp med ett internt magnetiskt referensfält. Resultatet av jämförelsen visar sig i form av en asymmetri hos

det magnetiska flödet i proben. Denna asymmetri kan på olika sätt utnyttjas för att läsa av magnetfältet. Den vanligaste metoden går ut på att studera den första övertonen i mätprobens utsignal (vilken ligger vid referensfältets dubbla frekvens). Dess amplitud varierar på ett entydigt sätt med magnetfältet och tas därför som ett mått på fältstyrkan.

I sin allra enklaste utformning består mätproben av en magnetiserbar kärna med hög permeabilitet och litet koercivfält (brant och smal hystereskurva) samt vardera en excitations- och en pickupspole. Spolarna används för anbringande av referensfält respektive avläsning av tidsderivatan hos den magnetiska flödestätheten i kärnan (jfr induktionsspolen). Utöver mätproben behövs en elektronikenhet för magnetometerns drivning samt utvärdering av signalen från mätprobens pickupspole. Tre enaxliga sensorer kombineras för att hela fältet skall kunna mätas. Kritiskt för fluxgatemagnetometerns kvalitet är att de tre sensoraxlarna är ortogonala mot varandra med hög precision.

Kommersiella fluxgatemagnetometrar kan användas till att mäta magnetfält i storleksordningarna ca 10 pT till ca 1 mT. Deras mätområde och upplösning täcker gapet mellan förhållandevis billiga instrument (t.ex. magnetoresistiva) och mycket dyra mätsystem som t.ex. SQUID-magnetometrar. De kännetecknas av hög linjäritet och stabilitet, hög känslighet för riktningen hos magnetfältet och stor driftsäkerhet. Vidare är de robusta, relativt enkla och billiga i drift. Exempel på

användningsområden är studier av geomagnetism, mineralletning, rymdforskning, kompasser samt marina tillämpningar såsom ubåtsdetektion och magnetisk signaturanpassning för fartyg.

SQUID-magnetometern

SQUID-magnetometern (Superconducting QUantum Interference Device) är idag en av de mest känsliga magnetometrarna, med en upplösning av några få femtotesla (10^{-15} Tesla). Magnetometerns funktion bygger på ett par effekter som bara förekommer i samband med det supraledande tillståndet.

Supraledning uppträder vid mycket låga temperaturer. För SQUID-magnetometrar som bygger på konventionella lågtemperatursupraledare används temperaturen 4,2 K ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$). För instrument som är byggda kring de nya högtemperatursupraledarna används ofta temperaturer i intervallet ca 40-70 K (ca -230 till $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). För att möjliggöra mätningar vid andra temperaturer än den supraledande SQUID-sensorns ingår en flödestransformator, som induktivt kopplar in magnetflödet från mätpunkten till det nedkylda SQUID-elementet.

Fördelen med SQUID-baserade mätsystem är deras mycket höga upplösning. Stora nackdelar, som är av speciell betydelse för fältbruk, är att SQUID-sensorn måste hållas nedkyld, och att temperaturen måste hållas stabil med hög precision för att brusnivån skall hållas nere. Flytande helium för de system som arbetar vid de lägsta tempe-

raturerna är både dyrt och svårhanterat ute i fält. Dessutom ställs speciella krav på heliumbehållaren (kryostaten) för att inte heliumvätskan skall skvalpa omkring och därigenom orsaka temperaturfluktuationer. De instrument som arbetar vid de högre temperaturerna kan kylas med speciella kylaggregat. Dessa magnetometrar har dock ännu inte visat samma prestanda som de heliumkylda.

Viktiga användningsområden för SQUID-baserade mätsystem finns främst inom materialfysikforskningen samt inom sjukvården. Även militära spaningstillämpningar finns.

Totalfältsmagnetometrar

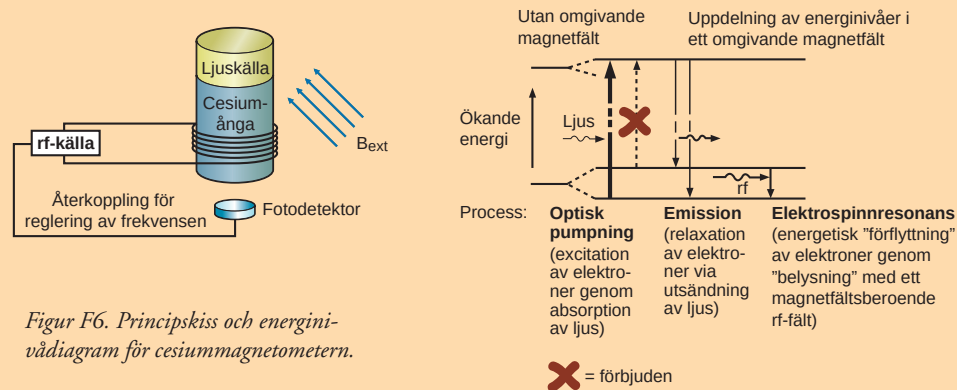
Cesiummagnetometern

Cesiummagnetometern är av totalfältstyp och utnyttjar atomers optiska egenskaper, d.v.s. att absorption och emission av elektromagnetisk strålning (t.ex. ljus) är förknippat med elektronövergångar mellan olika energinivåer hos atomen. Magnetometerns funktionsprincip bygger på Zeemaneffekten, vilken innebär att vissa av atomers karakteristiska spektrallinjer delas upp i flera linjer med aningen olika våglängder då atomerna utsätts för magnetfält. Uppdelningens storlek beror av magnetfältets styrka och är speciellt tydlig hos alkalimetallerna där cesium ingår. Se vidare faktaruta Cesiummagnetometerns funktion.

Cesiummagnetometerns användningsområde ligger i intervallet ca 1 pT till 0,1 mT. En nackdel är att den är relativt stor och drar mycket effekt. Dessutom är den 'blind' för

CESIUMMAGNETOMETERNS FUNKTION

Cesiummagnetometern utnyttjar tre energinivåer som finns tillgängliga för cesiums enda valenselektron: två lägre nivåer nära varandra och en tredje nivå med betydligt högre energi. Energiskillnaden mellan de lägre tillstånden motsvarar en magnetfältberoende radiofrekvens (rf), medan övergångar mellan en av de lägre nivåerna och det högre tillståndet motsvarar en frekvens i det optiska området.



I magnetometern 'pumpas' en cesiumånga optiskt av ljus med speciella egenskaper, varvid cesiumatomernas valenselektroner upptar energi från ljuset och exciteras. Mängden ljus ångan absorberar övervakas med hjälp av en fotodetektor. På grund av bestämda urvalsregler kan bara elektroner i den ena av de lägre nivåerna exciteras till den tredje nivån med den högsta energin. Nästan omedelbart faller elektronen tillbaka till en av de lägre nivåerna. Med en viss sannolikhet hamnar den i nivån från vilken excitation inte är möjlig, d.v.s. där absorption av ljuset inte är möjlig. Efter tillräckligt lång tid befinner sig nästan alla elektronerna på denna nivå, varvid cesiumångan är relativt transparent för ljus. Detta kallas att ångan är fullständigt pumpad. Genom att lägga på ett radiofrekvent fält kan elektronerna energimässigt 'flyttas' från den ena lägre nivån till den andra. Detta motverkar graden av pumpning och därför kan ångan fortsätta att absorbera ljus. Det radiofrekventa fältet tillsammans med de optiska effekterna ger upphov till en skarp resonans som utnyttjas i cesiummagnetometern. Energin som behövs för att energimässigt 'flytta' elektronerna mellan de båda lägre nivåerna, och därmed också radiofrekvensen, beror på magnetfältets styrka. I magnetometern används en återkoppling från fotodetektorn för att reglera radiofrekvensen för att erhålla minimal ljustransmission genom ångan. Radiofrekvensen är därför ett mått på fältstyrkan.

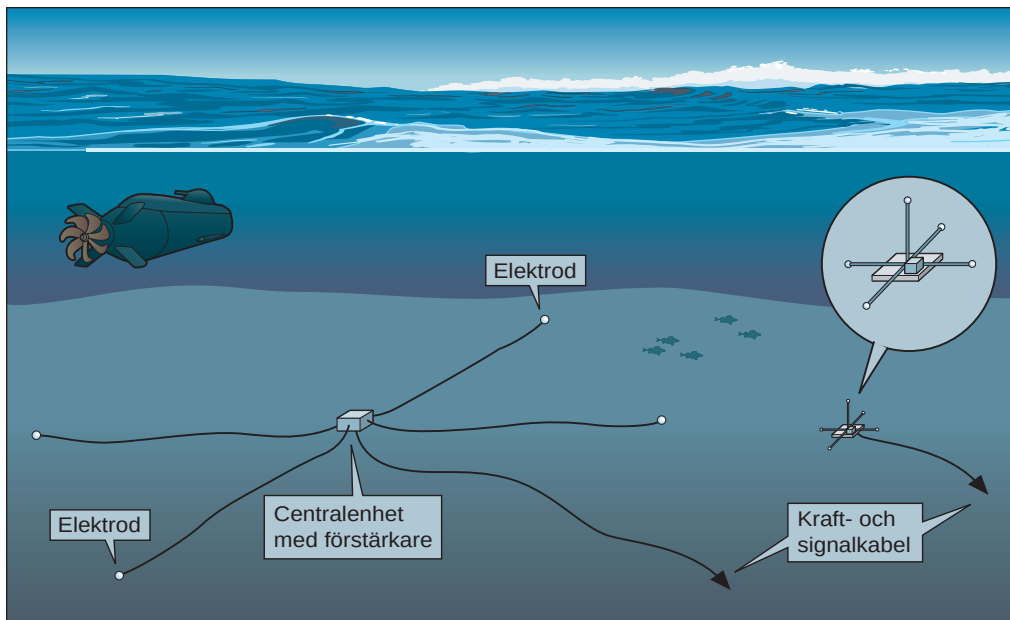
vissa magnetfältorienteringar, vilket gör att magnetometerns orientering i förhållande till fältet som skall uppmätas måste beaktas. En viktig tillämpning är flygburen kartläggning av det geomagnetiska fältets rumsvariationer. Cesiummagnetometern används också för flygburen spaning efter fartyg och ubåtar, där magnetiska anomalier inducerade av dessa farkoster detekteras. Det är just cesiummagnetometerns egenskap av

att vara en totalfältmagnetometer som gör den lämplig för detta ändamål, eftersom den som sådan är relativt okänslig för rörelser, t.ex. vibrationer och rotationer, hos det bärande flygplanet.

Sensorer för elektriska fält

Det naturliga sättet att mäta elektriska fältstyrkor i vatten är att använda sig av elek-

trodpar, där elektroderna har punktkontakt med vattnet och sitter på ett känt avstånd från varandra. En elektrisk potentialskillnad (spänning) U mäts av en voltmeter, oftast via en förstärkare, och därefter beräknas fältstyrkan ur $E = U/d$. Eftersom ett elektrodpar endast mäter fältkomponenter som är parallella med en rät linje som sammanbinder dess båda enskilda sensorelement, konstrueras systemen fleraxliga. Tre elek-



Figur 12. Tvåaxligt långbassystem (till vänster) och treaxligt kortbassystem (till höger) för mätningar av elektriska fält under vattnet. Typiska storlekar över elektrodarmspetsarna: Upp till några hundra meter (långbas) respektive upp till något tiotal meter (kortbas).

trodpar monterade ortogonalt (vinkelrätt) mot varandra kan således mäta upp hela fältet till både storlek och riktning. Kritiskt för sensorsystemets kvalitet är elektroderna och egenskaperna hos den förstärkare som används för att förstärka de låga elektriska spänningar som uppmäts mellan elektroderna. Genom att öka elektrodavståndet kan sensors känslighet förbättras (relativt voltmeters upplösning).

De elektriska sensorsystemen kan delas in i långbassystem och kortbassystem, se figur 12. Hos långbassystemen kan elektrodavståndet vara hundratals meter medan kortbassystemens storlek vanligtvis är någon meter upp till något tiotal meter. Ett långbassystem kan spana över stora ytor och har hög känslighet. Långbassystemet klarar främst att detektera närvaron av en elektrisk källa, t.ex. en

sjöfarkost. På grund av sin utsträckning kan det dock inte se detaljer hos de elektriska fälten. Därför är det sämre på att lokalisera och klassificera källan. Kortbassystem, däremot, kan tack vare att de är av samma storleksordning eller mindre än målet mycket väl upplösa

rumsvariationer i den elektriska signaturen. De 'ser' dock inte lika långt som långbassystem. Figur 13 visar ett exempel på ett kortbassystem.

Den stora tekniska skillnaden mellan olika sensorer för elektriska fält är vilken elektrodtyp



Figur 13. Multisensorplattform för havsbottenbruk utvecklad på FOI. Plattformen är bestyckad med ett treaxligt elektrodsystem av kortbasty för mätning av elektriska fält, magnetometer, trycksensor, hydrofon, lutningsgivare, kompass samt dator eller insamlingsenhet med mät- och kommunikationskort. Systemet är 4 m över de horisontella elektrodarmspetsarna.

som används för att få god elektrisk kontakt med vattnet. En vanligt förekommande elektrod är av silver-silverklorid (Ag-AgCl). Elektroden har stor effektiv yta eftersom den är utformad som en sammanpressad eller sintrad kaka som genomväts av vattnet, och därigenom blir kontakten med vattnet bra. Centralt för dess funktion är att den elektriska kontakten med vattnet involverar en svårlöslig film av silverklorid som sitter

på kakans individuella korn. Filmens varaktighet förhindrar den drift som annars uppstår i den uppmätta signalen och som orsakas av kemiska processer på elektrodytorna.

En elektrodtyp som har utvecklats på FOA/FOI är kolfiberelektroden. Den kännetecknas av att den är robust och snabbt kan användas till mätningar efter det att den lagts ut. Elektroden har en kapaci-

tiv karakteristik, vilket innebär att deras impedans är starkt frekvensberoende. Detta gör att sensorn får en undre gräns för sitt praktiskt användbara frekvensområde. Gränsen är ca 1 mHz, vilket gör att kolfiberelektrodena till skillnad från silver-silverkloridelektrodena inte kan mäta elektriska fält som är statiska relativt sensorsystemet.

Sensorer för seismik och akustik känner av mekaniska vågor i luft, vatten och mark. Dessa mekaniska vågor uppkommer när energi frigörs från exempelvis en jordbävning, en explosion eller en bil i rörelse.

Akustiska och seismiska sensorer har länge varit intressanta för undervattenstillämpningar och seismologi. På senare tid har de även blivit mer intressanta som en del av informationsinhämtningen vid bland annat markstrid.

Sensorerna kan placeras ut för att övervaka viktiga områden. En nätverksenhet kan innefatta såväl sensor, processor som kommunikationsdel. Sensordelen kan exempelvis vara flera mikrofoner som levererar signaler till processorn. Processorn gör beräkningar och tar fram parametrar i form av riktning, position och objektsklass.

I figur 14 visas frekvensspektrum och frekvensband för några seismiska källor och sensorer.

Hur sensorsystemet hittar målet

Seismiska sensorer är passiva system. Målet avger vibrationer som fortplantar sig i marken. Dessa signaler kan detekteras, lokaliseras och klassificeras av en mottagare.

En akustisk sensor känner av vibrationer i mark, luft eller vatten. Dessa vibrationer skickas ut endera som en puls (t.ex. en explosion) eller som en kontinuerlig signal (t.ex. en bil). Vibrationerna fortplantar

SEISMISKA GRUNDER OCH SEISMISK VÅGUTBREDNING

Vid en jordbävning eller explosion frigörs energi i alla riktningar. Denna energi sätter marken i rörelse på olika sätt. Man brukar skilja på två huvudtyper av vågor.

Volymvågor, som fortplantas nere i jorden, kan färdas flera gånger genom jorden innan de är helt dämpade. Det finns två typer av volymvågor, tryckvågor (p-vågor) och skjuvvågor (s-vågor). P-vågen är en longitudinell våg och är den seismiska våg som rör sig snabbast. S-vågen är en transversell våg och rör sig lite långsammare. Eftersom flytande medier inte har någon skjuvhållfasthet kan s-vågen inte utbreda sig i vätskor.

Ytvågor, som rör sig längs jordytan, bildas enbart vid grunda jordskalv. De har som regel högre amplitud och lägre frekvens än volymvågorna, vilket innebär att de orsakar större skador på mark och byggnader. Dessutom rör de sig långsammare än volymvågorna.

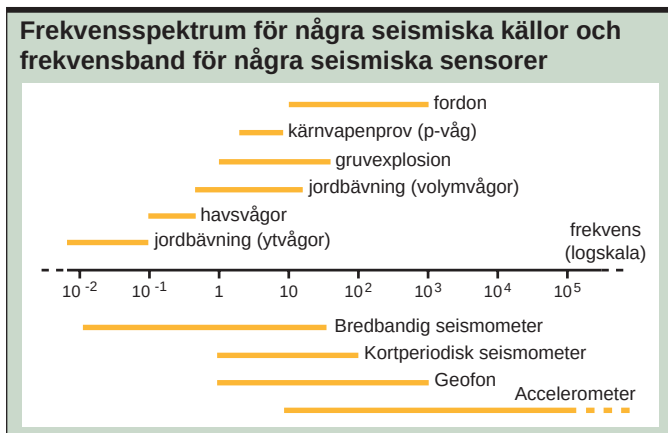
Huvudtyp		Vågtyp	Våghastighet*
Volymvågor	Tryckvågor	Longitudinella	500–13 000 m/s
	Skjuvvågor	Transversella	500–10 000 m/s
Ytvågor		Blandad	100–6 000 m/s

* medieberoende

Tabell 3. Olika vågtyper och deras våghastighet.

Interna källor	Externa källor	Mixade källor
- Jordbävningar - Underjordiska explosioner - Gruvexplosioner - Magmarörelse	- Vind och atmosfäriskt tryck - Vågor och tidvatten 'Kulturellt brus' (trafik, järnvägar) - Flygplan	- Vulkanutbrott - Jordskred

Tabell 4. Exempel på källor som avger seismiska signaler/vågor.



Figur 14. Frekvensspektrum och frekvensband för några seismiska källor och sensorer.

sig sedan på olika sätt beroende på mediet.

Detektion

Syftet med att utnyttja seismiska sensorer är att kunna upptäcka när t.ex. ett kärnvapenprov genomförs eller ett fordon passerar. Det är möjligt att detektera en signalkälla om dess amplitud, form eller frekvensinnehåll skiljer sig ifrån bakgrundsbruset. Detektorns uppgift är att avgöra om signalen består enbart av brus eller av brus samt en eller flera källsignaler. Ett sätt att göra detta är att beräkna energiinnehållet i signalen. Det kan vara svårt att sätta ett tröskelvärde för vad som är källsignal och vad som är brus eftersom energiinnehållet i bruset ofta varierar med tiden. Ett sätt kan därför vara att beräkna kvoten mellan energiinnehållet för ett kortare tidsavsnitt och ett längre tidsavsnitt. Om kvoten är hög görs en detektion.

När en detektion är gjord kan man gå vidare till att lokalisera var källsignalen kommer ifrån.

Lokalisering

För ett mätsystem med bara en sensor sker lokaliseringen med hjälp av ankomsttiderna för de olika vågtyperna. För en given jordmodell kan löptiden för olika vågtyper beräknas. Tidsskillnaden mellan olika vågtypers ankomst till sensorn motsvarar då ett visst avstånd. Med en trekomponentsseismometer kan också riktningen till källan bestämmas. På detta sätt kan en enkel lokalisering göras med bara en station. För att göra en mer noggrann lokalisering krävs registreringar från minst tre mätpunkter med viss geografisk spridning, eftersom det bara är inom sensornätet som hög noggrannhet uppnås. Numera görs detta med datorer och oftast med fler än tre mätpunkter, vilket ger mycket noggranna lokaliseringar.

Klassificering

En klassificering av signalen görs för att avgöra typ av källa. Det kan vara allt från att skilja en kärnvapenexplosion från en jordbävning till att avgöra vilken typ av fordon som passerat. Klassificering kan t.ex. ske genom jämförelse med andra

redan klassificerade källsignaler från samma område.

Sensorer för övervakning

Seismiska sensorer används för militärt bruk för övervakning, dels globalt av kärnvapenprov i fredstid, dels av mindre områden.

För att övervaka ett mindre område, t.ex. ett vägvägsnitt, används geofoner, accelerometrar och akustiska sensorer som mikrofoner. Dessa är effektiva på korta avstånd från målet och kan placeras ut bredvid en väg för att detektera, lokalisera och klassificera fordon som passerar. I framtiden kommer det att vara möjligt att släppa denna typ av sensorer från luften. När de väl tagit mark kan de upprätta ett nätverk som automatiskt rapporterar aktivitet i området.

För regional och global övervakning används seismometrar. Dessa registrerar mer lågfrekventa signaler, vilket innebär att de kan uppfånga signaler på mycket stora avstånd. För att kunna lokalisera och klassificera med god noggrannhet måste det finnas ett nätverk av seismometrar, helst över hela jorden. Idag finns bland annat ett internationellt globalt nätverk för provstoppsövervakning av kärnvapen, Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation (CNTBTO). I nätverket ingår seismiska, hydroakustiska, infraljuds- och radionukleidstationer. Med data från alla dessa stationer går det att upptäcka kärnvapenprov som görs under jord, i vatten eller i atmosfären oavsett var på jorden de genomförs.

RIKTNINGSBESTÄMNING MED ARRAYANALYS

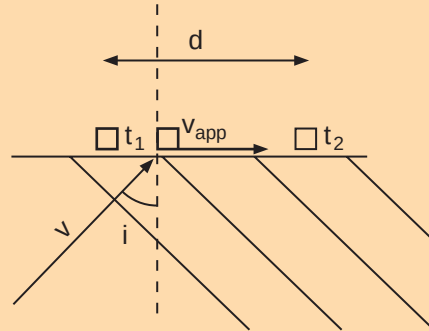
Med en array av seismometrar/geofoner kan riktningen till källan beräknas.

Om vågen antas komma in som en plan våg och hastigheten i marken (v) under arrayen uppskattas kan infallsvinkeln, i , beräknas. Ankomsttiderna (t_1 och t_2) för en signal mäts upp i två punkter. Den apparenta hastigheten, v_{app} , som vågen rör sig med mellan de två punkterna kan beräknas med hjälp av tidsskillnaden, $t_2 - t_1$, för signalen och avståndet, d , mellan punkterna. Infallsvinkeln kan sedan beräknas med hjälp av Snells brytningslag.

$$v_{app} = \frac{d}{(t_2 - t_1)}$$

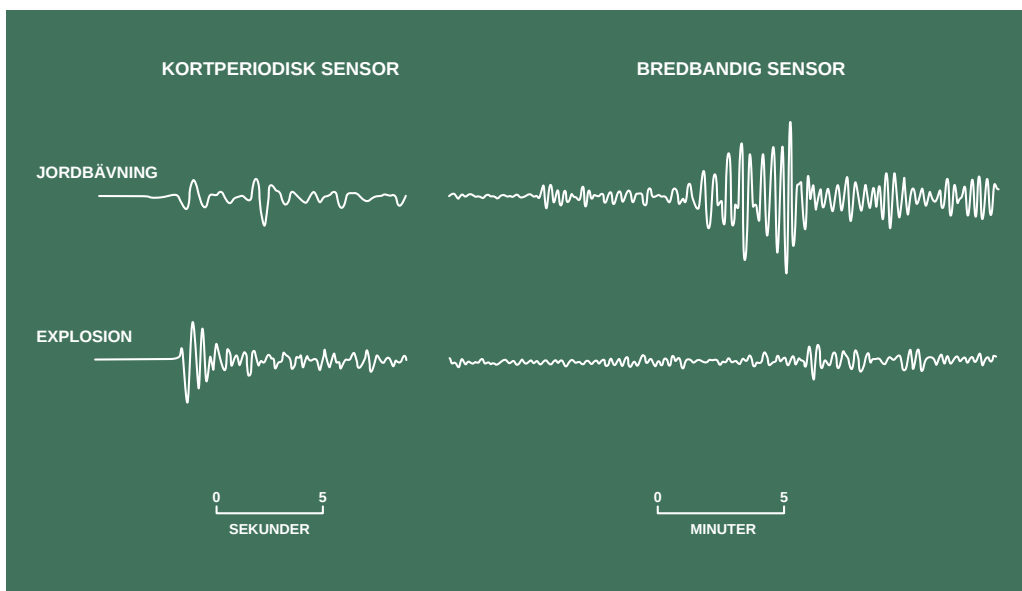
$$\frac{1}{v} \cdot \sin(i) = \frac{1}{v_{app}} \cdot \sin(90^\circ)$$

$$\Rightarrow i = \arcsin\left(\frac{v}{v_{app}}\right) = \arcsin\left(\frac{v \cdot (t_2 - t_1)}{d}\right)$$



Figur F7. Ekvation och bild för beräkning av infallsvinkel.

Arraykonfigurationer används bland annat för provstoppsövervakning, men framför allt för lokal övervakning av mindre områden. En array ger bra upplösning, vilket gör det lättare att klassificera signalens källa.



Figur 15. Skillnader i signaler från en jordbävning respektive en explosion.

Olika sensortyper

Seismometrar

En seismometer består av en fjäderupphängd massa med en omgivande spole. När omgivningen rör sig blir massans rörelse lite försenad, på grund av trögheten i fjädern, i förhållande till seismometerhöljet och spolens rörelse. Den relativa rörelsen mellan spolen och massan genererar en ström i spolen. Strömmen är proportionell mot den relativa hastigheten. Seismometers period avgörs av massans/spolens storlek och fjäderkonstanten, se figur 16.

Med moderna s.k. 'feedbackseismometrar' försöker man istället hålla massan stilla genom att skicka in ström i spolen då massan börjar röra sig. Då är den inskickade strömmen som behövs för att hålla massan stilla proportionell mot den relativa hastigheten.

Det är vanligt att skilja på kortperiodiska och bredbandiga seismometrar. De kortperiodiska seismometrarna är enklare och täcker bara ett mindre frekvensband av höga frekvenser, och är därmed billigare. Bredbandiga seismometrar täcker hela det intressanta frekvensbandet, se figur 14 på sid 31.

Seismometrar placeras stationärt på en punkt och mäter markrörelsen. Det är viktigt att en seismometer är placerad exakt vågrätt. Marken kan röra sig både i horisontal- och i vertikalled, varför en trekomponentsseismometer behövs för bästa noggrannhet.



Figur 16. Seismometer.

Geofoner

Geofonen fungerar som en seismometer, men på mer högfrekventa signaler. Geofonen är dock mer lätthanterlig eftersom den bygger på enklare teknik och inte har samma krav på en exakt vågrätt placering som en seismometer. Detta innebär att den kan sättas ner i marken var som helst.

Civilt används geofoner bland annat inom oljeprospektering. Då skickas konstgjorda signaler (t.ex. sprängning med dynamit) ner i marken och denna signal reflekteras eller refrakteras i de olika marklager som den går igenom innan den registreras av geofonen. På detta sätt kan t.ex. en oljeficka upptäckas och lokaliseras.

Militärt används geofoner som marksensorer för övervakning.

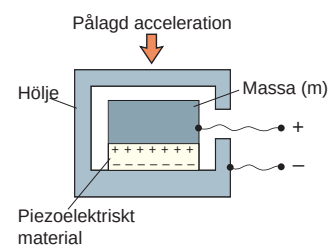
Accelerometrar

En accelerometer mäter hur marken rör sig när t.ex. ett fordon passerar. Till skillnad från geofonen, som mäter markrörelsen uttryckt i hastighet, mäter en accelerometer markaccelerationen, d.v.s. hur mycket

markens rörelse accelererar vid en inkommande signal.

Markaccelerationen kan mätas på flera sätt, exempelvis med en piezoelektrisk accelerometer, se figur 17. Vid markrörelse pressas kristallen i accelerometern ihop eller skjivas av en massa. Den ström som kristallen avger är proportionell mot markaccelerationen.

Accelerometrar har ett frekvensband upp till många kHz och används därför som komplement till geofoner vid lokal övervakning. Civilt används de inom industrin för driftsövervakning av maskiner.



Figur 17. Principskiss för en piezoelektrisk accelerometer.

Mikrofoner

Mikrofoner används för att känna av akustiska signaler i form av tryckvariationer i luften som till exempel motordrivna fordon ger upphov till. En mikrofon består av ett membran samt en förstärkarenhet. Membranet följer tryck- eller hastighetsvariationerna hos luften och ger en signal till en förstärkare där en audio-signal skapas. Det finns flera olika typer av mikrofoner för akustiska tillämpningar. En variant är den dynamiska mikrofonen som använder en spole i ett magnetgap för att generera en utspänning. En annan typ är kondensatormikrofonen som har

ett metalliserat membran med spänning pålagd. Känsligheten är högre för den senare då membranet kan göras mycket lätt.

Exempel på tillämpningsområden för mikrofoner är spaning, kommunikation, bullerdämpning och minröjning.

Utvecklingen av kemisk sensor-teknologi har stor betydelse både inom militära och civila tillämpningsområden. Militärt kan utvecklingen av kemiska sensorsystem leda till stora genombrott i arbetet att finna minor. Andra möjliga applikationer är att spåra sprängämnen samt varna för kemiska stridsgaser. Civilt är sensorerna lämpliga att använda inom produkt- och processkontroll.

En kemisk sensor är en detektor som selektivt känner igen en eller flera molekyler i en analyt, exempelvis en gas eller en gasblandning. Dessa molekyler ger upphov till en kemisk reaktion, som ändrar någon mätbar fysikalisk parameter i sensorhuvudet. Exempel på vanliga detektormaterial är metall-oxider och ledande polymerer, där man mäter förändringar i ledningsförmågan hos materialet, samt piezoelektriska material där massförändringar detekteras.

Detektorn är i sin tur kopplad till någon typ av givare, som överför den kemiska förändringen till en kvantitativ, ofta elektrisk, utsignal. Denna kan sedan omvandlas, signalbehandlas och användas vid olika tillämpningar.

En viktig undergrupp av kemiska sensorer är biosensorer, vilka är baserade på biologiska igenkänningselement. Dessa har ofta god känslighet och selektivitet. Nackdelen är hållbarheten, då de vanligtvis består av enzymer och andra mikroorganismer som lätt dör om deras

omgivning inte är gynnsam.

De flesta kemiska sensorer är inte känsliga för endast ett enda ämne. De kan även ha så kallad 'korskänslighet', d.v.s. en del molekyler ger en annorlunda signal om de befinner sig i en gasblandning än om de är ensamma.

För att få information om en lukt, vilken oftast består av många olika molekyler (kaffe har över 600 olika komponenter), används en uppsättning bestående av många olika sensorer.

En elektronisk näsa har vårt eget luktsinne som inspiration och är uppbyggd kring ett antal individuella, gaskänsliga sensorer som tillsammans kan skilja mellan olika lukter, se figur 18.

En elektronisk näsa måste, liksom människor, tränas att känna igen olika lukter. När en gasblandning eller lukt kommer i kontakt med sensorerna genereras ett speciellt signalmönster, vilket lärs in och utgör facit nästa gång sensorerna utsätts för samma lukt.



Figur 18. En elektronisk näsa består av ett antal kemiska sensorer, en datainsamlingsenhet samt en dator.

Fysikaliska förutsättningar

Den del av det elektromagnetiska spektrumet som utnyttjas av elektrooptiska sensorsystem för detektering av objekt och deras miljö sträcker sig ungefär mellan 0,2 och 14 μm . Under 0,2 μm begränsas transmissionen av ozon (O_3), och för våglängder större än 14 μm är dämpningen p.g.a. koldioxid (CO_2) mycket stark. Spektralområdet 0,2-14 μm kallas optikområdet och innefattar den ultravioletta (UV, 0,2-0,4 μm) delen av spektrum över visuellt (VIS, 0,4-0,8 μm) till nära infrarött och det termiska IR-området. Med nära infrarött (NIR, ca 0,8-2 μm) avses det område som ligger bortom det visuella och där huvudsakligen reflekterad kortvågig strålning registreras. Med termisk IR (TIR, ca 2-14 μm) avses det område där huvudsakligen termisk egenstrålning registreras. Gränserna för NIR och TIR är något flytande, bl.a. beroende på applikation, och andra definitioner kan därför förekomma.

I praktiken har de olika 'atmos-

färsfönstren' fått olika beteckningar, t.ex. MWIR (mid wave IR, ca 3-5 μm) och LWIR (long wave IR, ca 8-14 μm).

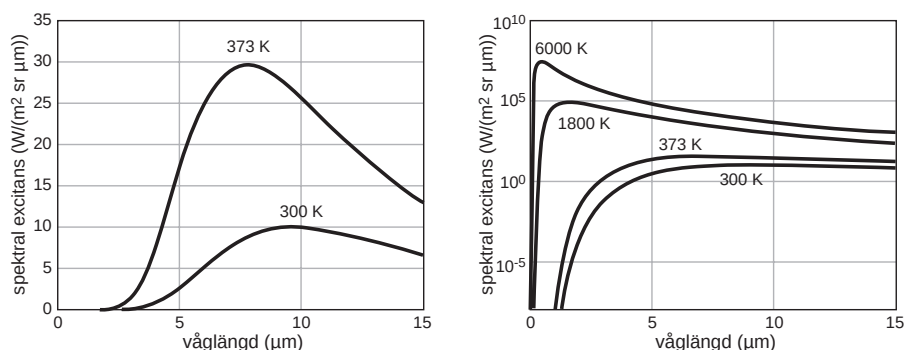
Sensorer känsliga mellan 0,2 och 0,3 μm i UV-området kan användas för detektering av robotflammors UV-strålning. Spektralområdet 0,3-0,4 μm används för spaning vid snöförhållanden. Den korta våglängden gör att strålningen sprids i atmosfären. UV-strålningen är diffus och spaningen störs inte av skuggor.

Sensorerna i det visuella området kan användas under den ljusa delen av dygnet och tillgängligheten står i relation till belysningsnivå och den meteorologiska sikten. Bildförstärkare eller ljusförstärkare (NVD, Night Vision Devices) kräver endast belysning från stjärnhimmel eller på himlen reflekterat ljus från bebyggelse för att kunna fungera.

Termisk IR utnyttjar egenemissionen från objekt och

miljö. För att kunna få en bild måste det finnas en kontrast i utstrålning och därmed i temperatur eller emissionsförmåga. Varje kropp med en temperatur över den absoluta nollpunkten emitterar elektromagnetisk strålning. Strålningens effekt är proportionell mot fjärdepotensen av kroppens temperatur. Den temperatur som yttersta ytan på objekten antar är en jämviktstemperatur mellan energi genererad av objektet och strålningsutbyte med omgivningen. Strålningens fördelning över spektrum framgår av figur 19. Av figuren framgår att maximum för den emitterade effekten förskjuts mot kortare våglängder när temperaturen ökar.

En svartkroppsstrålare vid rumstemperatur (300 K) har sin maximala excitans vid ca 10 μm . Solen (ca 6 000 K) har sin maximala excitans vid ca 0,5 μm , vilket är nära det mänskliga ögats maximala känslighet. Notera att objekt, förutom att



Figur 19. Svartkroppsstrålningens fördelning över spektrum vid 300 K, 373 K, 1 800 K (het robotflamma) och 6 000 K (solen kan approximeras med en svartkroppsstrålare med en temperatur = 6 000 K). För att kunna plotta alla temperaturer i samma diagram har den vertikala axeln i den högra figuren gjorts logaritmisk. Sambandet mellan temperatur och våglängd vid strålningsmax beskrivs av Wiens förskjutningslag vilken kan uttryckas $\lambda_{\text{max}} \approx 3\,000/T$, där λ_{max} anges i μm och T i Kelvin (K, 273 K = 0°C).

de i TIR-området emitterar egenstrålning, speciellt i sneda vinklar reflekterar omgivningen så att den skenbara temperaturen kan variera högst väsentligt med t.ex. olika bakgrunder.

Ett föremåls temperatur bestäms av inkommande strålning, men även av ett antal egenskaper hos föremålet. Värmeledningsförmågan (den termiska konduktiviteten) avgör hur snabbt den absorberade strålningen sprider sig inåt. En torr sandyta eller gräsyta värms snabbt av solen men förblir sval längre ner. En stor sten eller vattensamling fördelar värmen ganska snabbt på djupet, vilket medför att ytan ändrar temperatur långsammare. Den specifika värmekapaciteten bestämmer temperaturhöjningen per till-

förd energienhet per massenhet hos föremålet. Även föremålets tjocklek har betydelse. Ett plåttak kan bli mycket varmt eftersom en stor del av värmen stannar nära ytan. Allt detta bidrar till temperaturkontrastens förändring i tid och rum.

Vid klart väder avkyls föremål olika snabbt när solen gått ner. Vid nederbörd eller då daggen fallit på morgonen minskar kontrasterna i en IR-scen och det kan bli svårt att orientera sig.

Atmosfärspåverkan

Atmosfären påverkar strålningen på flera olika sätt, vilket innebär att räckvidd och tillgänglighet för optiska system bland annat beror av vädret. Ofta ger längre

våglängder bättre transmission (och därmed bättre räckvidd) för optiska system. Exempelvis är TIR-strålningen något mindre beroende av sikten än den visuella strålningen.

Atmosfärspåverkan sker genom absorption, spridning, emission, brytning och turbulens.

De gaser och partiklar som finns i atmosfären ger upphov till absorption och spridning av elektromagnetisk strålning. Absorptionen ger dämpning medan spridningen ger kontrastnedsättning och strålningsförluster. Hur stora dessa effekter är beror av tryck, temperatur och koncentration av molekyler och partiklar.

Absorptionen sker inom vissa

DIFFRAKTION

Diffraction är ett fysikaliskt fenomen som påverkar all vågutbredning. När ljus passerar genom en öppning av något slag sprids det. Den vinkel det sprids med blir större ju mindre öppningen är. I det fall kvaliteten (upplösningen) i en avbildning eller i ett optiskt system begränsas av aperturstorleken (optikens diameter) säger man att bilden som ges av systemet är diffractionsbegränsad. Optiken är då av sådan kvalitet att avbildningsfel i optiken ger mindre bildfel än diffractionen. Bättre avbildning går sålunda inte att få, på grund av fysikaliska begränsningar.

Allmänt kan sägas att spridningen i vinkel på grund av diffraction ges av

$$\theta = \frac{\lambda}{b}$$

för en spalt med bredden b och

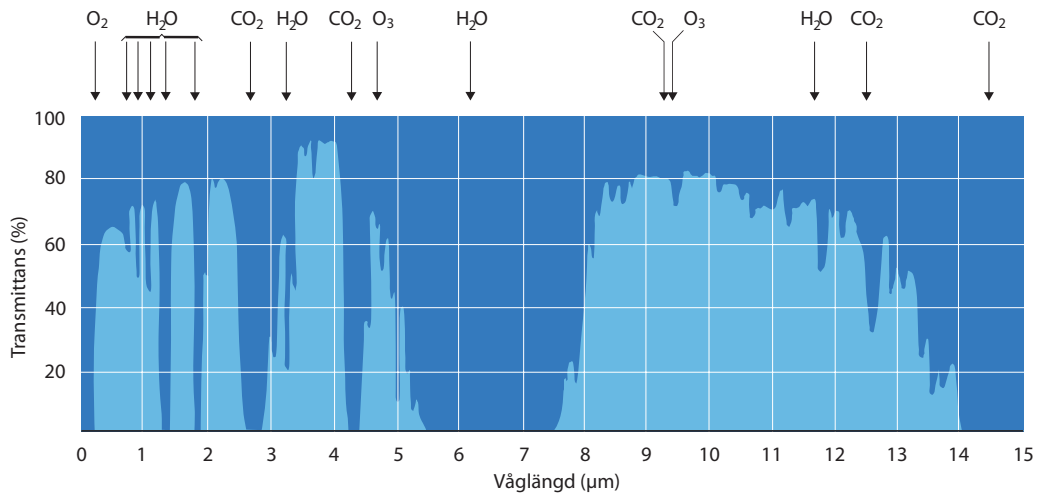
$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$$

för en cirkulär öppning med diameter D . Detta ger spridningen på stort avstånd från öppningen men också i fokus till en lins (eller ett linssystem). Radien r på avbildningen av en punktkälla i en lins med fokallängd f och diameter D blir alltså

$$r = \frac{1,22\lambda f}{D}$$

Två konsekvenser av diffraction är:

- Om vinkeln mellan två objekt är mindre än vinkeln θ kan inte objekten särskiljas.
- Om det betraktade objektet upptar en vinkel som är mindre än θ så ser objektet skenbart större ut. Det här är ett fenomen som exempelvis uppträder vid betraktelse av avlägsna och ljusstarka stjärnor.



Figur 20. Exempel på atmosfärstransmission som funktion av våglängden på ca 2 km avstånd. Figuren är representativ för marknära förhållanden i Sverige. Av figuren framgår även vilka gaser som orsakar dämpning. Om IR-apparatur skall användas i internationella insatser bör man beakta, att med sydligare latituder ökar vatteninnehållet i atmosfären, varvid transmissionen i det långvågiga fönstret minskar.

våglängdsband, vilket ger upphov till s.k. transmissionsfönster, se figur 20. Ozon (O_3) begränsar starkt transmissionen för UV-strålning. Vid hög absolut luftfuktighet och temperaturer $> 25^\circ C$ är transmissionen bättre vid 3-5 μm än vid 8-12 μm . På nordliga breddgrader är i stället transmissionen vanligen bäst i 8-12 μm -bandet.

Transmissionen i regn och snö är relativt oberoende av våglängden medan den kan vara bättre vid längre våglängder i dis och rök. Exempelvis är atmosfärsdämpningen för termiska IR-sensorer mindre i torrdis och rök än för sensorer i det visuella området. Förklaringen är att partikelstorleken för rök är mindre än våglängden (10 μm). Molndroppar och dimdroppar däremot har en typisk storlek på 6-10 μm , med en kraftig spridning. Därför skärmar tät dimma och moln av IR-strålning och utgör hinder för observation. Hög absolut luftfuktighet reducerar

också transmissionen kraftigt. Förutom på vattenångans absorption av IR-strålning beror det också på att aerosolerna ökar i storlek.

En gas som absorberar vid en viss våglängd ger även stark emission vid samma våglängd. Denna emission hos atmosfärens gaser bidrar till bakgrundsstrålning inom det optiska området, vilket reducerar kontrasten och skapar klotter.

Brytning uppträder p.g.a. att det i luft kan finnas horisontella skikt med olika egenskaper. Detta ger upphov till avböjning uppåt eller nedåt. I det optiska området är det i huvudsak luftens temperatur som ger upphov till denna effekt. Brytningen ger upphov till vinkelfel, hägringar och både längre och kortare räckvidder än normalt.

Effekten av turbulens kan lätt observeras när man med kikare betraktar ett föremål på långt

avstånd över uppvärmd terräng vid soligt och klart väder. Bilden 'dallrar' i den varma luften, vilket bidrar till bildskärpened-sättning. En turbulent atmosfär innehåller områden (luftpaket) med slumpmässiga variationer i brytningsindex, vilka är resultatet av fluktuationer i densitet orsakade av temperaturskillnader. Turbulensen varierar över dygnet och avtar kraftigt med höjden över marken.

Elektrooptiska sensortyper

Elektrooptiska (EO) sensorer avser system där optiska och elektroniska komponenter samverkar.

Det finns två huvudtyper av elektrooptiska sensorer. Passiva sensorer sänder inte ut någon egen strålning utan detekterar enbart strålning från objekt. Exempel är TV-kameror, IR-system, robotvarnare i IR- eller UV-området och bildförstärkare. Aktiva EO-sensorer innehåller både en belysande strålkälla, vanligen en laser, och en mottagare/detektor. Exempel är laseravståndsmätare, avbildande laserradar och optikspanare.

De flesta elektrooptiska system mäter intensitet (i vissa fall även polarisation). Aktiva system såsom laserradar kan även ge information om avstånd och rörelse.

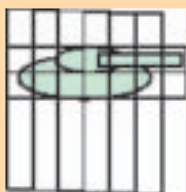
Elektrooptiska system är i vanliga fall avbildande i ett plan. Det finns olika typer av avbildande system, dels skannande med ett eller flera detektorelement, dels stirrande matrisdetektorer. Detektorer för längre våglängder i TIR (3-5 μm och 8-12 μm) måste ofta kylas för att minska det termiska bruset.

Elektrooptiska sensorer kan såväl utnyttjas av enskilda soldater som i alla typer av plattformar, från markfordon till satelliter. Sensorerna kan utnyttjas för övervakning och spaning, upptäckt, förvarning, identifiering, klassificering eller målsökning. En enkel metod för att uppskatta elektrooptiska systems räckvidd mot olika mål är det s.k. Johnsonkriteriet (se faktaruta).

Figur 21 visar exempel på utnyttjande av elektrooptiska sensorsystem.

JOHNSONKRITERIET

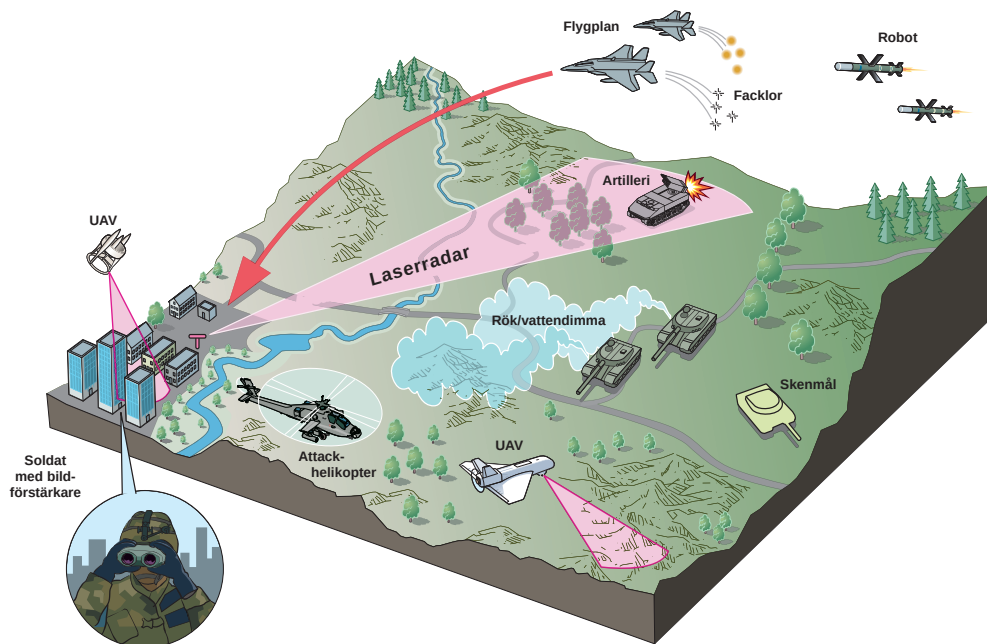
Det s.k. Johnsonkriteriet är en välkänd och enkel metod för uppskattning av elektrooptiska systems räckvidd mot olika mål. Räckvidden fastställs genom experiment med försökspersoner och talar om hur många bildelement (bildelement = pixel, d.v.s. varje detektorelementavbildning) över målets minsta dimension som krävs för att med 50% sannolikhet upptäcka, klassificera och identifiera mål. Metoden togs fram under 1950-talet. Enkla målmodeller som i Johnsonkriteriet kommer på sikt att bytas ut mot full modellering och simulering allt eftersom ögat får mindre betydelse som sensor.



Figur F8. Illustration av behovet av antal bildelement över målets minsta dimension för upptäckt.

Tabellen nedan visar erforderlig upplösning i linje par för detektion, igenkänning och identifiering enligt Johnsonkriteriet. Eftersom ett linje par motsvaras av 2 bildelement får värdena i tabellen multipliceras med 2. Sista raden visar en revidering av medelvärdena som gjordes år 1995.

TYPMÅL	ANTAL LINJE PAR ÖVER MINSTA DIMENSION		
VY FRÅN SIDAN	UPPTÄCKT	KLASSIFICERING	IDENTIFIERING
LASTBIL	0,90	4,5	8,0
STRIDSVAGN	0,75	3,5	6,0
MILITÄR-JEEP	1,20	4,3	5,5
MEDEL, år 1995	1,0	4,0	8,0

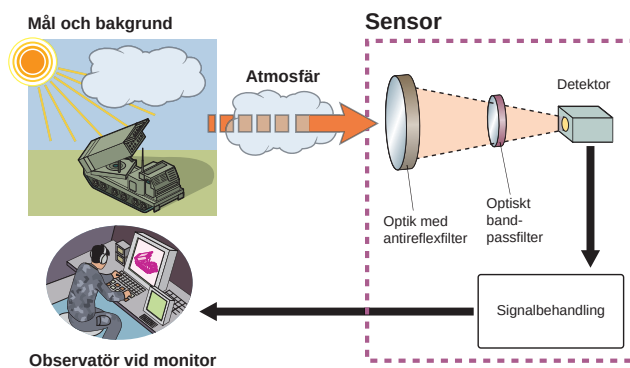


Figur 21. Exempel på utnyttjande av elektrooptiska sensorsystem.

Passiva EO-sensorer

Med passiva elektrooptiska sensorer avses sensorer som mäter termiskt emitterad IR-strålning eller reflektion av naturlig strålning (solljus). En schematisk skiss av ett passivt elektrooptiskt system visas i figur 22. Beroende på vilka typer av föremål vi vill betrakta används sensorer som är känsliga i olika våglängdsområden. De faktorer som påverkar valet av våglängdsområde är främst målens förväntade signaturer, bakgrundsstrålningens variationer (klotter) och atmosfärens transmission. Bakgrunden har sin maximala strålning i det långvågiga transmissionsfönstret; i det kortvågiga området kan solreflexer uppträda.

I många praktiska fall sätts gränsen av klotter, d.v.s. mål-liknande strukturer i bakgrunden. Klotteret kan variera inom



Figur 22. Ett passivt elektrooptiskt bildalstrande system består av åtminstone fem fundamentala komponenter: optik, filter, detektor, signalbehandling och monitor, där detektorn (responselementet) utgör hjärtat. Med syfte att minska transmissionsförlusterna beläggs optiken med ett antireflexivt skikt. Begreppet 'sensor' avser optik+filter+detektor+signalbehandling.

vida gränser. Beroende på bakgrundsklotterets spektrala fördelning är det inte självklart att det spektralområde där objektet har sin maximala utstrålning är det mest optimala området för detektering och identifiering. En trend är att använda sig av sensorer som registrerar i flera

våglängdsområden – multispektrala sensorer. Detta ger potential för undertryckning av bakgrunden och diskriminering av skenmål med lika hög intensitet som målet, men med annorlunda spektral fördelning av strålningen.

Detektorer

Den optimala gränsen för en detektors känslighet sätts av bakgrundsbruset. Detta uppkommer genom att bakgrundsstrålningens fotoner inte emitteras uniformt, utan något slumpmässigt. Bakgrundsbruset kan bestämmas till såväl storlek som spektralfördelning, men det kan inte påverkas. Det är därför en strävan vid konstruktion av kvalificerad IR-apparatutrustning att utforma denna så att ytterligare brustillskott, t.ex. detektorbrus, kan hållas nere.

Det finns två huvudklasser av IR-detektorer: termiska detektorer och kvantdetektorer (fotondetektorer).

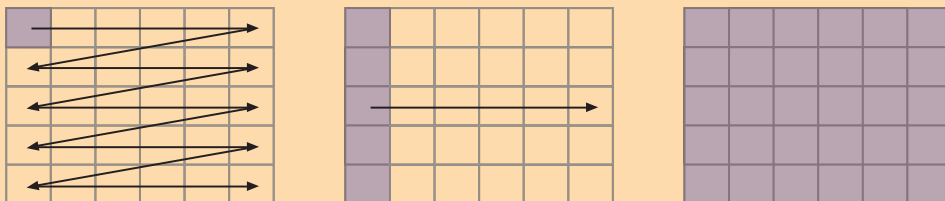
Som detektor i okyllda TIR-sys-

tem används mest termiska detektorer eftersom man, förutom tillräckliga tekniska prestanda, eftersträvar en låg kostnad. Med okyllda TIR-detektorer behövs inte dyra och skrymmande kylsystem, men det sker till priset av sämre prestanda såsom känslighet, snabbhet och upplösning. Termiska detektorer kännetecknas av att infallande, absorberad IR-strålning ger en temperaturändring ΔT hos ett responselement i detektorn. Ett annat kännetecken är att responsiviteten (kvoten mellan utsignal och infallande strålningseffekt) är relativt oberoende av våglängden. Okyllda detektorer avser vanligen också termoelektriskt kyllda (ned till ca 230 K) och temperaturstabiliserade detektorer.

Principen för en kvantdetektor är att IR-strålningen ändrar en elektrisk storhet hos ett responselement, där signalen är proportionell mot antalet absorberade fotoner. Den högsta responsiviteten (och känsligheten) uppnås inom ett begränsat spektralområde. Anledningen är att en foton som träffar en elektron i halvledaren måste vara tillräckligt energirik för att flytta elektronen från ett ickeledande tillstånd till ett ledande. Kvantdetektorerna är betydligt snabbare än de termiska detektorerna. Ett problem med kvantdetektorer som arbetar vid rumstemperatur är det brus som orsakas av termiska rörelser hos elektroner, vilket blir märkbart vid längre våglängder i IR-området. Med kylning ner

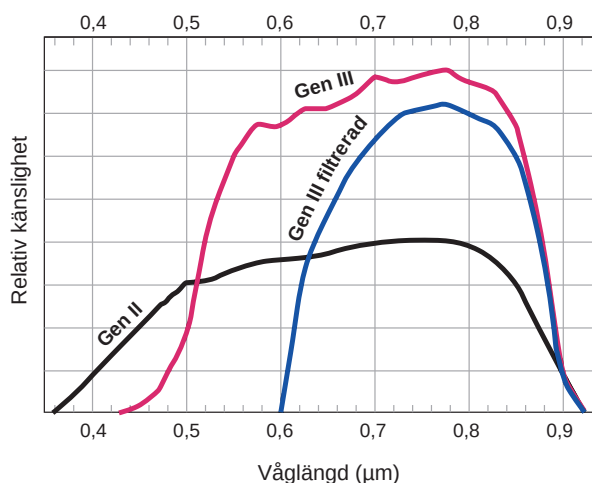
FRÅN DETEKTOR TILL BILDALSTRANDE SYSTEM

Principen för optisk detektering av objekt och omgivning har varit att detektorelementet avsökt hela det intressanta området (seriell skanning). Metoden ställer höga krav på skanhastighet och blir opraktisk vid registrering av TV-bilder med många bildpunkter. Känsligheten hos sensorn förbättrades i och med att man lät en rad av detektorelement avsöka området (parallell skanning). Med allt bättre tillverkningsteknik för detektorer har det blivit möjligt att tillverka detektormosaiker, s.k. fokalplansmatriser (eng. focal plane array, FPA), med lika många element som bildpunkter, varigenom avsökningsmekaniken eliminerats, s.k. stirrande sensorer. Detta har bl.a. möjliggjort utveckling av sensorer med hög bildtakt (1 000 Hz). Den längre integrationstiden har också möjliggjort användning av detektorer med lägre känslighet. En nackdel med fokalplansmatriser är att förstärkningen hos detektorelementen varierar (varierande grad av uniformitet), vilket leder till oönskat brus i bilden (eng. fixed pattern noise, FPN). Det är möjligt att avsevärt reducera detta brus genom lämpliga kalibreringsmetoder.



Figur F9. Principen för seriell skanning (vänster), parallell skanning (mitten) och stirrande matris (höger).

Med förbättrade sensoregenskaper följer emellertid ökad störkänslighet för laser eftersom detektorn i ett stirrande system är exponerad under längre tid i alla riktningar än i ett avsökande sensorsystem.



Figur 23. Exempel på känslighetsområden för bildförstärkare av typ Generation II och Generation III.

till kryogeniska temperaturer (77 K – temperaturen för flytande kväve – eller lägre) ökar känsligheten.

Ett prestandamått för en detektor är dess normaliserade detektivitet, D^* [$\text{cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$]. Inom ett visst våglängdsintervall kan D^* vara 100 ggr högre för en kyld kvantdetektor jämfört med en okyld termisk.

Spaningssensorer

Optisk spaning från satelliter har blivit allt mer betydelsefull och pågår kontinuerligt för inhämtning av viktiga data om potentiella konfliktområden. I händelse av konflikt kan antalet satelliter som övervakar målområdet ökas genom bl.a. omdirigering.

Flygspaning är till viss del fortfarande detsamma som flygfotografering. Den vanligaste filmtypen har känslighet inom det visuella området. För flygspaning i mörker används NIR-film och NIR-blixt. Denna typ av spaning har en lång omloppstid, d.v.s. tiden från

fotografering, framkallning och fototolkning till insats mot mål. Denna klass av spaningskameror fasas dock alltmer ut och ersätts av elektrooptiska (EO) kameror. Datamängderna från EO-kameror blir mycket stor. Informationen är från början digital och kan bild- eller signalbehandlas. Ny spaningstaktik utvecklas för att utnyttja den nya tekniken. Bilder tagna med kort mellanrum kan exempelvis subtraheras och analyseras med avseende på skillnadsinformationen. Att informationen är tillgänglig digitalt skapar förutsättningar för att länka informationen och korta omloppstiden från timmar till nära realtid.

Bildförstärkare förstärker svagt ljus från stjärnor, övre atmosfären och Månen (mycket variabelt). Tekniken gör det möjligt att verka i mörker. En bildförstärkare fungerar väl ned till ljusnivåer motsvarande 1 mlux (klar himmel, natt) men är inte så bra för mulna, mörka nätter. Bildförstärkare kan stödjas med laserbelysning och mörkfilterade strålkastare.

Bildförstärkare brukar delas in i Generation I-III. I huvudsak används idag Generation II och III, se figur 23. Generation III ger avsevärt längre räckvidder än Generation II vid sämre ljusförhållanden (t.ex. molntäckt natthimmel). Generation III har högre känslighet i området strax över 0,8 μm , vilket är det område där natthimlen har sin största utstrålning. En annan fördel med detta område är att vegetationen mestadels reflekterar ljus i NIR-området bättre än i det visuella, vilket kan ge bättre kontraster. Den teknik som används i bildförstärkare kan även utnyttjas till mörkersikten, periskop för mörkerkörning, mörkerkikare m.m.

Bildförstärkare kan inte se genom konventionell stridsrök och störs (bländas) ut av starkare ljus.

Med elektrooptiska sensorer inom TIR-området kan spaning även ske under mörker. Dessa sensorer är inte beroende av någon ljuskälla till skillnad från bildförstärkare. Upplösningen varierar med de atmosfäriska förhållandena.

Okyllda IR-system kan göras mycket små och lätta, men har sämre prestanda än kylda IR-system. De okyllda systemens prestanda är dock tillräckliga för många applikationer, t.ex. säkerhet, räddning, navigering och bevakning. Nattsikten för soldater kan vara handburna eller monterade på hjälm. Hjälpsenande i fordon kan utformas med monitor eller applicering direkt på vindrutan.

Beteckningen FLIR (Forward Looking InfraRed), som från början avsåg en navigerings-sensor för flygplan, används nu som benämning på sensorer för skilda ändamål. En annan benämning är IRV (InfraRed Vision). Upplösningen varierar typiskt mellan 0,1 och 1 mrad beroende på synfält, vilket kan variera mellan 3 och 30 grader i såväl sida som höjd. I vissa system kan synfältet ändras så att det blir ca fem gånger mindre med motsvarande förbättring av upplösningen. FLIR-sensorer finns bl.a. i UAVer, flygplan, helikoptrar, stridsvagnar, och som sikten i robotsystem.

IRST (InfraRed Search and Track) avser en sensor som avsöker en stor sektor i rymden med frekvensen några Hz och en geometrisk upplösning kring 0,1 mrad. Om ett mål skulle upptäckas kan sensorn övergå till snabb avsökning av en liten sektor kring målet. IRST används i flygplan för avspaning av framåtsektorn och på fartyg för spaning varvet runt. Denna typ av system provas även för stridsfordon.

Varnarsensorer

Kvalificerade elektrooptiska sensorsystem används som varnare i varnar- och motverkanssystem (VMS) för flygplan och fartyg. I framtiden kommer varnare sannolikt även att bli vanligare för stridsfordon. Varnarna består av stirrande detektormatriser som detekterar den termiska strålningen från robotskrov och -flamma eller UV-strålningen från robotflamman. Även andra kvalificerade sensorsystem som IRST kan ha varnaruppgifter (multifunktion).

Det finns också laservarnare för detektion av laserstrålning. Det finns ett antal faktorer som försvårar detektionen av laserstrålning. Hotlaserstrålningen spänner över ett stort våglängdsområde, vilket ställer höga krav vid val av detektormaterial. Det stora våglängdsområdet innebär även att systemet kommer att registrera mycket av bakgrundsstrålningen. Vidare finns krav på stor vinkeltäckning för ett laservarnarsystem. De hot-lasrar som används har i de flesta fall mycket korta pulser, typiskt nanosekunder, vilket är en ytterligare svårighet vid detektion.

Målsökare och zonerör

Inom det elektrooptiska området är det främst bildalstrande och värmedetekterande målsökare som utvecklas.

Eld och motorutblås (temperatur ca 1 000 grader) har maximum vid drygt 3 μm , vilket sammanfaller med ett transmissionsfönster i atmosfären. Målsökare i IR-robotar har därför konstruerats för att få störst känslighet i det våglängdsområdet.

Slutfasstyrda vapen med IR-målsökare finns i olika utföranden. Kombination av laserbelysare och målsökare ökar precision och noggrannhet hos vapensystem.

Målsökande substridsdelar blir vanligare och utgör ett allvarligt hot mot t.ex. stridsfordon. Utvecklingen går dessutom mot multisensortechnik, t.ex. kombination av millimetervågsradar och IR.

Målsökare kan vara av retikel-typ eller bildalstrande typ. I det

förstnämnda fallet moduleras målstrålningen av en roterande mönstrad platta, retikel, som ger styrinformation och rymd-filtrering. Denna målsökare är känslig för fackelstörning, vilket man försöker bemöta genom tvåfärgsteknik. Båda typerna av IR-målsökare kan upptäckas och störas med laser.

I målsökare för sjömålsbekämpning används även zonerör av IR-typ, vilket är riktat nedåt mot havsytan. Då roboten passerar över en yta som har en temperatur som avviker från havets, bringas robotens sprängladdning att detonera. Zonerör kan även placeras vid sidan av en väg där man förväntar sig att fientliga fordon skall passera. Zoneröret kan mäta storleken på dessa fordon, och då en kolonn av sannolika mål passerar, låter det en mina detonera.

Utvecklingstrender

Generellt går utvecklingen mot allt fler bildelement i detektormatriserna och allt högre känslighet. Framtida prestanda för okyld IR förutspås bli så pass bra att tillämpningar som mis-silvarning och målföljning kan baseras på denna teknik.

Några utmärkande trender där utvecklingen gått, och går, snabbt är multispektrala och hyperspektrala system, små och enkla system (okyld IR), multisensorsystem samt system som klarar hög bildtakt (större än 1 000 Hz). Multispektrala och hyperspektrala system registrerar i flera spektralband samtidigt. Antalet band i ett multispektralt system är typiskt färre än tio. Ett hyperspektralt system mäter i smala band. Medan spektralvidden för ett

multispektralt system kan vara 1/5 (ned till ca 1/10) av våglängden kan spektralvidden för ett hyperspektralt system vara 1/100 av våglängden. Det finns dock ingen entydig definition vad som menas med 'smala band'. Resultat från mätningar med multispektral teknik visas i figur 24.

Signal- och bildbehandling i passiva sensorsystem

Signal- och bildbehandling utgör en ökande och allt viktigare del av sensorsystemens funktion, dels som operatörsstöd, dels inom autonoma system som målsökare och varnarsystem. Operatörsstöd innefattar bl.a. bildförstärkning, brusreduktion och superupplösning, detektion av intressanta objekt, samt bildregistrering, t.ex. bildmosaiker, målinmätning och ensning av bilddata gentemot andra informationskällor (t.ex. kartor och satellitbilder). För autonoma system är detektion, måligenkänning, målinmätning och bildstöttad navigering viktiga funktioner.

Måldetektion är av central betydelse för många tillämpningar, t.ex. övervakning, spaning, målsökning och robotskottvarning. Detektion sker ofta genom att för varje bildelement i indata beräkna ett antal egenskaper, särdrag, som karakteriserar utseendet hos den lokala omgivningen kring det centrala bildelementet. I detektionssteget bedöms värdena för särdragen av en klassificerare för att avgöra om bildelementet tillhör ett mål eller bakgrunden. Klassificeraren utgörs av en matematisk funktion som vanligen optimerats för sin uppgift via träningsdata bestående av exempel på mål och bakgrunder.

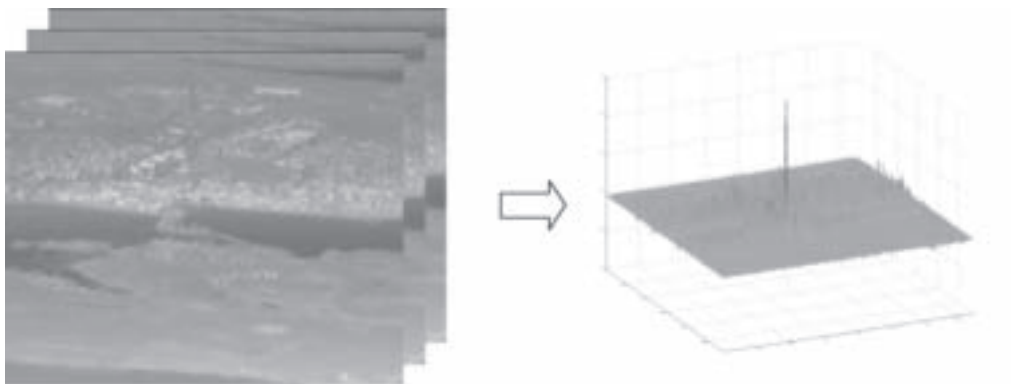
I applikationer som IRST och varnarsystem, där målen är mycket små och svaga, kan anomalidetektion användas för att lokalisera potentiella mål i en klottrig bakgrund. Den grundläggande idén är att anpassa en modell till bakgrunden och lokalisera bildpunkter som inte är väl beskrivna av denna modell. Multispektrala sensorer medger detektion av små mål i klotter baserat på målens spektrala fördelning.

Bakgrundsregistrering är en förutsättning för att detektera rörliga mål från en plattform i rörelse. I traditionella registreringsalgoritmer har man tvingats anta att bakgrunden är en plan yta, vilket är en acceptabel approximation vid t.ex. flygspaning från hög höjd. Exempel visas i figur 25. Under senare år har nya metoder utvecklats för registrering av bilder under svårare förutsättningar, t.ex. i urban miljö och kuperad terräng. Detta medför att detektion av rörliga mål även kan ske i sådana omgivelningar.

Ett i bildplanet utbrett mål har naturligtvis en betydligt större mängd av karakteristiska särdrag än små mål. Den komplexa bakgrundsvariationen har dock hittills utgjort ett stort hinder för automatiserad markmålsdetektion. Även målsignaturernas variation vad gäller skala, aspektvinklar, belysningsriktning och termodynamiskt tillstånd är svåra att modellera. Nya kvalificerade detektorer ger dock ökade möjligheter att särskilja mål från bakgrund, se figur 26.



Figur 24. Flygregistrering över industriområde i Norrköping. Vänstra bilden visar en visuell registrering och den högra bilden (kombination av band) motsvarande multispektrala registrering i 1,5-5 μm . Liksom i VIS erhålls i SWIR god information om ytstrukturer och föremåls form. I TIR fås information om objektens temperatur. Lägg märke till ledningen i närheten av lastbilen – något varmt verkar ha fyllts på eller avtappats. Det kan också noteras att VIS ger information som inte finns i den högra bilden.



Figur 25. Detektion av rörliga flygande mål sker via bakgrundsregistrering och förändringsanalys. Till vänster visas bilder ur en sekvens. Till höger framhävs det rörliga objektet via differensbildning mellan rörelsekomparerade bildpar, tagna med några millisekunders fördröjning.

Med utgångspunkt från den snabba utvecklingen inom signaturanpassningsteknik kommer det, trots nya sensormöjligheter, att bli allt svårare att detektera kamouflerade objekt i naturlig miljö. Ett resultat av detta är att forskning kring kontinuerlig övervakning och förändringsanalys alltmer kommer i fokus, t.ex. jämförelse av bilddata registrerade vid olika tidpunkter.

För autonoma system, i synnerhet målsökare, men även i stödsystem för operatörer, är automatisk måligenkänning (eng. automatic target recognition, ATR) av stor betydelse. Inom precisionsbekämpning är funktioner som träffpunktsval och målprioritering helt beroende av måligenkänning. Framstegen inom detta område har för markmålsfallet hittills varit begränsade, bl.a. beroende på de stora variationerna i utseende hos enskilda objekt; skillnaden mellan olika individer inom samma målkategori kan vara lika stora som skillnaden mellan olika kategorier. Robusta ansatser med potential på kort sikt för markmålsigen-

känning bygger på utnyttjande av multisensorsystem och/eller sammanviktning av information från flera aspektvinklar.

En viktig tillämpning av bildanalys är dess potential att förse autonoma system, som obemannade mark- och flygfarkoster, med rumslig information

om deras närmaste omgivning. Tillämpningar som navigering, målinmätning, kollisionssvarning och ruttplanering kräver alla visuella förmågor som igenkänning av landmärken och skattning av omgivningens topografi.



Figur 26. Exempel på detektion av utbredda markmål i simulerad termisk IR-bild. Sex mål detekteras korrekt och ett falsklarm genereras.

Aktiva EO-sensorer

En aktiv EO-sensor är en optisk sensor som mäter strålning reflekterad från egen belysare (vanligen en laser). Lasersensorer användes militärt först för avståndsmätning, senare även för målinvisning och

ledstrålestyrning av robotar och glidbomber samt för zonrörstillämpningar. Med olika lasermaterial och våglängdskonvertering kan i stort sett hela det intressanta optiska våglängdsområdet täckas in.

Användning av laserbaserade sensorer kan röja användaren, men med rätt avpassad belysning kan denna risk reduceras. Sensorerna är också svårare att störa ut då sensorelementen endast behöver vara aktiverade och exponerade under belysningen. I offensiva tillämpningar uppvägs röjningsrisken av stora fördelar som till exempel penetration av kamouflage, erhållandet av avståndsinformation, tredimensionell avbildning, vibrationssignaturer m.m. Detta gäller speciellt vid användning i mörker.

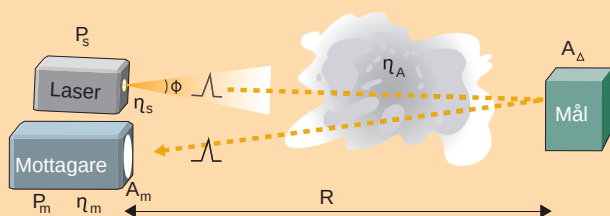
Lasersystem har flera unika förmågor, vilka i många fall är mycket svåruppnåeliga med passiv teknik. Som exempel kan nämnas förmågan att detektera under vatten, att detektera spår i luft (turbulens), att avbilda hårda mål med centimeterupplösning och att kunna utnyttja fenomen som fluorescens, reflektionskontraster och polarisation. Den relativt smala belysningsloben i kombination med röjningsrisken gör dock laserbaserade sensorer mindre lämpliga för övervakning och spaning där mycket stora områden skall täckas.

Laseravståndsmätare

Avståndsmätning är den vanligaste militära lasertillämpningen, där en laser används för att mäta avståndet till mål som underlag för vapeninsats. Laseravståndsmätare har tidigare baserats på Nd:YAG-lasrar (1,06 μm) och därmed varit ögonfarliga. Långa riskavstånd har medfört att det varit svårt att öva på ett taktiskt riktigt sätt. En övergång till 'ögon-

LASERRADAREKVATIONEN

Figuren visar en principiell skiss på en laserradar som belyser ett mål.



Figur F10. Principiell figur för laserradar.

Den mottagna lasereffekten P_m kan beskrivas med laserradarekvationen:

$$P_m = P_s \eta_s \frac{A_\Delta}{\pi (\phi R / 2)^2} \frac{A_m}{R^2} \eta_m t_A^2$$

P_m mottagen lasereffekt [W]

P_s lasereffekt [W]

η_s transmission i sändaroptik

ϕ laserstrålens divergens [rad]

R avstånd sändare-mål [m]

η_A atmosfärstransmission

A_Δ effektiv lasermålarea [m^2/sr]

A_m mottagaroptikens area [m^2]

η_m transmission i mottagaroptik

Divergensen på den utsända laserstrålen är ofta mycket liten, i regel 0,1 till någon milliradian, vilket kan medföra att laserstrålens tvärsnittsarea är mindre än målets geometriska area på kortare avstånd och större på längre avstånd. Detta förhållande skiljer beräkningar av lasersystem från radarsystem som oftast har relativt breda sändarlobor.

säkra' laseravståndsmätare (med en våglängd omkring $1,5\ \mu\text{m}$) gör att dessa kan användas utan nämnvärda restriktioner. Typiska räckvidder för laseravståndsmätare är 10–20 km vid god sikt.

Laserradar

Till skillnad från passiva bildalstrande spaningssensorer kan en laserradar även bestämma ett måls avstånd och hastighet. Med hög avståndsupplösning kan ett måls tredimensionella struktur registreras och användas för klassificering och kanske t.o.m. för identifiering. Diskriminering av mål mot terrängbakgrund underlättas också. I atmosfären fås bakåtspridning från aerosolpartiklar i luften, vilket ger möjlighet till mätning av vindhastighet och sikt. Med s.k. halvledarlasertechnologi kan små, robusta och kostnadseffektiva system vid $1,5\ \mu\text{m}$ konstrueras. Våglängden medför också att systemen blir kompatibla med fiberoptik, vilket möjliggör användning av distribuerade sensorsystem.

Direktdetekterande laserradar

Den enklaste och vanligaste detektionsprincipen för avståndsmätning är s.k. direktdetektion, där den reflekterade målstrålningens intensitet detekteras direkt av detektorn. Strömmen (signalamplituden) från detektorn blir då proportionell mot den optiska effekten i målreflexen. För vissa tillämpningar blir systemets prestanda tillräcklig med denna princip och dessutom kan systemen göras tämligen enkla.

Koherent laserradar

Koherent detektion ger högre känslighet än direktdetektion. Med koherent detektion erhålls information om både fas och amplitud i det mottagna fältet, vilket innebär en mer komplett beskrivning av målreturen än vad som är möjligt vid direktdetektion. Koherenta system är även nödvändiga när detektion av dopplerskift krävs, t.ex. vid mätning av vibration och hastighet.

I ett koherent pulsat laserradarsystem används vanligen en separat kontinuerlig laser som lokaloscillator (LO), se figur 27. I ett kontinuerligt (CW, continuous wave) system splittas ofta en del av den utgående laserstrålen av för att utnyttjas som lokaloscillator, se figur 28. På detta sätt behövs ingen separat laser för LO, vilket medför relativt enkla system.

Avbildningstekniker

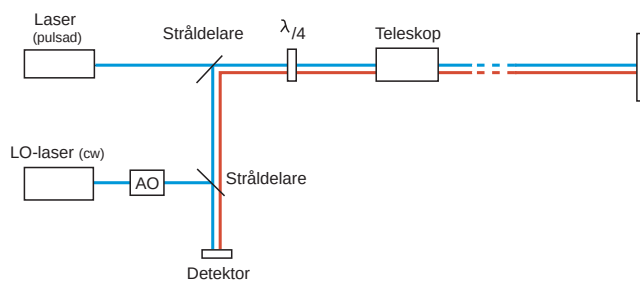
3D-avbildning och förstärkt verklighet

Framtida sensorers förmåga att i realtid avbilda omgivningen i tre dimensioner med hög upplösning har tillämpningar civilt och militärt. Utvecklingen ger full 3D-avbildning i realtid som en TV-kamera. Exempel på tillämpningar är:

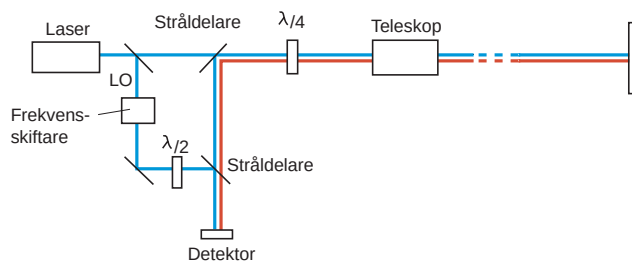
- Automatisk måligenkänning.
- Upptäckt av gömda och kamuflerade mål.
- Autonoma farkoster. 3D-data behövs för navigering, hinderindikering och styrning.
- Förstärkt verklighet, ger möjlighet att agera utan att fysiskt betrakta omgivningen.

Avståndsgrindad avbildning

Avståndsgrindad eller pulsstyrd avbildning (eng. range gated viewing eller burst illumination) kan användas för att öka den information som ges av ett bildalstrande system. Genom att använda en pulsat



Figur 27. Principskiss av en koherent pulsat laserradar.

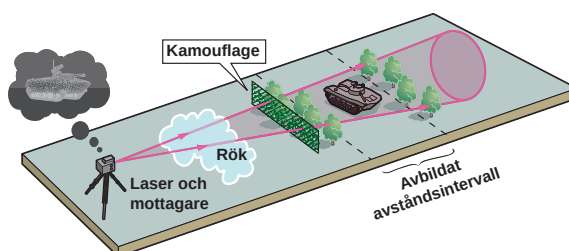


Figur 28. Principskiss av en koherent CW-laserradar.

laser som belyser målet och synkronisera laserpulserna till en avbildande mottagare (där en tidslucka kan varieras) kan ett valbart avståndintervall avbildas och därmed framhäva föremål medan övriga delar diskrimineras, se figur 29. Genom att bakåtspridd laserstrålning från atmosfären diskrimineras förbättras möjligheterna att 'se' genom dis, dimma och rök. Några intressanta egenskaper är förbättrad förmåga att klassificera mål och undertryckning av bakgrundsklotter. Dessutom erhålls avståndsinformation och förmåga att se igenom rök, samt kamouflage och vegetation om den belysande laserstrålningen tränger igenom.

Idag används ofta en tidsstyrd bildförstärkare som mottagare, vilket gör att den belysande laservåglängden ligger i det ögonfarliga området. Nyare teknologi utvecklas som bygger på fokalplansmatriser med känslighet vid 1,5 μm .

Avståndsgrindad avbildning kan användas i kombination med IR-kamera vid spaning på långa avstånd (upp till över 20 km). I IR-bilden framträder målet som någon eller några pixlar. Genom att avståndsgrindad avbildning utnyttjar



Figur 29. Princip för avståndsgrindad avbildning. Avståndintervallet kan placeras så att rök, kamouflage etc. diskrimineras.

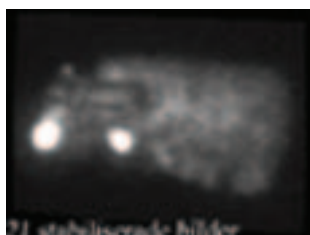
en betydligt kortare våglängd (föredragsvis 1,5 μm jämfört med IR-kamerans 10 μm) erhålls avsevärt bättre upplösning för en jämförbar aperturstorlek, se figur 30. Eftersom tekniken ger avståndet till målet kan även storleken på detta beräknas. Det valda avståndintervallet kan även placeras bakom målet vilket medför att detta framhävs i silhuett, något som kan underlätta identifiering.

Skannande 3D-avbildning

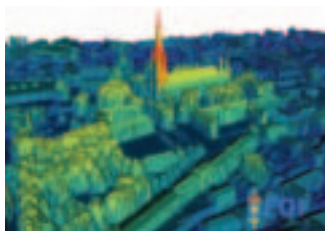
Laserradar i flygande plattformar kan även användas för terrängprofilering med hög upplösning (cm-dm). Stora områden kan mätas in på kort tid och sammanställas så att topografi, vägar, byggnader etc. kan presenteras 3-dimensionellt i en dator, se figur 31. Förflyttningar eller vyer från godtyckligt valda positioner kan

därefter visualiseras och användas för uppdragsplanering och liknande. Detta är av speciellt intresse vid insatser där kännedom om terrängförhållanden är begränsad.

Genom att utnyttja 3-dimensionella registreringar från flera aspektvinklar kan objekt som är delvis skyddade av t.ex. vegetation eller maskering göras synliga. I varje vy kommer åtminstone några laserpulser att tränga igenom det skyllande hindret och reflekteras tillbaka från objektet. Genom att sätta samman flera vyer kan ett punktmoln av det intressanta objektet extraheras/isoleras, se figur 32.



Figur 30. T.v. IR-bild av terräng med labbuss på 10 km avstånd (kan ses som en liten ljus prick t.h.). I mitten bild med avståndsgrindad avbildning och till höger foto av labbuss. Det som framstår som lysande strålkastare i bilden i mitten är starka laserreflexer från de släckta strålkastarna.



Figur 31. Till vänster terrängprofilering med laserradar från UAV, till höger exempel på registrering av Linköping med domkyrkan.

Icke-skannande 3D-avbildning

Den mest avancerade tekniken för 3D-avbildning bygger på direkt eller koherent detekterande avståndsupplösning i varje pixel i en tvådimensionell fokalplansmatris. Framtida lasersensorer kommer att ge full 3D-information med avståndsupplösning i cm. Detta kommer att revolutionera många tillämpningar avseende förmåga att spana mot dolda mål, känna igen mål, navigera m.m.

Signalen från varje detektorelement sammanställs till en tredimensionell bild. Samma teknik kan användas i målsökare men med reducerat synfält och upplösning. Räckvidder för plattformsburna system (fordon, flyg, helikopter, UAV etc.) kan uppgå till ett 10-tal kilometer och för målsökare i vapensystem till 1-2 km. Med koherent detektion kan hastighet, vibrationer, vindhastighet och riktning bestämmas. En merfunktion kan vara kommunikation och IK (igenkänning). I många fall kan ögonsäkra lasersvågslängder eller energinivåer användas.

Laservibrometri

Vibrationssignaturen för ett objekt kan användas för måligenkänning. Med en koherent laserradar kan ett föremåls vibrationer mätas genom att re-

gistrera det småskaliga dopplerskift som introduceras av ytan vibrationsrörelse. Med en laservibrometer kan ytvibrationer hos t.ex. ett fordon registreras, se figur 33. Laservibrometri kan utnyttjas bl.a. för identifiering av delvis skydda mål. Nedgrävda landminor kan detekteras genom att excitera minornas resonansfrekvenser med kraftigt ljud från en högtalare.

Optikspaning

När en laserstråle träffar en optisk sensor reflekteras en del i frontytan och, om lasersvågslängden ligger inom optikens transmissionsområde, även från inre delar av sensorn. Retroreflektion eller kattögeffekten innebär att en del av strålningen reflekteras tillbaka i exakt samma riktning som den inkommande och därför kan detekteras på långa avstånd. Vid optikspaning utnyttjas denna effekt. Optiska sensorer

med avsökande system ger en modulerad retroreflex, vilken kan användas för att klassificera och t.o.m. identifiera målobjektet. De starka lasersignaturerna medger att ett stort vinkelområde (t.ex. 5° i höjd varvet runt flera gånger per sekund med avstånd upp till några km) kan avspanas på kort tid eller långa räckvidder (10-tals km) blir möjliga inom ett mera begränsat område.

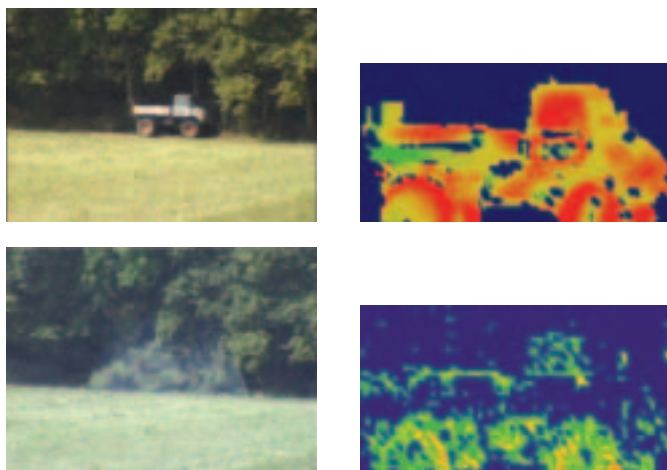
Våglängden som används för spaning anpassas till det våglängdsområde som de optiska hotsensorerna använder. Flera våglängder kan kombineras samtidigt. Efter upptäckt kan målet invisas för motåtgärd från antisensorlaser med störning eller detektorskada (även med den spanande lasern efter strålskärpning) som följd. Figur 34 illustrerar fenomenet och visar också ett exempel på retroreflex från optisk utrustning.

Lidarsystem

Laserradar som används för att sondera omgivningen (atmosfär, mark och sjö) kallas vanligen lidar (eng. light detection and ranging). Många lidarsystem har utvecklats och de används huvudsakligen för civil fjärranalys.



Figur 32. Till vänster ett fordon (Volvo V40) registrerat med en skannande 3D-laserradar genom en trädunge. Till höger visas ett visuellt foto av samma trädunge; fordonet är beläget inom den röda ramen.



Figur 33. Till vänster visas ett visuellt foto av ett fordon (omaskerat respektive maskerat) med motorn på tomgång. Till höger visas vibrationsbilder av motsvarande objekt. (Bilder från FGAN-FOM, Tyskland).

Avancerade koncept

Stora behov finns av att med hög upplösning både kunna se mål i spridande medier (vatten, rök etc.) och att kunna se på stora avstånd (50–100 km). Syntetisk aperturlaser (SAL) kan jämföras med SAR (Syntetisk aperturradar) och kan på sikt realiseras. Detta gäller också avancerade koherenta system med samtidig registrering av vibration, avstånd och intensitet. Laboratoriestudier avseende SAL pågår och principen är demonstrerad.

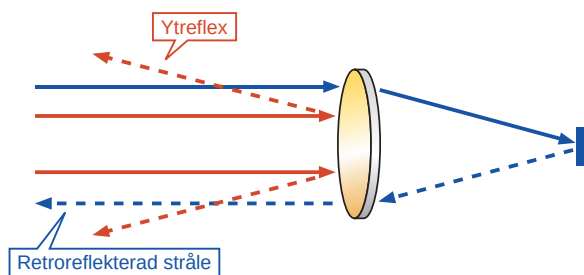
Nya sensorer i framtida ledningssystem

Högupplösande elektrooptiska sensorer ger bättre spaningsförmåga samtidigt som framtida teknologi inom fotonik ger förbättrad förmåga till måligenkänning, baserad på signalbehandling, underrättelseverksamhet (till exempel målbibliotek) och sensorfusion.

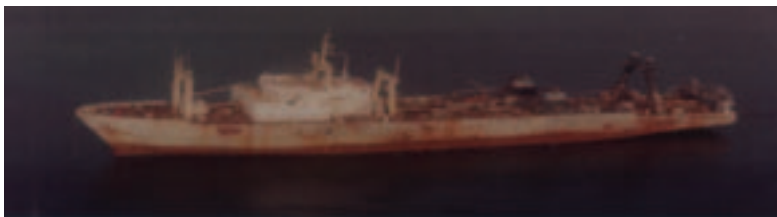
Lasersensorer kan kombineras med IR-sensorer och radar-system för att känna igen mål på långa avstånd (>10 km). För att till exempel från en UAV kunna skilja mellan en obebäddad soldat och en med

manburen IR-robot på ett avstånd motsvarande robot-räckvidden (6–7 km) krävs 7–14 μ rad i vinkelupplösning. Detta kan inte uppnås med realistiska aperturer i termiska IR-system. Med laserbelysning och högupplösande bildförstärkare kan detta uppnås med en apertur på mindre än 20 cm, både dag- och nattetid. För att kunna skilja mellan civila och soldater krävs ännu bättre upplösning.

Samverkan mellan radar och laser/EO-sensorer ger förmåga att avslöja signaturanpassade eller dolda mål i terräng eller bebyggelse. Mål som är dolda för ögat behöver inte vara dolda för en vibrationsavkännande, hyperspektralt eller 3D-avkännande sensor. Andra signaturer som kan utnyttjas är till exempel polarisation och fluorescens. Alternativt kan lasersensorer användas för att detektera vibration och ljud i byggnader, detektera retroreflexer från kikarsikten, se in i 'släckta' rum eller se indirekt runt hörn. Luftburna lasersystem kommer att kunna avslöja undervattensmål (ned till 10–40 meters djup) beroende på vattenkvalitet. Se även figur 35.



Figur 34. Till vänster illustration av retroreflex. Ytreflexerna är små och kan ofta försummas. Till höger visas retroreflektion från fältkikare på avstånd 2 km.



Figur 35. Nederst laserradarbild av en rysk 'fiskfabrik' som sjunkit på 26 m djup i svenska farvatten. (Bild: Sjöfartsverket).

SKYDD MOT STÖRNING/FÖRSTÖRNING AV OPTISKA SENSORER

Taktiska skyddsåtgärder skall bland annat skydda mot upptäckt. Förekomst av optikspanare medför att all användning av optisk utrustning ökar risken för att bli upptäckt. Taktiska skyddsåtgärder går ut på att inte använda optisk utrustning eller ha visuell kontakt med omvärlden i onödan, samt att nyttja objektivskydd när utrustningen inte används, eller vilseleda m.h.a. skenmål.

Tekniska skyddsåtgärder kan delas in i tre typer: statiska, styrda och självaktiverande.

Statiska skydd förändras inte under laserangrepp. Exempel är spektrala filter och NVG (Night Vision Goggles). Filter är funktionella och bra om hotvåglängden är känd. De är också nödvändiga som komplement även i framtiden, för att filtrera bort våglängder utanför sensorns känslighetsområde. Fasta filter kan också verka signatursänkande, d.v.s. lasermålarean sänks, förutsatt att filtret inte har reflekterande ytor nära fokalplanet.

Styrda skydd kan förändra optiska egenskaper på kommando från en yttre styrsignal, från t.ex. laservarnare. Exempel är slutare och avstämbara filter. Utvecklingen går mot styrda elektrooptiska komponenter som är snabbare än mekaniska. Höga krav ställs på omslagstid och dämpning. Under den tid slutaren är aktiverad kan man inte se genom systemet. Ett avstämbar filter skall i princip ge samma skydd mot laser som slutare men släppa igenom ofarliga våglängder (färger). Detta förutsätter att laserstrålningen analyseras så att det avstämbara filtret får rätt styrsignal. Vi får då ett skydd som gör det möjligt att använda optiken trots kontinuerlig laserbelysning.

Självaktiverande material skyddar automatiskt ögat eller sensorn utan påverkan från yttre styrsignaler. Transmissionen för dessa s.k. optiskt icke-linjära material minskar med ökande irradians hos ljuset. Dessa effekter kan vara såväl reversibla (optiska begränsare – begränsar den transmitterade strålningstätheten till en maximal nivå), som irreversibla (optiska säkringar – bryter strålgången permanent när strålningstätheten uppnår en viss tröskelnivå). Ofta krävs hög energitäthet för att aktivera materialen, vilka därför måste placeras i ett mellanfokus. De kan skydda mot skada, eftersom de är mycket snabba ($<<ns$), men ej mot störning och bländning.

Hydrooptik

Vattnets optiska egenskaper

Vattnets absorberande och spridande egenskaper för elektromagnetisk strålning är beroende av strålningens våglängd. Absorption i vatten sker även genom föroreningar, partiklar och lösta ämnen i vattnet. Lösta organiska ämnen brukar benämnas CDOM (Colored dissolved organic matter). Dessa lösta ämnen kommer bland annat från floder och älvar och förklarar den gulbrunaktiga färgen som ibland syns i strandnära vatten, och vissa tider även långt ut i kustbandet.

Med ökad gångsträcka i vatten breddas en ljusstråle, även om ljuset från källan ursprungligen består av parallella ljusstrålar. Spridningen är, liksom absorptionen, beroende av ljusets våglängd. Summan av absorption och spridning brukar benämnas total dämpning.

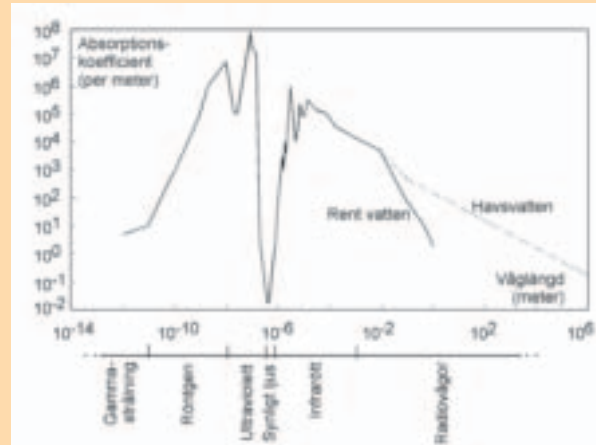
Sensorsystem

Beroende på tillämpning kan sensorer konfigureras med sändare och mottagare över respektive under vattenytan.

Undervattenskameror

Det finns flera metoder som kan användas för bildalstring. En videokamera är ett exempel på ett passivt system. Ett exempel på ett aktivt system är ett skannande lasersystem, där en smal laserstråle och en smal mottagarlob sveper över scenen och den reflekterade intensiteten återskapas för bildbehandling eller manuell tolkning. Ett annat aktivt system är

LJUSABSORPTION I VATTEN



Figur F11. Ljusabsorption i vatten som funktion av våglängden.

Ljusabsorptionen i vatten minskar med mer än nio tiopotenser för synligt ljus relativt absorptionen för ultraviolett (UV) och infrarött (IR) ljus. Fotonerna har endast ett svagt energiutbyte med vattenmolekylerna och absorptionen har därmed ett minimum för dessa våglängder. För minskad våglängd mot UV överensstämmer fotonenergin med atomernas energiövergångar och absorptionen ökar kraftigt. Då våglängden ökar från rött synligt ljus till nära infrarött har fotonerna rätt energi för att utbyta energi med vattenmolekylernas vibrations- och (för ytterligare ökad våglängd) rotationsnivåer. Detta medför att absorptionen ökar kraftigt.

en avståndsgrindad kamera, där en kort laserpuls sänds ut över en bredare lob. Mottagarens förstärkning tidsstyrs så att endast bilden från det intressanta avståndet förstärks. På detta sätt dämpas det spridda ljuset från vattnet, och objekt på det valda avståndet framträder tydligare. Båda dessa metoder ger större räckvidd och tydligare bilder än med dagens teknik med vanlig videokamera och lampbelysning.

Flygburen sensor

I skärgårdsmiljö med dess grun-

da vatten och smala sund, där fartygsburna system bara delvis eller inte alls kan operera har en flygburen sensor stora fördelar. Kort inställetid och hög yt-täckningshastighet kännetecknar flygburna system.

Djupnoggrannheten för flygburen lasersondering varierar med djup och aktuella siktförhållanden i vattnet, och är ofta bättre än femton centimeter.

Fartygsmonterad laser

Lidar monterad på fartyg (t.ex. i masttoppen eller stäven) utgör



Figur 36. Detektion på vattenytan med flygburen laser.

en möjlighet för att detektera drivminor, nödställda och andra föremål i det övre vattenskiktet.

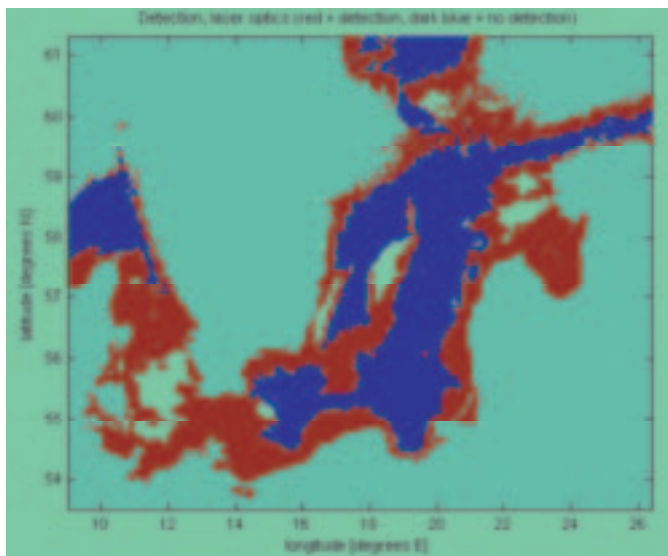
Tillämpningar

Sjöräddning

Spaning med fartygs- eller flygburen laser kan med fördel användas vid snabba sjöräddningsinsatser för att med höga avsökningshastigheter finna nödställda, livbåtar eller vrakdelar på vattenytan, se figur 36. Jämfört med visuell spaning medger metoden förbättrad förmåga under mörker och dålig sikt.

Sjökartering/spaning

Flygburen lasersonering har använts av Sjöfartsverket för kartering. Metoden är även godkänd enligt internationella



Figur 37. Med en experimentell modell skattas räckvidden för flygburen detektion av navigerande större undervattensfarkost. Mörkröda områden ligger inom laserräckvidden för typiska förhållanden nattetid i november.

hydrografiska organisationens (IHO) normer för framtagning av data för sjökort. Med för ändamålet anpassat system används flygburen djupsondering för detektion av undervattensmål, se figur 37. Djupräckvidden beror bland annat av vattenkvalitet, målform och storlek.

Miljöskydd

Ett flygburet lasersystem kan bland annat användas för fjärrmätning av den ytnära undervattensmiljön (t.ex. klorofyll och algbestånd) eller för att ringa in oljeutsläpp och andra miljöfarliga utsläpp.

Minklassificering

Högupplösta bilder i 2D eller 3D kan genereras med t.ex. grindad teknik. Genom att använda lasrar och/eller mottagare vid flera ljusvåglängder, erhålls både avståndsbild och färgsignatur. Speciellt starka kontraster mellan växtlighet och 'döda ting' kan fås genom att utnyttja s.k. fluorescens. Fluorescens innebär att den reflekterade ljusvåglängden blir en annan än den utsända laservåglängden.

Fundamentala karakteristika

RADAR (Radio Detection and Ranging) är namn på utrustning och metod för att upptäcka, lokalisera och karakterisera objekt genom belysning med elektromagnetiska vågor. En radarsignal sänds ut och riktas mot ett objekt med hjälp av en antenn, signalen forplantas med ljushastigheten genom atmosfären, reflekteras i målet och fångas upp av en mottagare varvid i första hand avstånd, riktning och hastighet kan bestämmas.

Avståndet till objektet ges av signalens löptid från sändaren till objektet och tillbaka till mottagaren. Riktningen till objektet ges av höjd- och sidvinklar hos antennloben. Objektets närmandehastighet ges av frekvensskiftet (dopplerskiftet) i den mottagna signalen.

Radarsignalen är en elektromagnetisk våg som karakteriseras av amplitud, fas, bärfrekvens, utbredningsriktning och polarisation (det elektriska fältets riktning som funktion av tiden). Vågen påverkas av atmosfär och hinder på sin väg.

Bärfrekvensen $f = c / \lambda$, där c är ljushastigheten (ca $3 \cdot 10^8$ m/s) och λ är våglängden i meter, har avgörande inflytande på radarns räckvidd och storlek och därmed användbarhet i olika sammanhang. Frekvens mäts i enheten Hertz [Hz = 1/s]. Sedan andra världskriget grupperas radarsystem ofta efter den använda bärfrekvensen och man talar om L-, S-, C-, X- och K-banden. Numera ingår

även frekvenser på HF- (High Frequency), VHF- (Very High Frequency) och UHF- (Ultra High Frequency) banden samt inom millimetervågsområdet, se figur 38. En annan gruppering i tre huvudklasser är kortvågs-, mikrovågs- och millimetervågsradar (meter-, centimeter- respektive millimetervågor).

Radarsignalens utbredningsriktning ges av antennlobens riktning och öppningsvinkel. Öppningsvinkeln är proportionell mot våglängden dividerad med antennstorleken (t.ex. en parabolantenns diameter), varför en smal lob kräver stor antenn eller kort våglängd. En smal lob behövs för att kunna särskilja flera mål.

Metervågsradar fanns vid andra världskrigets utbrott, vidareutvecklades under kriget och bedöms ha haft avgörande betydelse för krigsförloppet när England hotades. Ett exempel är radarkedjan 'Chain Home' längs engelska öst- och sydkusten.

Antennerna blir stora och otympliga vid metervåglängder. Dessa våglängder har emellertid vissa intressanta egenskaper som möjliggör mycket lång

räckvidd över ytan, eller vid flygspaning mot marken upptäckt av fordonsstora objekt, även om dessa står under skyddande vegetation. Mycket stora antenner krävs i dessa tillämpningar för att få tillräcklig upplösning, varför metoder för syntetisk antennapertur används vid markspaning. Se vidare avsnitten om OTH-radar och syntetisk aperturradar.

Framför allt tillgänglig sändarteknik bestämmer vilka våglängder som är möjliga att använda. De allierade utvecklade under andra världskriget centimetervågsradar baserad på den i England utvecklade magnetronen, vilket gav ett viktigt försprång inom radartechniken. Utvecklingen gick de följande åren snabbt mot radarsystem med kortare våglängd efterhand som nya, bättre mikrovågskomponenter kunde tillverkas för centimetervågor och så småningom också för millimetervågor.

Antennerna till dessa radarsystem kunde användas först på fartyg och sedan även på flygplan. Centimetervågor har tillräckligt liten atmosfärsdämpning för dessa användningar, medan millimetervågor har relativt stor

Frekvens (f)	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz
Frekvens (f)			1 2 4 8 12 40 100	GHz		
RadARBAND	HF	VHF	UHF	L S C X K V W		mm
Våglängd (λ)	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm	1 mm

Figur 38. Elektromagnetiskt spektrum över radarfrekvenserna. UHF-bandet går egentligen upp till 3 GHz och överlappar således L-bandet och del av S-bandet. Mm-bandet börjar vid ca 30 GHz och överlappar W-, V- och del av K-bandet.

Radारband	Frekvens	Radartillämpning, exempel	Räckvidd mot militära mål
HF	3–30 MHz	Ytspaning, fast installerad	OTH-radar, <3 000 km
VHF	30–300 MHz	Markspaning från flygplan	SAR ser genom vegetation
UHF	300–3000 MHz	Överlappar L- och S-band	
L	1–2 GHz	Markbaserad mot luftmål	<500 km
S	2–4 GHz	Flygburen mot luft- och markmål	<500 km, även lågtflygande
C	4–8 GHz	Artillerilokalisering	
X	8–12 GHz	Spaning och eldledning från stridsflygplan	<300 km
K _u	12–18 GHz	Eldledning	<50 km
K	18–26 GHz	Eldledning, robotmålsökare	
K _a	26–40 GHz	Eldledning, robotmålsökare	<20 km
V	40–80 GHz	Bilradar 77 GHz	<1 km
W	80–110 GHz	Målsökare, bevakning, kontroll (t. ex. spaning genom kläder)	Kort
mm	30–300 GHz	Överlappar K _a –W-banden	Under utforskning

Tabell 5. Olika radarband karakteriserade utgående från frekvens och tillämpningar.

dämpning, speciellt i samband med nederbörd. Millimeter-vågssystem har därför endast fått användning i korthållsradar upp till 10–20 km. Komponenter för millimetervågor blir små men har hittills varit svåra och dyra att tillverka.

Val av radarband i en viss tillämpning är en kompromiss mellan krav på bland annat räckvidd, noggrannhet, upplösning i avstånd, vinkel och hastighet, samt inte minst tillgänglig effekt och tillgängligt utrymme i tillämpningen i fråga. De olika radarbanden har därför delvis olika användning, se tabell 5.

Undre gränsen för radaranvändning är ca 1 MHz, vilket motsvarar en våglängd på 300 meter. Denna gräns sätts av att vid minskande frekvens jonosfärens reflekterande förmåga ökar (medför t.ex. begränsade möjligheter att använda satellitradar under ca 500

MHz), antennstorleken ökar (medför hanteringsproblem) och dopplertekniken minskar (gör det svårare att diskriminera rörliga mål från stationär bakgrund). Den övre gränsen ligger vid ca 300 GHz (våglängd 1 mm). Denna gräns sätts av atmosfärsabsorption och tekniska begränsningar.

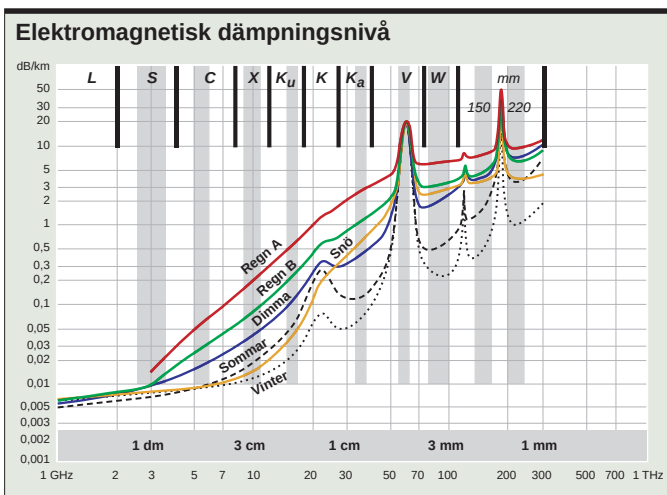
Utbredningsförhållanden

Atmosfärsdämpningen är en avgörande faktor när det gäller räckvidden vid olika bärfrekvenser. Dämpningen är en funktion av frekvensen och är av betydelse över ca 10 GHz. Den avtar med lufttrycket och därmed med höjden över havet. Ökande luftfuktighet och nederbörd förstärker dämpningen. Dämpning vid olika väderförhållanden för olika frekvenser vid marknivå framgår av figur 39. Generellt gäller dock för radarsystem att väderpåverkan är relativt liten.

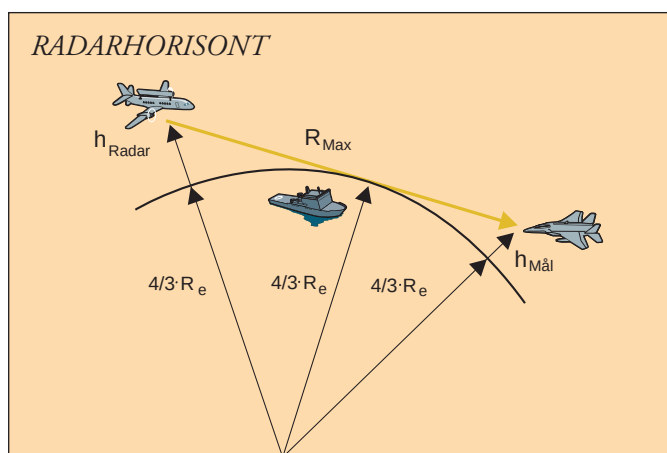
Anomalier i atmosfären, som t.ex. skiktningar, påverkar utbredningen och därför bl.a. räckvidd och täckningsområde. Framför allt är det vattenånginnehållet som påverkar utbredningen.

Strålbrytning uppkommer på grund av att atmosfärens brytningsindex minskar med ökande höjd till följd av ändring i temperatur, tryck och fuktighet vid normalt skiktad atmosfär. Radarstrålen följer därför inte en rät linje utan böjer långsamt av mot jordytan. För att grovt kompensera detta i räckviddsberäkningar brukar man använda en jordradie som är $4/3$ gånger större än i verkligheten (se faktaruta Radarhorisont).

Ett annat fenomen är flervägsutbredning, vilket innebär att radarstrålningen förutom att gå direktvägen till målet går omvägar via reflektioner i olika föremål. Flervägsutbredning



Figur 39. Elektromagnetisk dämpning på radarfrekvenser vid olika väderförhållanden och utbredning i marknivå. Under 1 GHz är dämpningen försumbar. Regn A och B betyder 4 respektive 10 mm/timme.



Figur F12. Schematisk bild visande radarhorisontens inverkan på räckvidden mot mål på låg höjd, t.ex. ett fartyg eller ett jaktflygplan.

Figuren visar hur jordytans krökning påverkar räckvidden R_{Max} från en flygburen radar på höjden h_{Radar} meter över havet till ett mål på höjden $h_{Mål}$ meter. Jordradien $R_e = 6\,378\,000$ meter utökad med faktorn $4/3$ används i Pytagoras sats på de två rätvinkliga trianglarna när sträckan R_{Max} beräknas. Maximal räckvidd i meter blir approximativt

$$R_{Max} \approx 4\,124 \cdot (\sqrt{h_{Radar}} + \sqrt{h_{Mål}})$$

Räkneexempel: En fartygsantenn på 16 meters höjd ser ett mål på 25 meters höjd på maximalt 37 kilometers avstånd.

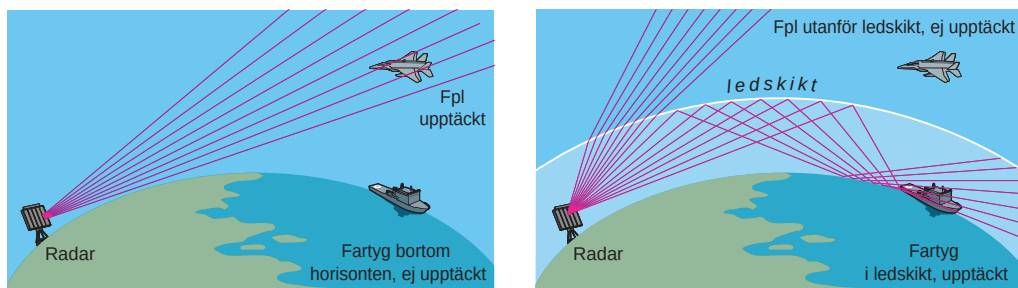
har stor praktisk betydelse vid radareldledning från mark mot lågtflygande luftfarkoster då täckningsluckor och höjdvinkelfel uppstår.

Flervägsutbredning via reflexer i mark eller vattenyta in i radarns huvudlob, s.k. 'hett klotter', utnyttjas av stridsflygplan för att störa ut motståndarens flygburna radarsystem.

Det kan även uppstå ledskikt, vilka kan ge upphov till felindikeringar. Beroende på ledskiktets styrka och radarns placering kan t.ex. motståndarens flygplan på nära avstånd döljas helt. Se exempel i figur 40.

Ledskikt närmast marken eller vattenytan bildas när luften avkyls och bildar stabil skiktning. Den vertikala utsträckningen är upp till omkring 50-100 m. Den horisontella utsträckningen kan röra sig om 100-tals km. Ledskikt kan även uppstå på högre höjd (några hundra meter till någon km). Dessa kallas för höjdleddskikt och kan ha en vertikal utsträckning på hundratalet meter och en horisontell utsträckning ungefär som för tyldskikt.

Dessa radarvägsfenomen följer fysikens lagar och kunskap om deras förekomst, kartläggning av dem på olika höjder och beräkning av täckningsdiagram kan öka användarens möjligheter att utnyttja radarsystemen.



Figur 40. Exempel på atmosfärens påverkan på elektromagnetiska vågors utbredning genom förekomsten av ledskikt.

Radarmål och bakgrund

Radarmål

Reflektivitet (radarmålearea), dopplerförskjutning (frekvensförskjutning) och polarisation är faktorer som karakteriserar ett radarmål. Olika delar av ett mål påverkar dessa faktorer olika och bidrag från de olika delarna sammanlagras vid en radarmätning där också bakgrundens bidrag finns med.

Radarmålearea är ett mått på hur stor del av det infallande fältet som reflekteras tillbaka till radarn. Den beror framför allt av objektets form, material, utsänd frekvens, polarisation och betraktningvinkel. Figur 41 visar exempel på radarmåleareans utseende hos ett flygplan vid olika frekvenser och betraktningvinklar. Med ökad frekvens ökar flikigheten i radarmålearean.

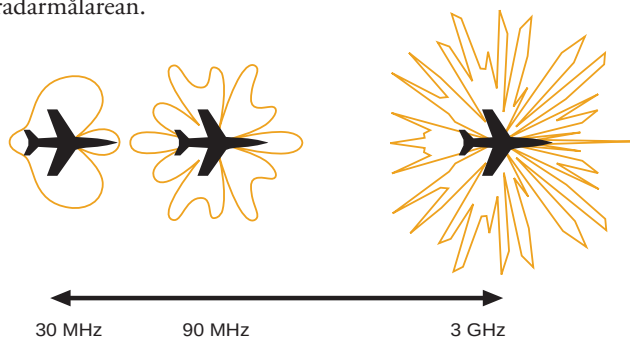
Radarmålearean anges med symbolen σ med dimensionen kvadratmeter och beror av målets effektiva yta A (skild från verklig yta) och våglängden λ enligt formeln $\sigma \approx 4\pi (A/\lambda)^2$, när λ är mycket mindre än målet, som är en plan, ledande yta belyst i normalriktningen. När λ är av samma storleksordning som målet varierar σ kraftigt med frekvensen, och när λ är mycket större än målet avtar σ snabbt med ökande λ . Målets signalabsorberande förmåga och signalens infallsvinkel påverkar också σ .

Typisk radarmålearea för stridsflygplan kan vara 10 m^2 , för litet flygplan 1 m^2 , för kryssningsrobot $0,01 \text{ m}^2$ och för en liten fågel (sparv) $0,001 \text{ m}^2$.

Dopplerförskjutning uppstår när radarmål i radiell rörelse relativt radarn ökar eller minskar frekvensen för det reflekterade fältet beroende på om målet närmar eller fjärfar sig. Även polarisationen i det infallande fältet påverkas vid reflektion i målet.

Bakgrund

I bakgrunden finns klotter, störning och brus. Klotter är samlingsnamnet på alla oönskade ekon som stör radarsignalen. Klotter kan komma från utbredda reflektorer som mark, regn, sjötytor och från olika punktreflektorer som master och byggnader. Man talar därför om målearea per m^2 och per m^3 för yt- respektive volymklotter. Dessutom finns det alltid termiskt brus närvarande, förutom i mottagaren också externt.



Figur 41. Radarmålearea som funktion av frekvens (schematiskt).

Generiskt radarsystem

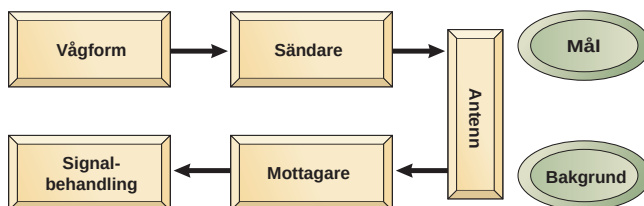
Schematiskt kan ett radarsystem indelas i ett antal block med olika funktioner enligt figur 42. Varje block beskrivs kort nedan.

Gränserna mellan antenn, mottagare och signalbehandling tenderar att bli mera diffus när digitaliseringen av mottagna signaler successivt flyttar sig närmare antennen.

Vågform

En radarsignal består av en bärvåg som moduleras på något sätt med hjälp av en annan signal. Modulationen kan röra bärvågens amplitud, fas, polarisation eller frekvens. Amplitudmodulering med pulssade signaler är vanligt förekommande och har givit upphov till begreppet pulsradar. Under pulserna sänds bärvågen ut i ett stort antal perioder (svängningar).

För vissa tillämpningar utnyttjas istället kontinuerligt utsänd bärvåg (CW-radar, Continuous Wave). Det kan vara tillämpningar där man önskar god förmåga att skilja rörliga mål från markreflexer, t.ex. för upptäckt av lågtflygande robotar över markterräng. Nackdelen med CW-radar är att det ofta krävs olika antenner för sändning och mottagning, separerade från varandra, för att inte sändarsignalen skall läcka in i mottagaren. Den utsända effekten måste också begränsas med hänsyn till aktuellt separationsavstånd, vilket resulterar i kort radar-räckvidd. Kontinuerlig bärvåg utan modulation används t.ex. i enkel polisradar för att mäta enbart dopplerskift och därmed bestämma målhastighet.



Figur 42. Blockschema för generiskt radarsystem.

PULSVÅGFORM



Figur F13. Exempel på pulsvågform där varje puls måste moduleras med lämpligt fasskift (ej illustrerat) för bibehållen räckvidd och högre upplösning än pulsen annars medger.

Korta pulser med hög bandbredd krävs för hög upplösning. En kort puls måste ha högre effekt för att innehålla lika mycket energi som en lång och därmed få samma räckvidd. Korta pulser med hög effekt är svåra att realisera. Lösningen på problemet är att t.ex. modulera utsända pulser (bärvågsutsnitt) av längden T_p med på varandra följande fasskift av varaktigheten τ , för att behålla låg effekt och tillräcklig energi i pulserna och samtidigt öka deras bandbredd. Den mottagna signalen filtreras och matchas mot en kopia av den utsända, varvid korta pulser svarande mot längden τ kan återskapas från varje utsänd, modulerad puls och ge den högre upplösningen med bibehållen räckvidd. Förfarandet kallas pulskompression.

τ	Fasskiftets varaktighet	[s]
$B = 1/\tau$	Pulsens bandbredd	[s ⁻¹]
T_p	Pulslängd	[s]
T_r	Pulsrepetitionsintervall (PRI)	[s]
$f_{PRF} = 1/T_r$	Pulsrepetitionsfrekvens (PRF)	[Hz]
$T_p \cdot f_{PRF}$	Arbetsfaktor	
P_t	Pulstoppeffekt	[W]
$P_m = P_t \cdot T_p \cdot f_{PRF}$	Pulsmedeleffekt	[W]
T_i	Integrationstid	[s]

Moduleras bärvågen med ett frekvenssvep kan radarn även mäta avstånd och används t.ex. i navigeringsradar för höjd- och fartmätning.

De flesta militära spanings- och eldledningsradarstationer utnyttjar pulssade signaler. Pulsdopplerradar eller den enklare varianten MTI-radar (Moving Target Indication) är en mer utvecklad pulsradar, som använder pulsföljder för att sortera ut rörliga mål. Detta kräver att fas-historiken i bärvågen är bevarad i pulserna (bärvågsutsnittet) så att koherent signalbehandling kan utföras på den mottagna signalen.

Man talar om hög, medium och låg pulsdoppler (HPD, MPD och LPD) beroende på val av pulsrepetitionsfrekvens (PRF). Valet styrs av krav på entydighet i avstånds- och hastighetsmätningar och kompliceras av att det råder ett motsatsförhållande vid avstånds- och hastighetsmätning.

Pulserna måste ha tillräcklig styrka för att uppfylla räckvidds-krav. Faktaruta Pulsvågform visar en pulssad radarsignal som består av ett antal lika pulser, som tillsammans bildar ett integrationsintervall. Nya integrationsintervall följer på varandra men med andra värden på antalet pulser och deras längd, modulation, repetitionsfrekvens och medeleffekt. Även bärfrekvensen kan bytas mellan intervallen som en störskydds-åtgärd. Energin i pulserna under ett intervall summeras i mottagaren för att ge tillräckligt SNR (signal-till-brusförhållande, signal-to-noise ratio) och därmed önskad räckvidd.

Hög avståndsupplösning kräver korta pulser och hög hastighetsupplösning kräver många pulser (lång integrationstid). Se faktaruta Avstånd-Hastighet-Upplösning.

Sändare

Sändarens funktion är att generera den elektromagnetiska signalen som skall belysa målet och förstärka denna så att ut-sänd effekt är tillräcklig.

Det finns två fundamentalt skilda typer av sändare, koherenta respektive ickekoherenta. En koherent sändare informerar hela tiden mottagaren om fasläget i radarsignalen. Detta gör det möjligt att bestämma radialhastigheten hos målet och det blir också möjligt att filtrera bort bakgrundsklotter som har annan hastighet än målet.

En ickekoherent signalhante-ring medger inte dessa möjlig-heter och förekommer därför inte i modern radar, där has-

tighetsmätning och klotterun-dertryckning är viktig.

Antenn

Radarantennens uppgifter är bl.a. att koncentrera den ut-sända signalen med önskad intensitet i en smal lob, att styra antennloben till önskad rikt-ning, att undertrycka signaler från oönskade riktningar och att ge tillräcklig antennarea för att ta emot signalenergin från målet.

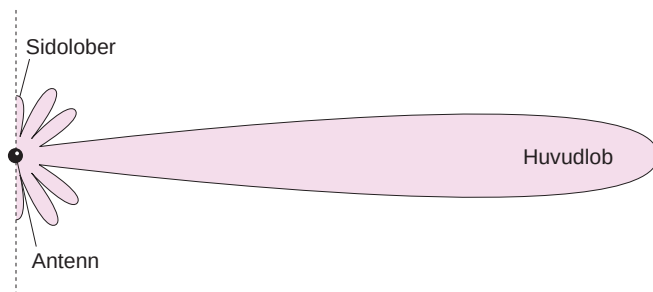
Viktiga antennegenskaper är huvudlobs- och sidolobsni-vår, lobbredd och antennvinst, vilka alla bestäms av antennens storlek, frekvensen och fältför-delningen över antenntytan. Ytterligare en viktig egenskap är polarisationen, vilken bestäms av antenntypen och dess ori-entering och kan vara styrbar i avancerade antenner. Figur 43 visar ett strålningsdiagram med huvudlob och sidolober.

Antennvinsten G anger aktuell

AVSTÅND – HASTIGHET – UPPLÖSNING

Avstånd och radialhastighet samt mätningens upplösning i avstånd och hastighet beräknas med uppmätta värden på löptid och dopplerskift (frekvensändring) enligt följande:

t	Radarpulsens löptid	[s]
f_d	Dopplerskift	[Hz]
c	Ljushastigheten ($3 \cdot 10^8$)	[m/s]
λ	Våglängd	[m]
τ	Modulationspulsernas längd	[s]
$B = 1/\tau$	Signalbandbredd	[Hz]
$R = (c \cdot t)/2$	Avstånd till mätobjekt	[m]
$v_R = (\lambda \cdot f_d)/2$	Närmandehastighet	[m/s]
$\Delta R = c/(2B)$	Avståndsupplösning	[m]
$\Delta v_R = \lambda/(2T_i)$	Hastighetsupplösning	[m/s]



Figur 43. Schematiskt strålningsdiagram. Huvudloben har typiskt 30 dB (1 000 ggr) högre antennvinst än sidoloberna.

VINKELUPPLÖSNING – MONOPULS – GALLERLOB – ANTENNVINST

Målvinkeln mäts genom att rikta en smal antennlob med mekanisk eller elektrisk lobstyrning mot målobjektet. Lobbredden i antennens huvudlob sätter gränsen för vinkelupplösningen och möjligheterna att upplösa närliggande mål.

Ett ungefärligt värde på lobbredden är

$$\theta = k \cdot \lambda / d \quad \text{Lobbredd (sida, höjd)} \quad [\text{radianer}]$$

$$d \quad \text{Antennaperturens storlek} \quad [\text{m}]$$

$$k \quad \text{Normalt } = 1 \text{ i beräkningar} \\ \text{men } 0,88 \text{ svarar mot } 50 \% \\ \text{minskad lobeffektnivå.}$$

För högre inmättningsnoggrannhet av målpositionen i vinkel är det möjligt att utnyttja speciellt utformad antennmatning så att flera samtidiga, separata lober skapas (monopulsförfarande). Man använder sig därvid av fas- eller amplitudskillnader hos målsignalerna i de olika loberna för att kraftigt förbättra vinkelinmättningsnoggrannheten. Med modellbaserad signalbehandling (statistiska metoder) kan vinkelupplösningen ökas ytterligare på bekostnad av längre mättid.

Gallerlobber (flera samtidiga huvudlobber) uppstår om antennelementen i en gruppantenn sitter för glest varvid vinkelmätningen inte blir entydig. Entydig vinkelmätning kräver att avståndet mellan närliggande antennelement är mindre än en halv våglängd.

Antennvinsten ges av fysisk antennarea, effektivitetsfaktor och våglängd

$$G = 4\pi (\epsilon A / \lambda^2) \quad \text{Antennvinst}$$

$$A \quad \text{Fysisk antennyta} \quad [\text{m}^2]$$

$$\epsilon \quad \text{Effektivitetsfaktor (0,4 - 0,9)}$$

effektfordelning i olika riktningar i förhållande till den effekt som erhålls när den tillgängliga effekten fördelats lika i alla riktningar.

Fortfarande är de flesta antenner i radarsystem olika varianter på reflektorantenner. Vanliga är parabolantenner av olika slag, där infallande signal i antennens huvudlob reflekteras och fokuseras av parabolytan mot ett mikrovågshuvud med ett eller flera antennelement.

Gruppantenner blir nu allt vanligare och består av många antennelement ordnade över antennytan (aperturen), vilken vanligen är plan. Gruppantenner medger elektrisk lobstyrning istället för mekanisk.

Det finns två huvudtyper av elektriskt styrda antenner (ESA), passiva och aktiva (AESA), beroende på om effektgenereringen sker med en central högeffektsändare eller vid varje antennelement. Se vidare faktabara Gruppantenner.

Mottagare

Mottagarens funktioner är bl.a. att förstärka av antennen uppfångade signaler (målsignaler och icke önskvärda signaler) inom det aktuella frekvensintervallet och att generera det största SNR på mottagarutgången genom filtrering.

Signalbehandling

Signalbehandlingens uppgift är bl.a. att beräkna primära mätdata från den mottagna radarsignalen. Denna beräkning sker vanligen från sammanställningen av flera utsända och mottagna radarsignaler som svarar mot den s.k. integrations-

GRUPPANTENNER

Den strålande aperturen i en gruppantenn utgörs av ett antal antennelement, som vanligen är placerade med konstant inbördes avstånd. Elementen är normalt placerade på en plan yta, men behov finns av att integrera aperturen konformt i den krökta skrovytan på plattformarna för bättre täckningsområde och ibland av aerodynamiska skäl.

Signalen till eller från ett visst element kan i princip varieras till såväl fas som amplitud och oberoende av övriga element. Man kan därvid skaffa sig full kontroll över antennens strålningsegenskaper och manipulera dessa i såväl tid som rum.

I en passiv gruppantenn alstras sändareffekten i en central generator och distribueras till varje antennelement. På motsvarande sätt läggs signalerna samman i mottagningsfallet till en enda mottagare. I det enklaste fallet fördelas signaleffekten lika mellan alla elementen.

Genom att integrera aktiva kretsfunktioner med själva antennaperturen åstadkommer man en aktiv gruppantenn (AESA, Aktiv Elektriskt Styrd Antenn). Sändarsignalen genereras vanligen centralt och distribueras på låg effektnivå till sändar- och mottagarmoduler (S/M-moduler), där fasändring och förstärkning upp till slutlig effektnivå sker. Mottagna signaler förstärks och fasändras på motsvarande sätt i S/M-modulen, innan de kombineras i en central mottagare.

En aktiv gruppantenn har ett antal fördelar jämfört med en passiv konfiguration. Förstärkarnas placering nära antennelementen minskar mikrovågslusterna och prestanda i form av utsänd effekt och brusfaktor förbättras. Verkningsgraden är också bättre. Andra fördelar ligger i möjligheterna till större bandbredd och större flexibilitet i funktion och konstruktion. På sikt förväntas AESA bli mer överkomliga ekonomiskt och därför vanligare. I dag finns radarsystem med AESA främst i mycket kvalificerade vapensystem, där radarn samtidigt fungerar som spanings-, eldlednings- och robotstyrningsradar samt ger systemet möjligheter att upptäcka, följa och bekämpa flera mål samtidigt. De enda egentliga nackdelarna med AESA är hög komplexitet och kostnad. Se vidare avsnittet Multifunktionssystem.

Möjligheterna att med hjälp av en gruppantenn och kraftfull signalbehandling snabbt kunna anpassa strålningsdiagrammet efter mätsituationens föränderliga behov av att forma lobar mot målobjekt och minima mot störare har revolutionerat radarsensornas förmågor.

tiden. Signalbehandlingen har även till uppgift att undertrycka klotter och störsignaler i den mottagna signalen för att öka SNR och därmed förbättra förmågan till målupptäckt. I moderna radarstationer utförs signalbehandlingen digitalt.

Den primära mätinformationen från flera mätningar utnyttjas i den efterföljande bearbetningen. Genom att summera över många ekon kan man erhålla ett SNR som är tillräckligt högt för att ge hög upptäcktssannolikhet och låg falsklarmsrisk.

Utvecklingen av gruppantenner med många antennkanaler och av snabba signalprocessorer har medfört att ny och beräkningstung teknik för att undertrycka klotter och störsignaler kan utnyttjas effektivare än tidigare.

Radarfunktioner

En radar kan med successivt ökad ambition ha till uppgift att detektera mål (spaning), uppmäta storheter som avstånd, hastighet och riktning hos mål (målföljning) samt känna igen mål (klassificering och identifiering).

På grund av störningar av olika slag blir varje uppmätning av en målparameter en uppskattning av det verkliga värdet. Viktiga parametrar vid dessa inmätningar är noggrannheten och upplösningen.

Upplösningen är förmågan att särskilja två objekt som ligger nära varandra i någon mätdimension. Upplösningen i avstånd blir bättre ju kortare radarns pulslängd är, men kan inte drivas för långt då den utsända energin per puls blir för liten.

RADARRÄCKVIDD/RADAREKVATIONEN

Ett vanligt sätt att skriva radarekvationen är med sex faktorer, som visar hur utsänd energi avtar efterhand som vågutbredningen fortskrider.

$$SNR = \frac{S}{N} = P_m T_i \cdot \frac{G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{L \cdot L_{atm}} \cdot \frac{1}{k_B T_0 F}$$

Första faktorn anger utsänd energi. Efter den andra anges energitäthet vid målet, efter den tredje energitäthet vid mottagarantennen och efter den fjärde energi upptagen av mottagarantennen. Efter den femte är systemdämpning och efter den sjätte systembrus medtaget. Avsiktliga och oavsiktliga störsändare kommer att höja systembruset. Parametrarna i ekvationen uttyds enligt följande:

P_m	Radarns medeleffekt	[W]
T_i	Tiden för koherent integration	[s]
λ	Våglängden	[m]
R	Avståndet radar - mål	[m]
G_t	Sändarantennvinst i huvudloben	
G_r	Mottagarantennvinst i huvudloben	
σ	Målets radarmålare	[m ²]
k_B	Boltzmanns konstant ($1,38 \cdot 10^{-23}$)	[JK ⁻¹]
T_0	Temperaturen (290 Kelvin)	[K]
F	Total brusfaktor	
L	Förluster i radarsystemet	
$L_{atm} = 10^{\left(2 \frac{\alpha}{10} \frac{R}{1000}\right)}$	Atmosfärsdämpning	
α	Dämpningen (se figur 39)	[dB/km]
SNR	Signal-till-brusförhållandet i mottagaren före detektorn	

Det framgår av ekvationen att signal-till-brusförhållandet (SNR) beror av uppintegrerad mottagen energi som reflekterats i målet, vilken i sin tur beror av utsänd energi, antennvinst, radarmålarens storlek, våglängd, mottagarens brusfaktor och olika förluster i radarsystemet och dess omgivning (t.ex. dämpning i utbredningsmediet, vid lobformning och annan signalbehandling), samt naturligtvis avståndet till målet. SNR förbättras genom integration, d.v.s. genom summering av flera pulseturer. För spaningsradar brukar ett SNR efter integration på omkring 13 dB anses behövas för målupptäckt. Man använder därvid två statistiska begrepp – detekteringssannolikhet och falsklarmsrisk. En detekteringssannolikhet på 50 % och en falsklarmsrisk på 10^{-6} svarar mot ett SNR på 13 dB, om både mål och brus fluktuerar enligt en exponentialfördelning.

Rörliga mål kan uppträckas och lokaliseras med hjälp av MTI/GMTI-teknik. Mätprincipen bygger på att diskriminera de rörliga målen från de fasta med hjälp av dopplerfrekvens hos den mottagna signalen. Vissa radartyper kan även mäta hastigheten hos de rörliga målen, vilket möjliggör diskriminering mellan dessa, t.ex. val av ett intressant hastighetsintervall.

MTI-principen bygger i sin enklaste tillämpning på subtraktion av på varandra följande pulser. Stillastående mål ger alltid samma fasläge i radarmottagaren och kan härigenom sorteras bort. Reflexer från rörliga mål däremot har olika fasläge beroende på att avståndet till radarn hela tiden förändras.

GMTI (Ground Moving Target Indication, d.v.s. uppträckt av rörliga markmål) kräver avancerad signalbehandling. När radarn befinner sig på en rörlig flygburen plattform och mäter mot marken kompliceras bilden eftersom delar av markklottret får samma dopplerskift som de långsamma målen. Resultatet blir att det krävs en lägsta hastighet på de rörliga målen för att dessa skall kunna detekteras. Undre gränsen ligger i intervallet 5-8 km/tim.

Radarekvationen

Radarräckvidden ges av radarekvationen, som tar hänsyn till utsänd energi, radarmålare, antennvinst, våglängd samt systemförluster, bl.a. rymddämpning och brusförhållande. Se faktaruta Radarräckvidd/Radarekvationen.

Några radarexempel

Allmänt förses en radar med egenskaper anpassade för den uppgift som skall lösas. Uppgiften kan gälla övervakning av luftrummet, marken eller havsytan för att söka, följa, klassificera och identifiera mål samt leda egna vapen mot målen. Ytterligare uppgifter kan vara att avbilda eller fjärranalysera ett område, höjdmätning, navigering och väderobservationer.

Kraven på räckvidd, mät-noggrannhet och upplösning samt förmåga till störundertryckning varierar kraftigt mellan olika uppgifter. Exempel på radartillämpningar framgår av figur 44.

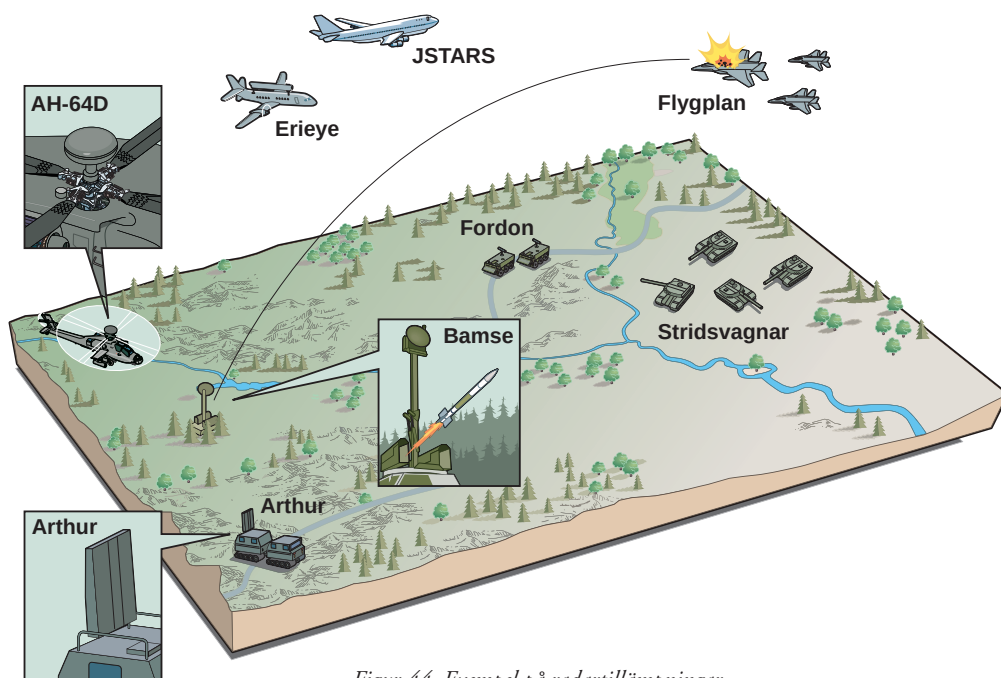
Flygburen spaningsradar

De första flygburna spaningsradarsystem som utvecklades efter andra världskriget hade endast förmåga att upptäcka flygplan över vatten, då detta var ett enklare radartekniskt problem p.g.a. svagare retur-reflexer från vatten jämfört med landterräng.

I och med att attackflyg, kryssningsrobotar och sjömålsrobotar kan anflyga på låg höjd finns krav på radarsystem med förmåga att upptäcka lågt flygande mål på relativt stora avstånd över alla terrängtyper.

Flygburna spaningsradarsystem behöver ha lång räckvidd (100-tals km), vilket kräver hög medeleffekt och för att begränsa atmosfärsdämpningen relativt låg frekvens. Antennstorleken är begränsad vid flygplansmontering men man önskar en relativt smal antennlob, vilket ställer krav på tillräckligt hög frekvens. S-bandet (2–4 GHz) blir en bra kompromiss mellan dessa krav. Radarsystemen bör vidare ha god markklotterundertryckning mot lågtflygande mål.

Ett exempel på ett spaningssystem är radarn i det amerikanska flygburna systemet AWACS



Figur 44. Exempel på radartillämpningar.

(Airborne Warning And Control System). AWACS har förmåga att upptäcka och följa flygande mål och har personal ombord för att leda stridsflygplan. Ett billigare men kvalificerat radarsystem för mindre plattformar är Erieye (PS-890), se figur 45. Detta system har mer karaktären av traditionell spaningsplattform som skickar automatiskt bearbetade måldata till ett markbaserat ledningssystem. Bägge systemen har S-bandsradar. Diskriminering av lågtflygande mål och markklotter sker genom pulsad dopplerradar.



Figur 45. Svenskt spaningsflygplan med radarn Erieye. (Bild: Försvarets Bildbyrå / Johnny Lindahl / SAAB).

Luftövervakning

Markbaserade radarstationer för luftövervakning är stora, effektstarka och har lång räckvidd, mer än 300 km, men blir sårbara eftersom placeringen är fast. Bärfrekvensen ligger på L- och S-banden. Antennsystemen är stora för att få smala sidolobber. Låg pulsrepetitionsfrekvens och pulskompression används för entydighet och hög upplösning i avstånd. Ett exempel är PS-860 i det svenska försvaret. Den är en pulsad S-bandsradar (3 GHz) som har räckvidden flera hundra kilometer. Pulsrepetitionsfrekvensen (i storleksordningen 1 kHz) och pulslängden (i storleksordningen tiotals ms) kan varieras.

Mark- och sjöövervakning

Fasta och rörliga mål på marken kan med fördel upptäckas och följas från satellit- och flygburna radarsystem som har speciella markmålsmoder. Dessa radarsystem kan även utföra kartering av markområden och övervaka vattenområden sedan de försetts med signalbehandling för att hantera sjöklotter. Det amerikanska JSTARS (Joint Surveillance Target Attack Radar System) används t.ex. för att lokalisera, klassificera och följa markmål på stora avstånd (> 200 km). Signalbehandling möjliggör att klassificera fordon som hjul- eller bandgående.

Artillerilokaliseringsradar

Artillerilokaliseringsradar detekterar projektiler och kan genom följning bestämma banan och utskjutningsplatsen.

För att sekundschnabbt kunna upptäcka, mäta in och följa projektiler från ett flertal utskjutningsplatser, även belägna i olika riktningar, måste radarsystemet innehålla en elektriskt styrd antenn som mycket snabbt och flexibelt kan flytta antennloben i bärning och elevation.

Upplösningen måste vara tillräcklig för att diskriminera klotter. För att kunna detektera små mål som granater i regn och markklotter måste radarns upplösningssvolym vara liten, d.v.s. smal antennlob och hög avståndsupplösning genom pulskompressionsteknik. Krav på räckvidd, upplösning, inmättningsnoggrannhet, avsökning och undertryckning av falska mål bestämmer det



Figur 46. Svensk artillerilokaliseringsradar ARTHUR (ARTillery HUnting Radar). (Bild: Försvarets Bildbyrå / Lasse Sjögren).

bästa frekvensområdet för en sådan radar till cirka 4-8 GHz. Se även figur 46.

Stridsfältsradar

En stridsfältsradar utför spaning mot och inmätning av rörliga markmål som bandfordon, hjulfordon, trupp och lågtflygande helikoptrar. Mål som rör sig med hastigheter överstigande några km/tim kan i allmänhet detekteras. Genom doppleranalys kan olika måltyper särskiljas.

De flesta system är av koherent pulsdopplertyp, ofta med MTI, men det finns också modulerade CW-system. De vanligaste frekvenserna ligger på X- och K_u-banden (10-20 GHz), men också nedre delen av millimeterbandet (ca 35 GHz) förekommer.

Räckvidden för en stridsfältsradar är ca 10 km. Pulsrepetitionsfrekvensen behöver vara tillräckligt hög för att entydigt bestämma hastigheten för fordon.

Millimetervågsradar

Millimetervågsradar har tidigare inte haft någon större användning. Hög signaldämpning vid regn och problem med kompo-

nenttekniken har varit hämmande. Ny komponentteknik har gjort det möjligt att utnyttja radarn på korta avstånd och dra fördel av att den är liten och lätt och kan ge hög upplösning både i vinkel och avstånd.

Millimetervågsradar vid 35 GHz används t.ex. av attackhelikoptern AH-64 Apache för spaning mot markmål. Andra användningar är hindervarning (t.ex. kraftledning) och som landningshjälpmedel.

Radarmålsökare vid 94 GHz för slutfasstyrning i robotar och projektiler är ett annat användningsområde där utveckling pågår.

Civilt pågår utveckling av bilradar för kollisionssvarning och farthållning.

Eldledningsradar

Eldledningsradar har till uppgift att genomsöka en given begränsad volym för att positions- eller hastighetsbestämma samt följa mål. Detta skall ske med hög uppdateringstakt. Här förutsätts att spaningsradar eller annan sensor invisat eldledningsradarn, d.v.s. begränsat dess sökvolym.

Eldledningsradarn skall eliminera falska mål, klotter, störning och interferens och förse vapensystemet med målföljningsdata.

Radarmålsökare

Radarmålsökare används för att från en robot kontinuerligt mäta in positionen för ett mål så att roboten kan styra mot detta. För hög vinkelnoggrannhet används monopulsteknik. Radarn mäter även avstånd och närmandehastighet, vilket



Figur 47. Radarmålsökare från ett svenskt experiment med jaktrobot.

är mycket användbart vid mål-sökning.

Radarsändaren kan finnas ombord på roboten (aktiv målsökare) eller på en annan plattform (semiaktiv målsökare). Det senare är vanligt i luftmålsfallet, där en stark sändare kan vara placerad på marken eller i ett stridsflygplan. I de fall roboten behöver manövrera självständigt, exempelvis i sjömålsfallet där roboten skjuts från långt håll (över 100 km), måste sändaren vara placerad i roboten. På senare tid har även radarmålsökare för markmål utvecklats. Det är dock relativt svårt att hitta en bra kontrast bland markekon.

Radarmålsökare bör kunna hantera falska mål och elektronisk störning. Ett sätt att motverka störsändare som befinner sig i målet är att övergå till 'passiv' följning och styra mot storkällan.

Zonrör

Zonröret är den sensor i roboten eller granaten som svarar för inmätningen i målets närzon. Dess huvuduppgift är att detektera målets läge vid målpassagen och i rätt ögonblick avge en signal till verkanssystemet.

Vapensystem utrustade med

zonrör behöver således inte träffa målet direkt. Zonröret ger därigenom betydande vinster i form av förbättrade prestanda och/eller minskade krav på målsökare och styrsystem.

Målavstånd, riktning till målet, relativ- eller sjunkhastighet samt dykvinkel (markmålsfallet) och höjd kan vara önskvärda att detektera i olika zonrörstillämpningar. Avståndsmätningen är normalt primärfunktionen.

Omodulerade radiovågszonrör av dopplertyp användes redan under andra världskriget. De är dock alltför störkänsliga och deras noggrannhet i avstånd är otillräcklig för att de skall kunna användas i moderna robotsystem.

Nackdelarna med dopplerzonröret kan undanröjas om man modulerar den utsända signalen. I sådana zonrör, som är fas- eller frekvensmodulerade på ett opredikterbart sätt, uppnås hög störfasthet.

Navigeringsradar

En navigeringsradar registrerar ekon från såväl fasta som rörliga föremål, förutsatt att dessa har tillräcklig radarmålarea, och är ett viktigt hjälpmedel för fartygsnavigering. På de flesta större fartyg kompletteras numera det vanliga radarsystemet med datoriserade funktioner som beräknar och presenterar kurs och fart på andra fartyg inom mätområdet och med larmindikering vid kollisionrisk.

Navigeringsradar är vanligtvis pulsradar på S-band eller X-band men även K_u - och mm-bandsradar för t.ex. övervakning förekommer. Ofta förekommer både S- och X-

bandsradar ombord samtidigt för att man vid behov skall kunna välja mellan antingen hög vinkelnoggrannhet och

upplösning eller låg regn- och sjöklotterkänslighet.

Radar används även för höjd-

mätning i terrängnavigerings-system, som landningshjälpmedel och som kollisionssvarnare.

Exempel på vidareutveckling

Det finns ett antal typer av radarsystem som är vidareutvecklingar av de ursprungliga idéerna. De utmärks av val av frekvensområde och räckvidd (OTH-radar), metod för att utföra mätning och signalbehandling (syntetisk aperturradar), sätt att taktiskt utnyttja radar (bi- och multistatisk radar) eller genom att medge flera tillämpningar (multifunktionssystem).

OTH-radar

Jonosfären (skikt i den övre atmosfären, på ca 60-1 000 km höjd) fungerar som en spegel för frekvenser under 20-30 MHz. Denna princip utnyttjas i OTH-radar (Over The Horizon Radar), se figur 48. Frekvensområdet för dessa radarsystem är 3-30 MHz, d.v.s. ungefär som kortvågsradio.

Efter spegling i jonosfären träffar radarstrålningen jordytan mycket långt bort, upp till 3 000 km från sändaren. Målreflexerna speglas också i jonosfären innan de når mottagaren. Radarsystemen har ingen rörlighet p.g.a. mycket långa antennarrayer.

Jonosfärfluktuationer, långa integrationstider, multipelreflektioner, stora antensystem och osäkra målkoordinatberäkningar (p.g.a. jonosfär och vågutbredning) är problem för tekniken.

OTH-system finns i enstaka exemplar hos stormakterna och i Australien.

Syntetisk aperturradar

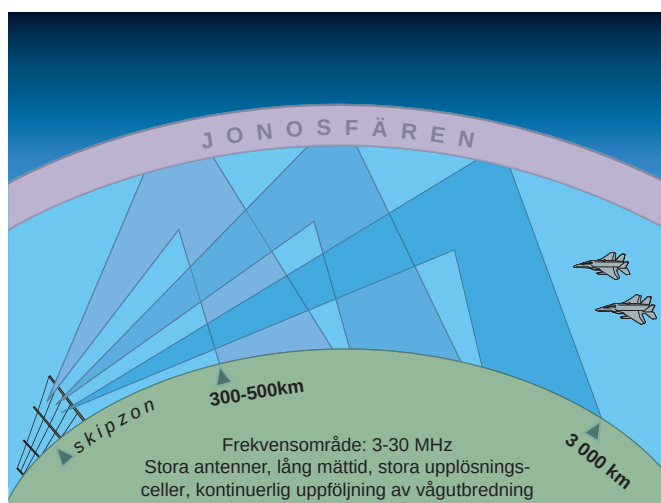
Syntetisk Aperturradar (SAR) uppfanns redan 1951, men kan sägas ha fått sin renässans i och

med den moderna digitaltekniken. Principen bygger på att istället för att ha en stor antenn låta en liten antenn röra sig och samla in reflekterade signaler som sedan används för att i datorn bygga upp en stor syntetisk antennapertur. Fördelarna är många, men framför allt kan man generera radarbilder med hög och avståndsoberoende upplösning.

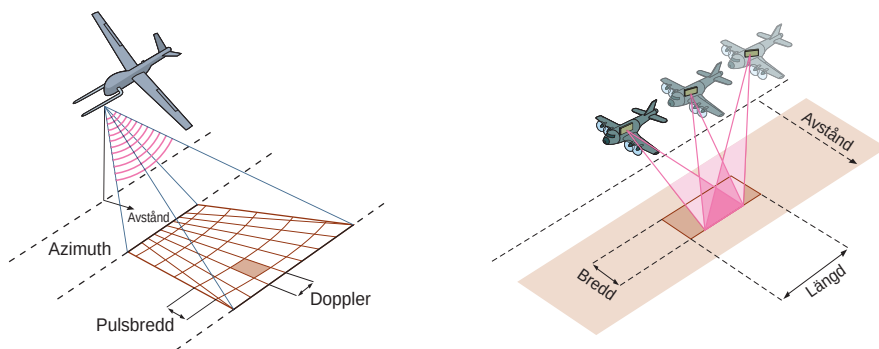
SAR-tekniken medger bilder av jordytan från flygplan eller satellit med upp till 10 cm upplösning. Avbildningsprincipen definieras under antagande av en stationär scen. Rörliga objekt på marken blir ofokuserade i den slutliga SAR-bilden. Man kan tänka sig analogin med en vanlig optisk kamera med öppen slutare. Alla objekt som rör sig under den tid slutaren är öppen kommer att bli suddiga eller om de rör sig mycket eller snabbt rent av helt försvinna genom defokusering.

Signalbehandlingen i en SAR är beräkningskrävande, men på senare tid har både snabba och generella algoritmer utvecklats.

Ett SAR-system kan opereras i ett flertal moder beroende på uppgift: SAR strip ('strip-map'), SAR spot ('spotlight') och GMTI. De två förstnämnda SAR-moderna kan endast upptäcka och lokalisera mål som står stilla under integrationstiden. Skillnaden mel-



Figur 48. OTH-principen.



Figur 49. Avbildningsgeometri för SAR. Till vänster stripmod, till höger spotmod.

lan strip- och spotmod är att antennens pekriktning är fast i stripmoden medan den i spotmoden justeras kontinuerligt för att hela tiden peka mot ett visst målområde. Det senare gör att integrationstiden ökar och därmed blir bildupplösningen i flygriktningen finare i spotmoden. Priset man får betala för den högre upplösningen är att det avbildade områdets storlek samtidigt minskar. Se även figur 49.

GMTI-moden, med vilken upptäckt och lokalisering av rörliga mål kan göras, bygger på att diskriminera de rörliga målen från de fasta med hjälp av dopplerfrekvensen hos den mottagna signalen i en viss riktning.

ISAR (Invers SAR) är en teknik som utnyttjar målets egen rörelse för att kunna mäta under olika aspektvinklar från en radarplattform på långt avstånd. Radarns rörelse har man under mycket god kontroll för att kunna kompensera för rörelser till en bråkdel av våglängden.

Lågfrekvent SAR

För att upptäcka stationära mål som är dolda i vegetation eller under kamouflage kan man utnyttja radar vid låga frekvenser (20-90 MHz, inom VHF-bandet). Även upptäckt av normalt smyganpassade mål är möjlig vid dessa frekvenser. Ett flygburet SAR-system som f.n. opererar vid dessa frekvenser är det av FOI framtagna CARABAS. Figur 50 visar



Figur 50. FMVs provflygplan TP86 Sabreliner med CARABAS-II VHF-bands SAR installerad ombord under en flygvapenövning år 2000. Varje cylinder innehåller ett bredbandigt antennelement. Elementens utformning och placering är gjord för att minimera den elektromagnetiska kopplingen med den metalliska flygplanskroppen och samtidigt minimera inverkan på flygplanets aerodynamiska egenskaper. (Bild: Försvarets Bildbyrå/Peter Liander).

SAR-UPPLÖSNING

Låt i ett SAR-system λ vara våglängden och d den verkliga antennens (realaperturens) längd. En realapertur skapar en antennlob med konstant lobvinkel λ/d , varför den geometriska upplösningen i vinkelled försämras med ökande avstånd till målet.

Med SAR-teknik förlänger man istället den syntetiska aperturen L genom att förflytta realaperturen (antennen) en längre sträcka när avståndet ökar. På så sätt ökar man vinkelupplösningen λ/L och bibehåller den geometriska upplösningen i vinkelled.

Med fast lob gäller att den geometriska upplösningen i vinkelled blir maximalt $d/2$ oberoende av mätavstånd och våglängd. Med styrbar lob kan man öka upplösningen enligt formeln $\lambda/2\theta$, där θ är den totalt översvepta aperturvinkeln.

Avståndsupplösningen är däremot densamma vid real och syntetisk apertur.

systemet installerat på FMVs provflygplan. CARABAS ökar möjligheterna att upptäcka fordonsstora objekt som står under skogsmaskering, under kamouflage eller har smygegenskaper. Den geometriska upplösningen i CARABAS-II är ca 2,5 m. Yttäckningskapaciteten är ca 1 km²/s. En civil tillämpning av tekniken är kartering av skogens virkesförråd.

Genom att bakgrunden är mycket stabil över tiden får en VHF-SAR mycket bra prestanda för att upptäcka förändringar sedan tidigare överflygningar. Förenklat uttryckt kan två bilder subtraheras från varandra. Bakgrunden kan tas bort och kvar blir alla förändringar. Genom att automatiskt utföra denna förändringsdetektion kan stora områden övervakas och förändringar upptäckas, se figur 51.

Bi- och multistatisk radar

En radar som strålar energi kan detekteras och därigenom riskera att bli utsatt för bekämp-

ning. Ett sätt att möta detta hot är att separera radarsändare och radarmottagare. Sändaren placeras tillbakadragen i skyddad position för att minska sårbarheten. Mottagaren kan agera framskjutet eftersom den inte sänder ut röjande signaler. Många mottagare kan samtidigt lyssna på ekona från samma sändare och mätresultaten samordnas för förbättrade prestanda. Ett mål med liten radar-målarea kan lättare detekteras på detta sätt. En störsändare måste sprida effekten inom en större sektor när den inte vet var mottagaren är och får därigenom kortare räckvidd. Med fler än en mottagare brukar man tala om multistatiska system, se figur 52. Flera sändare kan också ingå i systemet och sända växelvis. Detta gör det svårare för en motståndare att upptäcka och bekämpa systemen.

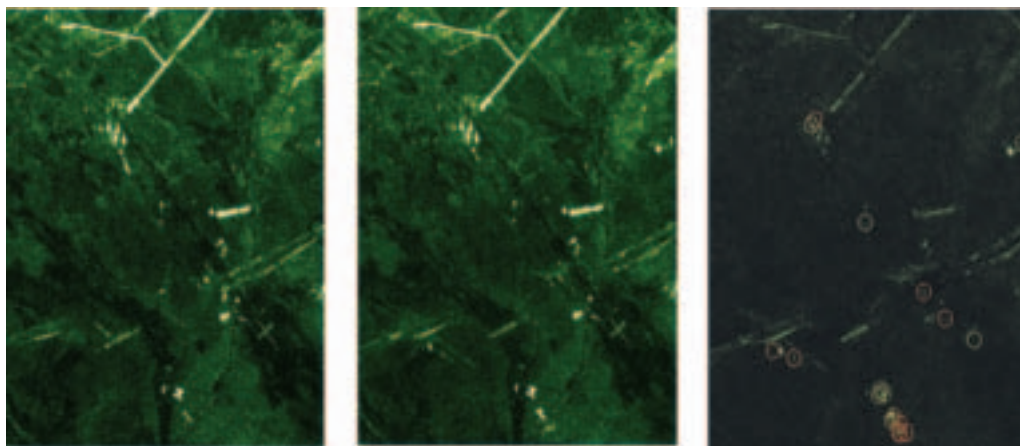
Forskning och utveckling av bi- och multistatisk radar pågår. Svårbemästrad mätgeometri, problem med synkronisering av sändare och mottagare (frekvenser, mätförlopp m.m.) och behov av noggrann positionering

av lobber (läge, hastighet och attityd) har medfört att operativa system ännu inte finns.

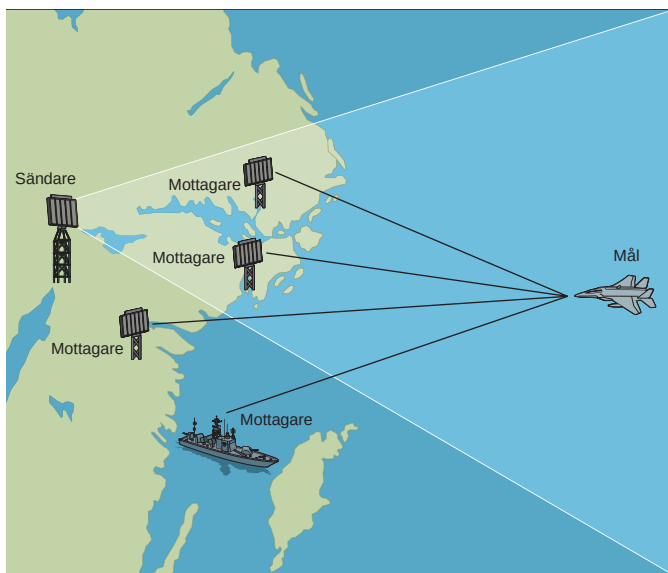
Ytterligare en typ av bistatiskt radarsystem som möjligen kan bli aktuellt är s.k. PCL-radar (Passive Coherent Location) eller PCR (Passive Coherent Radar). Radarmottagaren parasiterar här på andra sändare, främst UHF- och VHF-sändare från kommersiella TV- och radiostationer, för att detektera och följa flygplan. När man inte kontrollerar den utsända signalen blir dock tillgänglighet och möjligheter till störundertryckning begränsad. Krav på tre fria siktsträckor (sändare-mål, mål-mottagare, sändare-mottagare) är en annan begränsning.

Multifunktionssystem

I många sammanhang kan brist på utrymme för i första hand antenner göra det nödvändigt att finna nya lösningar på behovet av system för spaning, kommunikation, telekrigföring etc. Multifunktionssystem medger samtidiga eller tidsdelade funktioner och kan vara lämpliga



Figur 51. Genom att bakgrunden ger en stabil signatur över tiden vid låga arbetsfrekvenser kan två bilder 'subtraheras från varandra' och endast förändringarna mellan flygningarna framträder. I sekvensen ovan kan en basbataljons arbete följas och även dolda fordon detekteras.



Figur 52. Exempel på multistatisk radar med flera mottagare och en tillbakadragen sändare.

t.ex. vid systemutformning med varierande krav i olika funktioner.

Multifunktionssystem utvecklades först för olika typer av radarsystem med mekaniskt styrda eller passiva gruppantennor. Exempel på dessa är nosradar för stridsflygplan, artillerilokaliseringsradar, luftförsvarsradar på fartyg och radar mot ballistiska robotar. För nosradar för stridsflygplan var kravet att snabbt kunna rikta antennen mot olika mål och att kunna växla funktion mellan sökning och följdning. För artillerilokaliseringsradar var det framför allt ökade krav på snabb riktning av antennen för sökning och följdning av snabba projektiler. För luftförsvarsradar på fartyg var det krav på runtomtäckning, följdning av flera mål och styrning av flera robotar. För radar mot ballistiska robotar var det krav på snabb sökning och följdning av flera mål och mycket stora

antennaperturer för mycket långa räckvidder.

Drivande krav för multifunktionsradar har varit att snabbt kunna styra antennen i olika riktningar och växla mellan funktioner. För radarsystem med små antennaperturer är detta möjligt med mekaniskt styrda, platta och lätta gruppantennor, men för större antennaperturer måste antennen styras elektriskt.

Nya multifunktionssystem under utveckling behöver multifunktionsantennor baserade på teknik för aktiva, elektriskt styrda gruppantennor (AESA) för att möta nya krav. Med sådan teknik öppnas möjligheter att kombinera radar-, kommunikations- och telekrigsfunktioner i samma antenn. För att kunna nyttiggöra de möjligheter som gruppantennor kan skapa krävs många parallella sändar- och mottagarkanalerna, diversifierad

SMYGRADAR (LPI-RADAR)

En radar är aktiv och avger röjande strålning, vilket är en nackdel i militära sammanhang och leder till restriktivitet i användningen då systemen normalt behövs som bäst. Militärt söker man därför utveckla system och metoder baserade på t.ex. FMCW- eller bandspridningsteknik, multistatisk radar eller system med snabba frekvenshopp, i kombination med nyttjandet av riktad sändning, sändning med lägsta möjliga effekt eller, speciellt vid skärgårdsnavigering, nyttjandet av mm-vågsradar med hög atmosfärsdämpning.

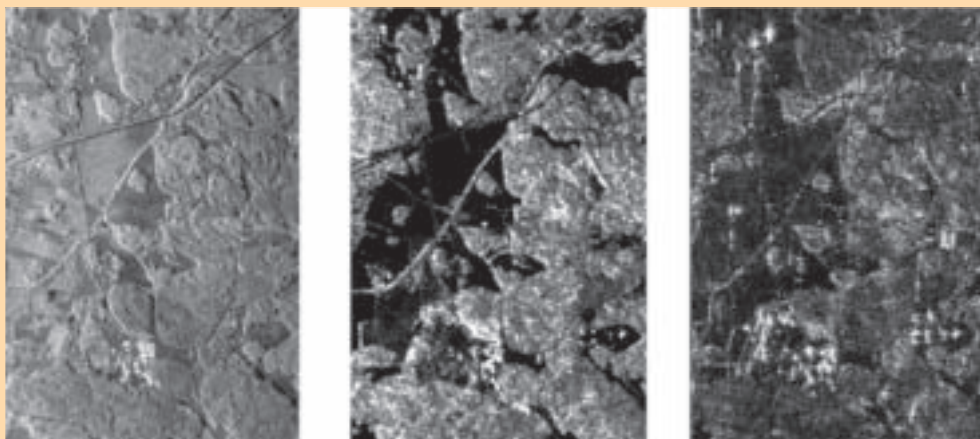
Syftet är således att radarn skall vara svår att upptäcka. Dessa tillämpningar brukar kallas LPI-radar (Low Probability of Intercept).

vågformning och avancerad signalbehandling.

Möjligheter som erbjuds med AESA är framför allt en ökad förmåga till omvärldsuppfattning och möjlighet till snabb sökning, följdning och vapenstyrning över hela radarns synfält samtidigt mot flera mål. Dessutom möjliggörs bättre undertryckning av störning och klotter, ökad räckvidd och inmättningsnoggrannhet, samt ökad tillförlitlighet och minskat underhållsbehov genom att mekaniskt rörliga delar och elektronrör ersätts av halvledar-baserade kretsar och att många antennelement ger redundans.

FREKVENSVÄL

Frekvensvälet avgör en markmålsspanande radars egenskaper. I figuren syns tydligt skillnader i växelverkan med naturen vid olika frekvenser. Bilden till vänster ser ganska 'fotolik' ut, vilket tyder på att signalen i huvudsak har reflekterats mot småskaliga strukturer som gräs och småsten på marken och grenar eller blad i kronan på de skogsbeväxta områdena. Det går att se att åk-rarna är beväxta men inte se om det finns fordon parkerade i någon skogsdunge. När frekvensen minskat något som i mittenbilden blir åkrarna svarta, d.v.s. det går inte längre att se grödan medan skogsområdena 'börjar lösas upp' och man börjar ana strukturer. I bilden till höger, där frekvensen minskat ytterligare, börjar de skogsbeväxta områdena verka 'genomskinliga' och en rad strukturer som inte kunde ses tidigare framträder. Detta beror på att små grenar, blad m.m. är så små att de inte växelverkar alls med den långvågiga signalen som således utan större dämpning förmår tränga igenom vegetationen och nå ner till marken. Att signalen är okänslig för småskaliga objekt i naturen medför också att bilden av målområdet blir stabil, vilket underlättar automatisk målupptäckt genom förändringsanalys av bilder som registrerats vid olika tidpunkter.



Figur F14. Exempel på karaktären hos radarsystem med olika arbetsfrekvens. Till vänster visas en bild från en radar med 3 cm våglängd (X-band), i mitten från ett system med ca 50 cm våglängd (UHF-band) och till höger en bild från det svenska CARABAS-systemet som arbetar med meterlånga vågor (VHF-band).

Att med hjälp av en AESA kombinera radar- och kommunikationsfunktioner ter sig som ett attraktivt alternativ, speciellt för små plattformar, som t.ex. UAVer (Unmanned Aerial Vehicles) och markfordon. En multifunktionsantenn kan realiserats med flera aperturer ('shared apertures'), som placeras runt plattformens yta och också kan göras konforma med dess geometriska struktur.

I flera länder pågår för närvarande utveckling av AESA. De

största satsningarna sker i USA och några europeiska länder – Storbritannien, Tyskland, Frankrike och Sverige.

En volymmässigt stor utveckling av multifunktionssystem med aktiva elektriskt styrda gruppantennor sker inom JSF-projektet F35 Joint Strike Fighter. Detta system utvecklas för flerrollsfunktioner. En sådan utveckling ser vi också hos nosradar i JAS 39, se figur 53. Multifunktionssystemet innehåller radarfunktioner för

sökning, följning, igenkänning och avbildning av mål, telekrigsfunktioner för signalspaning, varning och störning samt robotstyrningsfunktioner och kommunikationsfunktioner.



Figur 53. Multifunktionsantennen till nosradarn i ett stridsflygplan ser ut som ett fasettöga med sina mer än tusen antennnelement på den plana fronten. Här i en möjlig framtida JAS 39-användning. (Bild: Ericsson Microwave Systems AB).

Radarstörskydd

Störskydd av olika slag införs i radarsystemets olika delar (se blockschemat för ett generiskt radarsystem i figur 42) för att undertrycka signaler från störsändare och om möjligt blockera signaler från falska mål. Störskydden är ofta fast inprogrammerade i moderna radarsystem. Systemutformningen kan bidra till störskydden genom olika mätgeometrier, plattformsrörelser, terränginverkan och vågutbredning.

Bi- och multistatisk radar med separerade sändare och mottagare innebär ett störskydd eftersom störsignalerna riktas mot sändarna eller måste spridas ut över större område för att få störverkan i mottagarna. Rörliga plattformar är ett störskydd mot falska mål om flera inmätningar från olika radarpositioner kan korreleras med varandra. Radarns placering relativt terrängen och

vågutbredningsförhållanden kan användas som störskydd för att dämpa störsignaler från riktningar utanför radarns täckningsområde.

Koherenta vågformer innebär ett störskydd eftersom störsignalerna måste vara matchade till radarsignalerna för att få effektiv störverkan. Variabel pulsrepetitionsfrekvens innebär ett störskydd eftersom störsändaren inte effektivt kan bilda falska mål på avstånd närmare radarn än det egna. Hoppfrekvensvågformer är ett viktigt störskydd eftersom maskerande brusstörning måste spridas ut över stor bandbredd, vilket ger försämrad störverkan.

Hög sändareffekt är ett grundläggande störskydd som ökar signal-till-störförhållandet. Låga sändarförluster är också viktigt och kan uppnås i aktiva elektriskt styrda sändarantennar där sändarförstärkarna sitter nära

antennens strålningselement. Aktiva elektriskt styrda sändarantennar möjliggör också styrning av sändarens sändningsmönster och antennlob.

Hög antennvinst och smal huvudlob är ett viktigt störskydd för sändarantennen vid följning av mål medan vid sökning även en bredare huvudlob med lägre antennvinst kan användas. Detta är möjligt med elektriskt styrda sändarantennar som snabbt kan ändra strålningsriktning och lobform, vilket även är viktigt för att få opredikerbara sändningsmönster.

Mottagarantennens utformning är ett väsentligt störskydd. Stor antennarea och hög antennvinst med smal huvudlob ger högt signal-till-störförhållande och hög noggrannhet vid riktningsmätning. Låga sidolobor ger högt signal-till-störförhållande och undertrycker störsignaler från sidolobso-

rådet. Adaptiv sidolobsundertryckning (ASLU) med digitala gruppantennor eller med tillräckligt många hjälpantenner kan också ge låga störnivåer. Sidolobsblockering är ett vanligt störskydd mot pulssade störningar. Monopulsantennor eller digitala gruppantennor med flera mottagarkanalor kan upplösa vilseledande störning och motverka avhakning av målföljning.

Ett grundläggande störskydd i mottagaren är filtrering av mottagna signaler så att inte störsignaler utanför radarns

signalbandbredd kommer in i signalbehandlingen. Mottagaren måste också begränsa och blockera starka störsignaler för att förhindra överstyrning och olinjära effekter som kan generera nya störsignaler inom mottagaren. Förstärkningsreglering och hög dynamik i mottagaren är också viktigt för att kunna filtrera och undertrycka störsignaler i den vidare signalbehandlingen.

De flesta störskyddsfunktionerna implementeras i radarns digitala signalbehandling eftersom signalerna kan manipuleras

på ett noggrant sätt med väl definierade metoder. Störskydden i signalbehandlingen kan programmeras, utprovas och modifieras efter telekrigshotets utveckling. Koherent signalbehandling är ett allmänt störskydd som undertrycker brussignaler och målsignalolika signaler. Dopplerfiltrering är ett störskydd mot remsor och andra skenmål som rör sig med långsam hastighet. Olika typer av adaptiv filtrering är viktiga störskydd som används för att undertrycka störning som är koncentrerad till vissa frekvenser eller riktningar.

Inledning

En radar talar inte bara om för sin operatör hur omvärlden ser ut. Den talar också om mycket för omvärlden, t.ex. var radarn befinner sig. Samma resonemang kan användas i samband med radiokommunikation. Den förmedlar inte bara sitt meddelande till mottagaren, den talar också om en hel del för den oönskade lyssnaren, signalspanaren.

Signalspaning (sis) kan bedrivas mot i stort sett all elektromagnetisk strålning. Rör det sig om optiska system faller signalspaningen, t.ex. i form av laservarning, in under området optronik. Även signaler som betraktas som 'viskande' eller 'gömda' kan hittas med hjälp av rätt metoder.

Signalspaning som omvärldssensor har en del tilltalande egenskaper: icke-röjande, god yttäckning, lokaliserings- och identifieringsförmåga samt envägsutbredning.

Icke-röjande

En signalspaningssensor sänder i sig inte ut någon avslöjande strålning. Därför betraktas sis som en passiv metod. Liksom andra sensorsystem har signalspaningen ett behov av att kommunicera. Sker kommunikationen över radio så kan givetvis kommunikationsdelen av systemet nyttjas av motsidans signalspaning. Sis-antennerna genererar ofta radarmålyta. Detta kan vara ett problem för en plattform som har behov av låg radarmålyta.

God yttäckning

Den yta som momentant kan övervakas är ofta stor, men beror på vilken metod som används. Ett undantag är exempelvis lobmaxpejling, där en antenn med smal antennlob vrids mekaniskt tills den mottagna signalen är som starkast. Avsökningen av omvärlden sker då på ett sätt som liknar radarns.

Den stora momentana yttäckningen är en av de egenskaper som leder till goda upptäckts-egenskaper. Det är således möjligt att upptäcka även kortvariga signaler som genom sin i tiden begränsade närvaro förväntas undgå upptäckt.

Lokaliseringsförmåga

Genom att använda flera sis-plattformar, rörliga plattformar eller mäta riktning i två dimensioner kan signalkällans läge bestämmas.

Identifieringsförmåga

Det är ofta möjligt att med hjälp av sis bestämma typ av sändare, och därmed även få en identifikation av aktuell plattform. Ofta kan till och med enskilda individer av den sändande apparaten identifieras. Särskilt gäller detta för äldre radarsändare av magnetrontyp.

Envägsutbredning

Den signalspanande utrustningen arbetar till skillnad från radarn med envägsutbredning, d.v.s. medan radarn skickar iväg en puls som går en sträcka

till målet, reflekteras och går samma sträcka tillbaka kommer signalspaningssystemet att ta emot pulsen innan den har reflekterats. Därmed kan signalspaningsutrustningen vanligen se en radar innan radarn ser plattformen som signalspaningsutrustningen sitter på. I ett verkligt fall spelar fler parametrar in. Kravet på stor momentan yttäckning gör bland annat att antennvinsten hos signalspaningssystemet kan bli låg om antenner med breda lobber används. Detta problem kan lösas genom att till exempel använda gruppantennor för att kunna bevaka ett stort område. Signalspaningsutrustningen tar också emot mer oönskade signaler genom att den inte kan selektera i rummet på samma sätt som en radar. Ett annat problem för sis-utrustningen är att radarn kan koda sin signal så att signalen för en utomstående ser ut som brus. Radarn löser detta med hjälp av ett s.k. matchat mottagarfilter. Signalspanaren får däremot förlita sig på andra metoder för att kunna detektera och mäta signalen.

Användningsområden

Signalspaningsutrustning kan bl.a. användas för:

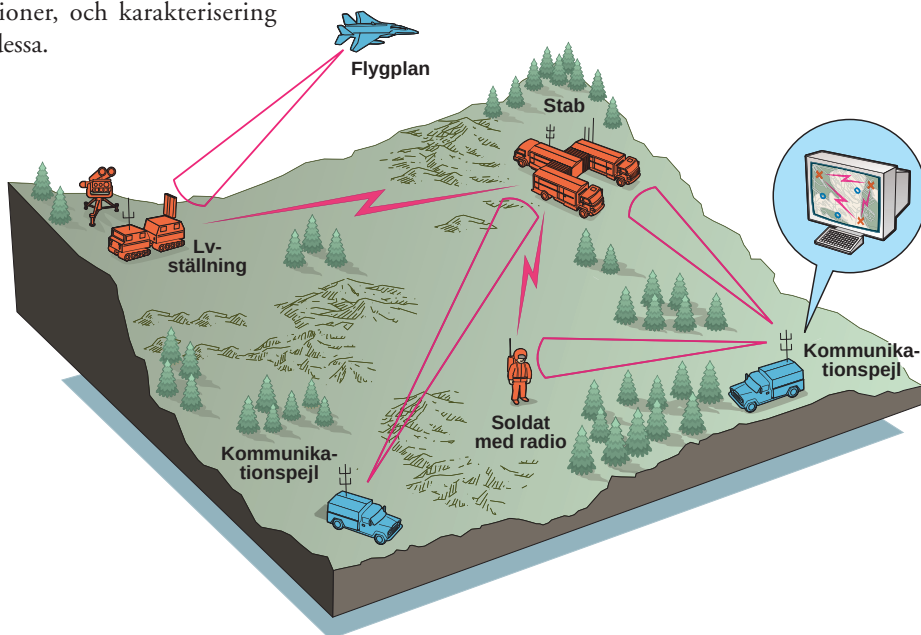
- Lokalisering av sändarplatser och avlyssning av radiokommunikation. Då modern radiokommunikation ofta är krypterad är det inte säkert att det går att tolka de meddelanden som sänds. Det är dock viktigt att veta såväl sändarnas position som hur de rör sig. Finns det möjlighet att få reda på vem som pratar med vem, vilket är grunden för så kallad nätbildning, kan olika sändarplatser tilldelas olika betydelse och ordervägar kan följas. Detta leder till att signalspanaren både kan få en bild av större strukturer som ledningsstrukturer och möjlighet att hitta delar av förband.
- Lokalisering av fasta radarstationer, och karakterisering av dessa.

- Radarvarning. På många plattformar – framför allt inom flygvapnet och marinen – används radarvarnare för att upptäcka om plattformen är belyst av en (fientlig) radar eller radarmålsökare. Här är ofta tidigare insamlad information om sändande radarer grunden för identifiering av belysaren. Är den belysande radarn identifierad kan förändringar i signalen avseende styrka och modulation tala om ifall den egna plattformen är upptäckt eller inte. Radarvarnare på markfordon har under senare tid bedömts intressanta för studier.

- Lokalisering av främmande radarutrustningar från luften, t.ex. radar på mobila luftvärnsenheter. Denna information

kan användas som underlag för motverkan (SEAD – Suppression of Enemy Air Defences). I samband med SEAD är lokaliseringsmetoder med hög precision passande, då vapen utan signalberoende kan användas. En signalsökande robot är generellt inte speciellt effektiv om det tänkta målet har slutat att sända.

I samband med att en signal har hittats skall den identifieras. I kommunikationsfallet görs ofta en modulationsklassificering, d.v.s. signalens typ bestäms. I radarfallet sker också en form av klassificering av signalen. Klassificeringen görs utifrån de parametrar som radarn karakteriseras av; frekvens, pulsintervall, pulslängd m.m.



Figur 54. Ett scenario med tre sis-sensorer. Två kommunikationspejlarna mäter från sina positioner riktningar till motsidans sändande radiostationer. Riktningen mäts med hjälp av fyra dipoler monterade i en kvadrat, en s.k. Adcockantenn. Med utgångspunkt från riktningarna kan sändarnas läge beräknas med hjälp av triangulering för att sedan presenteras på en kartbild. Pejlarna kan även skapa en bild av motsidans kommunikationsnät. Ett flygplan som är utrustat med en sis-sensor lokaliserar en luftvärnsradar.

Tekniker

Ett viktigt mål med signalspaning är, ur en taktisk synvinkel, att hitta riktning till och läge för emitttrar. Ett enkelt sätt, som numera inte är så vanligt, är att använda en riktantenn och vrida denna mekaniskt tills den mottagna signalen är som starkast. Med hjälp av en gradskiva och linjal kan sedan riktningen ritas in på en karta. Fås motsvarande information från en annan pejlstation kommer linjerna att skära varandra i en punkt som pekar ut den eftersökta sändaren.

Genom att införa signalbehandling i systemet kan flera runtomstrålade antenner nyttjas för att få riktningen till målet, och genom ytterligare automatisering kan systemet presentera framtagna mållägen för operatören.

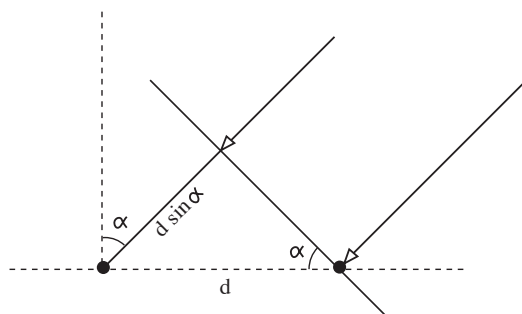
Rikttningsbestämning

Som nämnts ovan kan en riktantenn användas för att bestämma riktning, t.ex. genom att mäta när signalen är som

LOBMINPEJL MED RAMANTENN

En ramantenn har en cirkulär lob på var sida om antennen.

Loberna är flacka i toppen, vilket gör det svårt att hitta den riktning där signalen når sitt maximum. Genom att istället leta efter den riktning som ger den svagaste signalen – längs ramens centralaxel – fås en avsevärt bättre skattning av riktningen till signalkällan, om signalnivån är god.



Figur 55. Skillnaden i gångväg som en plan infallande våg har till två antenner med avståndet d . Gångvägsskillnaden kan mätas som en tids- eller fasdifferens och utnyttjas till rikttningsbestämning.

starkast. Ett alternativt sätt är att med t.ex. en ramantenn mäta när signalen är som svagast (se ruta Lobminpejl med ramantenn). En enstaka riktantenn ger genom sin riktverkan en dålig momentan yttäckning, vilket gör att en kortvarig signal kan vara svår att upptäcka. Genom att använda sig av två i planet runtomstrålade antenner, till exempel vertikala dipolantenn, och placera dessa på ett lämpligt avstånd från varandra är det möjligt att mäta fasdifferensen mellan de mottagna signalerna och sedan bestämma infallsriktningen för signalen. Kombinerar två antennpar med 90° vridning dem emellan, kan riktningen bestämmas entydigt i ett plan.

I radarfallet används ofta antenner med en viss direktivitet parvis för att med hjälp av de mottagna signalernas olika amplituder eller fasskillnader bestämma riktningen.

Den vanligaste principen för rikttningsbestämning i flygburna radarvarnare är amplitudmonopuls. Normalt används då fyra antenner med de ca 90° breda huvudloberna centrerade i riktningarna $\pm 45^\circ$ och $\pm 135^\circ$

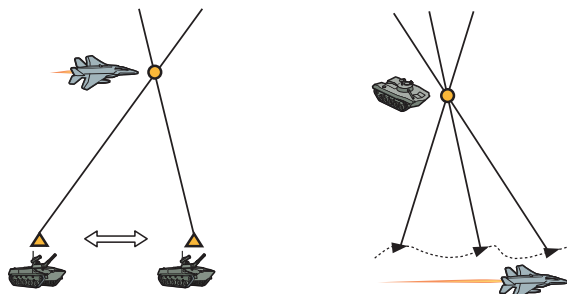
i vingplanet. Infallsriktningen erhålls vid amplitudmonopuls genom att inbördes jämföra den av de fyra antennerna mottagna signaleffekten.

Rikttningsnoggrannheten hos en radarvarnare med fyra antenner är ofta ungefär $7\text{--}10^\circ$. Rikttningsfelet orsakas bland annat av:

- Bristande amplitudmatchning mellan antenner eller mottagarkanaler
- Avvikelser i lobform eller lobinriktning
- Lågt signal-till-brusförhållande
- Reflexer i närheten av antennerna som ger variationer i mottagen amplitud.

Noggrannheten kan exempelvis förbättras genom att minska lobbreddden. Detta innebär att amplitudmonopuls kan vara en intressant princip för momentan rikttningsbestämning när tillgång finns till bredbandiga gruppantenn.

Ett annat sätt att mäta infallsriktningen är att som tidigare nämnts mäta fasskillnaden som fås när en signal tas emot av två antenner, s.k. interferometri. Denna metod ger rikttningsfel



Figur 56. Två sätt att triangulera. Till vänster sker trianguleringen med två samverkande inmätare. Till höger sker en egentriangulering där en inmätare genom att förflytta sig mellan mätningarna av infallsvinkeln kan bestämma läget för en fast emitter.

som inte bara är beroende av avståndet mellan antennerna utan även av infallsriktningen. Dessutom kommer resultatet att bli mångtydigt om antennerna har ett inbördes avstånd som är längre än en halv våglängd. Noggrannheten hos en interferometer är bättre än för amplitudmonopuls och anges till omkring ett par grader.

Det finns även tekniker för riktningbestämning som bygger på den tidsdifferens som uppkommer då en signal tas emot av två rumsligt skilda antenner eller mottagare. Denna metod resulterar i en hyperbelgren som pekar ut möjliga emitterlägen. Genom att tillföra en tredje mätstation i systemet åstadkoms två hyperbelgrenar som skär varandra i den punkt där emittern befinner sig. Även här finns problemet med mångtydigheter. En andra skärningspunkt mellan hyperbelgrenarna finns, vilket ger ett falskt emitterläge. Mer om detta nedan.

Lägesbestämning

Krysspejling

Det enklaste och mest självklara sättet att bestämma ett läge är att pejl riktningen till emittern

från två olika punkter och se var linjerna som representerar riktningarna skär varandra. Metoden kallas för triangulering eller krysspejling, se den vänstra delen av figur 56. Felet i lägeskattningen varierar beroende på emitterns läge i förhållande till sis-plattformarna. För att få en bra skattning av läget på långa avstånd från pejlbasen skall den vara så lång som möjligt. Med enkel geometri kan det konstateras att felet i inmätt emitterläge blir mycket stora nära pejlbasens förlängningar. De minsta lägesfelen fås när skärningen mellan de inmätta riktningarna är 90° .

Egentriangulering

Det är möjligt att använda en

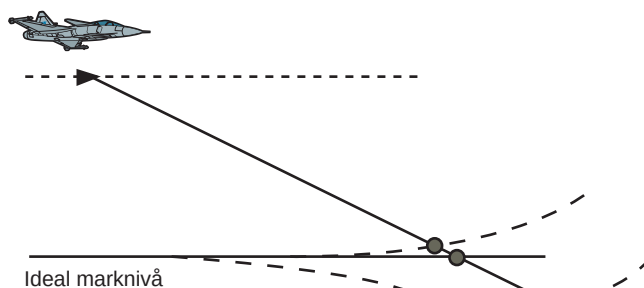
ensam rörlig plattform för att bestämma en emitters läge. Förfarandet kallas för egentriangulering och bygger på att det är möjligt att genom egen rörelse skapa en mätbas, se den högra delen av figur 56. En förutsättning för detta är att signalkällan är stationär eller endast rör sig långsamt och att den sänder under en tillräckligt lång tid, eller är återkommande.

Vertikal triangulering

Genom att från en flygande plattform mäta både azimut och elevationsvinkel är det möjligt att med kännedom om flyghöjden bestämma var emittern befinner sig, se figur 57. Denna metod har vissa svagheter då marknivån inte är plan.

Precisionsmetoder för lägesbestämning

I många fall önskas en bättre lägesbestämning än vad som är möjligt med triangulering. Detta kan åstadkommas med högre precision i riktningmätningarna, längre mättid eller genom att använda så kallade precisionsmetoder. Till dessa räknas TDOA (Time Difference of Arrival), DDOA (Doppler Difference of Arrival) samt LBI



Figur 57. Vid vertikal triangulering kan markens variationer i nivå vara ett problem. I figuren ger de båda alternativa nivåerna (streckade) helt andra resultat än den idealt plana. Detta kan lösas med hjälp av höjddatabaser.

(Långbasinterferometri, Long Baseline Interferometry).

TDOA (Time Difference of Arrival)

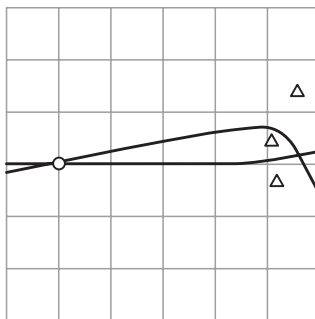
TDOA eller tidsdifferensmätningar bygger på att mäta skillnaden i ankomsttid för en signal mottagen på två eller fler i rummet skilda mottagarsstationer.

Varje par av stationer ger, som tidigare nämnts, en tidsdifferens, vilken i sin tur med lite geometriska beräkningar resulterar i en hyperbelgren på vilken emittern kan befinna sig. Dessa hyperbelgrenar kommer att skära varandra i den punkt som emittern befinner sig i, men i många fall även i någon punkt som ger ett falskt emitterläge, se figur 58. Problematiken med ett falskt läge kan lösas med en extra inhämtningsenhet.

En nackdel med TDOA är att signalen från emittern måste ha någon form av modulation, i annat fall kan inte tidsdifferenserna mätas.

DDOA (Doppler Difference of Arrival)

DDOA bygger som namnet anger på de frekvensförändringar som uppkommer när det finns en relativ rörelse mellan emitter och signalspa-



Figur 58. Det sanna emitterläget är markerat med en ring, och de tre inhämtningsenheterna är markerade med triangler. De två tidsdifferenser som kan mätas resulterar i två hyperbelgrenar som skär varandra i emitterläget, men också i ett falskt läge.

ningsplattform. Signalspanaren kommer, jämfört med radarn, att mäta en hälften så stor dopplerförändring på den mottagna signalen. Detta beror på envägsutbredningen.

En dopplerdifferens mätt mellan två punkter resulterar i en isodopplerskillnadslinje. Denna beskriver alla punkter som kan ge upphov till den mätta dopplerskillnaden. Linjen kommer att ha olika form beroende på hastighetsvektorerna vid tidpunkterna för mätningarna. Med ytterligare en mätning kan en linje till skapas och skärningen mellan dessa pekar ut emitters läge.

LBI (Långbasinterferometri)

Långbasinterferometri är en metod som bygger på mätning av fasskillnaden mellan två mottagarkanaler, men till skillnad från interferometri så är mätbasen – avståndet mellan antennerna – vanligtvis betydligt längre än en halv våglängd. Den långa mätbasen i kombination med att det inte är möjligt att mäta fas i ett större intervall än 360° gör att interferometern blir mångtydig, d.v.s. flera infallsriktningar ger samma uppmätta fasdifferens. Som ett exempel kan avståndet d mellan två antenner antas vara 4 cm. Den mottagna frekvensen antas vara 10 GHz, vilket ger en våglängd på 3 cm. Antas infallsriktningen α vara 0° kommer även riktningarna $-48,6^\circ$ och $+48,6^\circ$ att ge samma uppmätta fasskillnad.

Genom att mäta fasdifferensen med täta intervall samtidigt som signalspaningsplattformen rör sig kan en historik över fasdifferenserna skapas. Ur historiken kan de fassprång, där fasläget byter från -180° till $+180^\circ$ eller vice versa, hittas. Genom att kompensera för fassprången kan fasens förändring beräknas, och ur denna kan slutligen ett läge bestämmas.

Inledning

Datafusion och sensorstyrning handlar om samordning och samverkan mellan sensorer och sensordata. Sensorstyrning ingår ibland i datafusion men beskrivs nedan i ett eget avsnitt, se även faktaruta om JDL-modellen.

Data och kunskap från olika källor kan vara osäkra, ofullständiga och motsägelsefulla. Datafusion är en process som kombinerar dessa data med syfte att maximera nyttoinnehållet. Källorna består oftast av sensorer men också andra datakällor är möjliga. Tyvärr finns det inte några generella lösningar för att fusionera data, lika lite som en ensam sensor kan utnyttjas mot alla möjliga mål. Datafusion kan utföras på data som genererats av sensorer av samma eller olika typ. Datafusionsprocessen anpassar sig dels till utförarens krav och intentioner, dels till de resultat som framkommer under processen.

Ett nätverk består av noder och nodförbindelser. Samordning och samverkan gynnas av ett nätverk.

JDL-MODELLEN

Datafusion kan ses på olika nivåer, och för att klassificera dessa olika nivåer kan någon av flera kategoriseringar användas. Ett sätt är den så kallade JDL-modellen (först utvecklad 1985 av U.S. Joint Directors of Laboratories, och senare reviderad ett flertal gånger), där datafusion beskrivs i 5 nivåer:

Nivå 0 (noll): I denna nivå behandlas förprocessering av data som t.ex. brusfiltrering.

Nivå 1: I denna nivå behandlas allt som rör enstaka objekt (t.ex. fordon). Det kan röra sig om klassificering, positionering eller följning.

Nivå 2: I denna nivå sker situationsanalys. Den ska ge information om läget, inklusive vilka förband och handlingsmöjligheter motståndaren har, givet den omgivande miljön. För att skapa en lägesbild matas systemet med resultat från underliggande multisensordatafusion, samt information från databaser av olika slag.

Nivå 3: Kallas ofta hotanalys och handlar om motståndarens avsikter.

I både nivå 2 och nivå 3 utnyttjas information om motståndarens taktik, materiel och doktrin, tillsammans med kända fakta om väder, framkomlighet (t.ex. broars bärighet och terränghinder) etc. I nivå 3 tillkommer information om egna svagheter, egna resurser som kan vara viktiga mål etc.

Nivå 4: Sensorstyrning. Denna nivå kan kopplas direkt till nivå 0 eller 1 för att förbättra en enstaka sensors förmåga, eller till nivå 2 eller 3 för att planera för framtida spaning och sensorutplacering.

I denna skrift behandlas endast nivå 0 och 1, samt nivå 4 då den kopplas till styrning av de lägsta nivåerna. Denna begränsning utgör det som brukar kallas sensordatafusion, medan övriga delar av JDL-modellen kallas informationsfusion.

Datafusion

Alla sensordata skall kunna komma en användare till del. Användaren är sällan intresserad av rådata, utan data måste oftast behandlas innan den presenteras. Dessutom räcker

ofta inte en enda sensor till för att ge användaren all önskad information, utan flera sensorer krävs för att exempelvis få bättre yttäckning, noggrannare positionering eller säkrare

klassificering. Processen att bearbeta data från en eller flera sensorer från rådata till presenterbar information kallas datafusion.

Datafusion kan ske på olika nivåer (se faktarutan om JDL-modellen). Skillnaden mellan sensordatafusion och informationsfusion definieras i faktarutan. Definitionen leder bl.a. till att datafusion som sker på enstaka objekt (t.ex. farkoster) tillhör kategorin sensordatafusion, medan sammanställning av information rörande större enheter (t.ex. plutoner) hör till kategorin informationsfusion.

Några skäl till datafusion:

- Taktiska skäl. Bättre skydd eller störundertryckning kan exempelvis erhållas genom att använda flera sensorer.
- Bättre täckning över tiden, exempelvis om olika sensorer detekterar samma mål vid olika tidpunkter.
- Styrning av autonoma subsystem, exempelvis sensorer, störundertryckare, minsökningsutrustning,

navigationsutrustning och vapen.

Datafusion kan ses från två fundamentalt olika perspektiv. Top-down-perspektivet utgår från användaren, där grunden är önskemålet om en viss typ av information som skall upptäckas i den mängd av sensorer, databaser etc. som finns tillgängliga. Bottom-up-perspektivet utgår från de data som kommer från sensorerna och hur dessa sätts samman för att ge en lägesbild.

I detta avsnitt diskuteras datafusion utifrån båda perspektiven.

Fördelar med datafusion

Olika typer av sensorer ger olika typer av information, med olika kvalitet. Genom att kombinera data från flera sensorer (sensortyper) kan ofta en högre noggrannhet och säkerhet i resultatet erhållas efter-

som det statistiska underlaget ökar. Detta ger ett antal fördelar vid beräkning av resultaten:

- Möjlighet till kompletterande information. En sensor kan indikera om ett fordon är hjul- eller banddrivet, en annan om fordonet är stort eller litet. Tillsammans ger de en bättre möjlighet att klassificera fordonet.
- Robusthet mot störning. Om en sensor störs ut är det möjligt att fortfarande få information från övriga tillgängliga sensorer, även om kvaliteten troligen blir lägre.
- Redundans – röstning. För att få säkrare resultat kan klassificering göras i många sensorer, och den klassificering som flest sensorer 'röstar' på blir vald.
- Tidigare upptäckt av mål. Eftersom signal-till-brusförhållandet förbättras då många sensorer används kan små förändringar lätt-

EXEMPEL

Exempel på situationer där det är fördelaktigt att fusionera data från flera olika sensorer.

- Med en radar går det att erhålla en noggrann avståndsbestämning till ett mål, medan osäkerheten i vinkelriktning är relativt stor. En FLIR-sensor (Forward Looking InfraRed – bildalstrande IR-sensor) kan noggrant mäta vinkelriktningen till målet, men inte avståndet. Genom att kombinera dessa två sensorer erhålls en noggrannare positionsbestämning av målet än vad som skulle ha varit möjligt om bara en av sensorerna använts.
- Med hjälp av akustiska marksensorer är det möjligt att avgöra om ett fordon är band- eller hjuldrivet. En magnetisk sensor kan avgöra mängden metall som är i närheten. Genom att kombinera dessa två sensorer erhålls en bättre klassificering av de tunga fordon som passerar och deras eventuella last.
- Ett antal radarstationer finns uppställda över en relativt stor geografisk yta. Allt eftersom ett mål rör sig över ytan blir det observerbart för nya radarstationer, men varje ny station som upptäcker det kan utnyttja information som andra stationer redan har kommit fram till.
- Ett flertal radarstationer blir utstörda av en störsändare. Genom att var och en av stationerna kan bestämma riktningen till störsändaren är det med triangulering möjligt att bestämma störsändarens position.

tare upptäckas även i en brusing signal.

- Bättre följning av multipla mål. Det blir enklare att upplösa multipla målspar då data kommer från flera olika källor med delvis olika innehåll. Två spår kan t.ex. korsa varandra för en sensor, men vara åtskilda för en annan.
- Kostnadseffektivitet. Flera billiga sensorer kan ibland ersätta en dyr sensor.
- Triangulering med utplace-

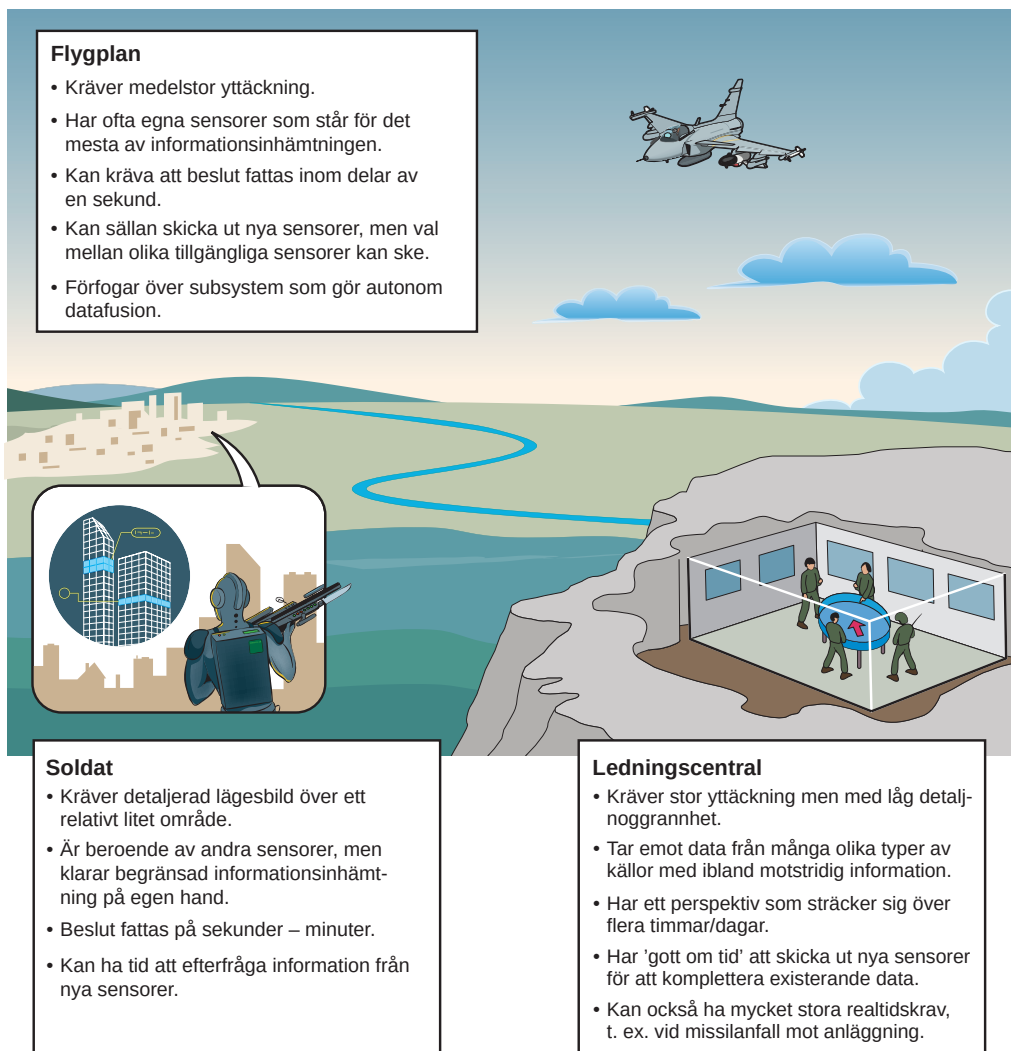
rade sensorer ger position istället för riktning.

Användarkrav

Sensorer skall ge användaren en så bra bild av läget som möjligt. Olika typer av användare har olika krav på sensor-systemet. I figur 59 presenteras krav från tre typer av användare: personer i ledningscentraler, plattformsoperatörer samt soldater i fält.

Information som kan erhållas med datafusion

Information kan erhållas inte enbart från sensorer, utan även från andra typer av källor, t.ex. underrättelserapporter och databaser. All den tillgängliga informationen måste värderas utifrån källa, aktualitet, tillförlitlighet etc. I bästa fall går det att få en situationsuppfattning, med viss osäkerhet, motsvarande en högre nivå i JDL-modellen. Informationen som erhålls kan även användas till



Figur 59. Krav på sensorsystemet från tre typer av användare.

att göra hypoteser om framtida händelser, samt för att planera vidare spaningsinsatser (t.ex. ny sensorplacering).

Den process som beskrivs ovan kan tyckas gå endast från sensorn upp till användaren. I själva verket måste användaren av ett komplext sensorsystem

(eller snarare det informations-system som bland annat består av sensorerna) själv välja vilken typ av information som önskas, annars riskerar hon att få så mycket information att denna inte kan hanteras och bearbetas. Användaren behöver således specificera sin sökprofil i informationssystemet.

Detta blir speciellt viktigt om nätverkstanken implementeras fullt ut. Detta innebär att det, redan då systemet utformas, krävs ett aktivt val av vilken typ av databehandlingsstruktur som önskas, och att det finns ett lämpligt användargränssnitt.

Sensorstyrning

Sensorer är mätinstrument som måste ställas in så att de upptäcker och ger fokus, skärpa och upplösning på det som skall mätas. De olika sätten att åstadkomma detta brukar kallas sensorstyrning.

I detta avsnitt behandlas primärt sensorstyrning i system där olika typer av sensorer sammankopplats. Sådana flersensorsystem finns bland annat i sensorbärande plattformar (UAVer, flygplan, fartyg, markfordon etc.) samt i målsökande robotar och minröjningsutrustning.

Motiv för sensorstyrning

Om flera sensorer skall samordnas ökar möjligheten till sensorstyrning. Ett vanligt exempel är invisning, som innebär att en sensor ställs in så att den fokuserar på en punkt där en annan sensor upptäckt ett mål. På så sätt kan olika sensorer specialisera sina uppgifter, vilket ökar resursutnyttjandet. Sensorer kan också kopplas ihop och stötta varandra. Exempelvis kan en radar och en IRST (InfraRed Search and Track) samordnas så att följningen av ett mål utförs av IRST-sensorn så länge kvaliteten på det gemensamma

målspåret upprätthålls, men av radarn då målspårskvaliteten sjunker för lågt. Detta medger att radarn däremellan kan användas för andra uppgifter.

Vissa sensorer är så flexibla att de kan utföra många typer av uppgifter, ibland simultant. För varje uppgift skall ett antal inställningar göras. För aktiva sensorer kan t.ex. vågformen hos den utsända energin anpassas till uppgiften. Uppgifterna kan ges av operatör eller autonomt av sensorsystemet. I det senare fallet måste sensorn ha förmåga att tolka vilken uppgift som skall utföras, utifrån den huvuduppgift som har getts och den situation som skall observeras.

Multifunktionssensorer (se även avsnittet om radarsensorer) använder delvis egna kriterier för värdering och hantering av de uppgifter som skall utföras, vad beträffar exempelvis prioritering, resurstilldelning och mätmetod. Sådana sensorer kan ta emot beställningar på mätuppgifter från olika delsystem, plattformar och operatörer. Ett bra exempel på en högst flexibel sensortyp är radar med elektriskt styrbar antenn, ESA.

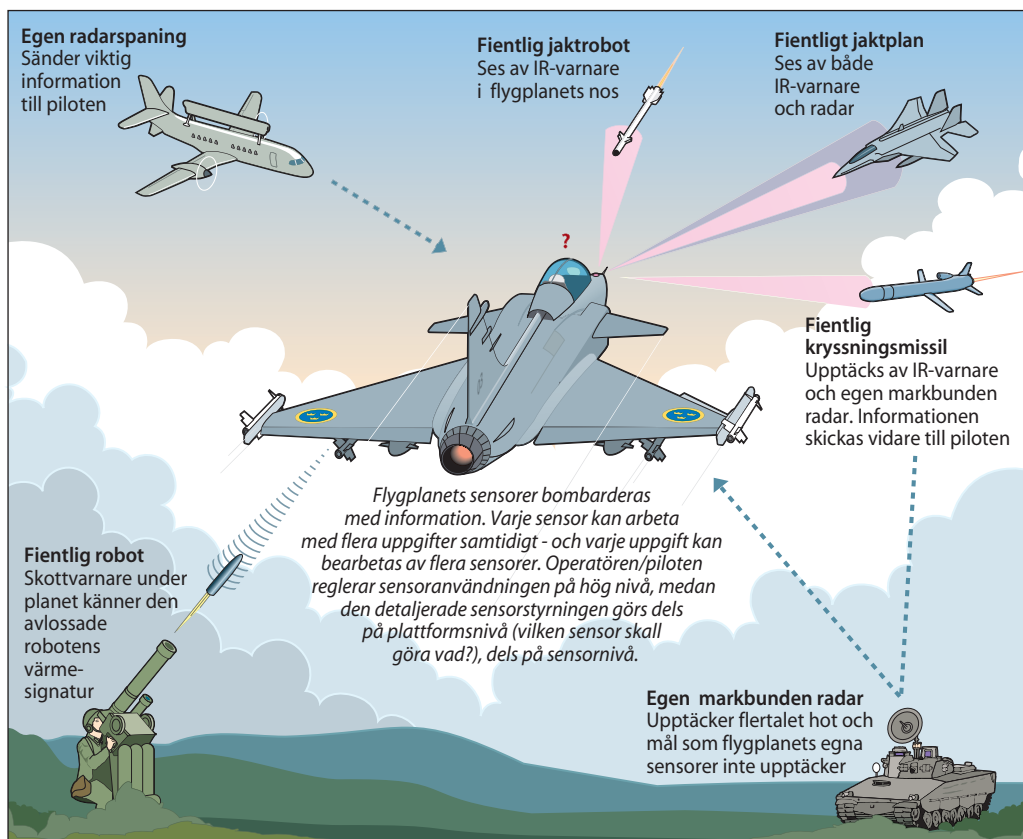
Sensorstyrningen kan även behöva anpassas till taktiska faktorer. En sensoranvändare kan vilja vara osynlig, vilket kan åstadkommas genom att undvika vissa frekvensområden, sektorer etc. Om flera plattformar samordnas, exempelvis genom växelvis sensoranvändning, kan de vara svårare att upptäcka.

Sensorstyrning i nätverk

Kopplingen till nätverk har givetvis stor betydelse för möjligheterna att genomföra sensorstyrning både på hög och låg nivå. Dels ökar antalet tillgängliga sensorer, dels ökar möjligheten att mäta olika aspekter och därmed vinna kunskap om det som skall mätas. Dessutom ökar det taktiska handlingsutrymmet.

Ett problem kan vara att flera operatörer snabbt kan behöva enas om vilka resurser som skall användas för en viss uppgift, men detta kan lösas med policyhantering, som utgörs av distribuerade regelverk om vad som gäller vid resursutnyttjande och resursbrist.

Det finns normalt många sensorberoende uppgifter på en komplex plattform. Dessa skall vid varje tidpunkt allokeras på plattformens sensorer. I traditionella system har många delsystem sin egen sensor och då behövs ingen gemensam sensorstyrare. Men i flersensorsystem med gemensam sensorstyrning kan olika sensorer samverka och på så sätt öka sin gemensamma kapacitet. Vilka sensorer som skall användas för varje uppgift beror på uppgiftsprioritet, sensorbelastning, skyddsbehov m.m. Samma uppgift kan använda olika sensorer, och samma sensor kan utföra flera uppgifter. Sensorallokering (val att utföra viss uppgift med viss sensor) utföres då automatiskt av en plattformscentral sensorstyrare. Exempel på delsystem som använder sensorer är övervakning, vapenstyrning, kommunikation och motmedelssystem.



Figur 60. Flygplanets sensorer belyses med information. Operatören (piloten) kan omöjligt avgöra vilket hot eller mål som skall prioriteras. En central dator i flygplanet bestämmer vilka sensorer som skall göra vad, samt hur den insamlade informationen skall fusioneras.

Sensorer i nätverk

En dröm är att kunna ha tillgång till alla data från alla sensorer i närområdet, och att sedan fusionera dessa på lämpligt sätt. Det skulle kunna innebära att på ett ögonblick kunna få en mycket god lä-

gesbild utan att behöva tillföra egna spaningsresurser. Genom att kombinera lämplig hård- och mjukvara i ett distribuerat sensorsystem kan en stor del av denna dröm realiseras. När en användare efterfrågar informa-

tion skall ett lämpligt nätverk bildas för att handha de aktuella frågeställningarna.

En nod i ett sådant nätverk kan bestå av en sensor eller en plattform med flera sensorer.

En sådan plattform kan själv utföra intern fusion och sensorstyrning. Till vissa noder hör också en operatör. En nod kan vara mer eller mindre temporär. Om plattformen är rör-

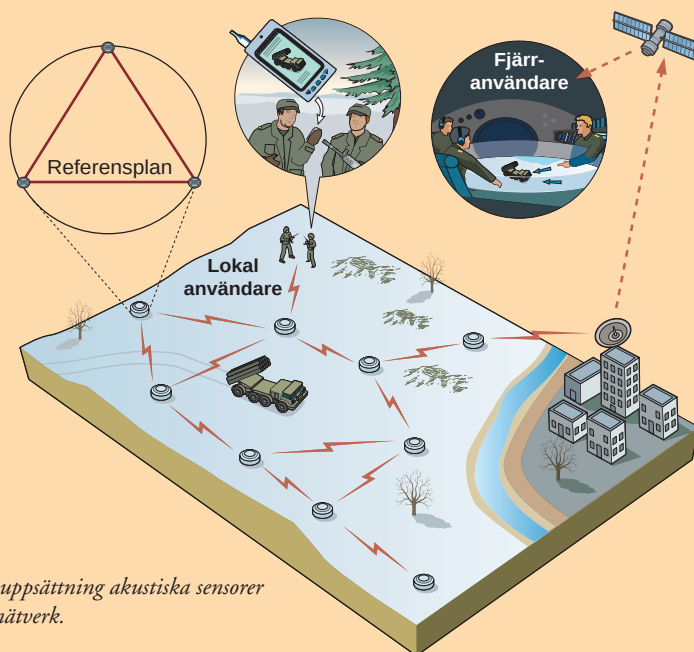
lig är dess medverkan i nätet temporär, och mängden noder i nätet blir dynamisk. Det kan finnas många användare i sådana nät, och i princip kan varje plattformsoperatör använda

alla sensorer i nätet. Metoder finns att hantera de konflikter som kan uppstå beträffande resursutnyttjandet, men taktiska skäl och säkerhetsskäl kan begränsa möjligheterna att fritt

SENSORER I NÄTVERK

I ett sensornätverk bestående av akustiska sensorer (se figur F15) är tre sensorer placerade tillsammans i varje sensornod. Genom ganska enkla matematiska beräkningar går det att med dessa tre sensorer beräkna i vilken riktning den starkaste ljudkällan finns. Sensornoden kan även komprimera ljuddata till ett antal särdrag som beskriver ljudet (dess signatur) och kan användas för klassificering av ljudkällan. Då ett fordon rör sig i sensornätverket kommer ett antal av sensorerna att detektera ljudet, samt beräkna särdrag för och riktning till fordonet.

För att sammanställa alla data behöver sensorerna kommunicera med varandra för att avgöra om det är samma fordon de mäter på eller om det är flera olika (associering). De får då meddelade av grannoderna som också detekterat fordonet dels någon form av fordonsklass (antingen alla särdrag eller någon klassificering baserat på särdragen), dels riktningen till fordonet. Om grannoderna har ett mål av samma klass, och triangulering mellan de olika riktningarna ger en enda punkt (med viss osäkerhetspridning) där ljudkällan kan finnas så är det troligt att det är samma fordon, och alla data kan då sammanställas för att få fram en säkrare (eller mer detaljerad) klassificering än vad som var möjligt med en enstaka sensornod. Om däremot sensornoderna mäter upp olika signaturer och/eller dessa visar sig härröra från olika positioner krävs vidare analys av data för att avgöra om några sensorer kanske mäter på ett eko från samma fordon (detta kan endast göras om något är känt om geografin i området), om några sensorer kan vara skymda och därför uppmäter en distorderad signal, eller om det finns flera fordon i området. Sammanställda data kan sedan skickas till användaren.



Figur F15. En uppsättning akustiska sensorer som bildar ett nätverk.

utnyttja sensorer i nätverk.

Det är en liknande tanke som ligger bakom Internet – att kunna få tillgång till databaser runt om i världen direkt från sin egen dator. För att hitta och sammanställa informationen behövs hårdvaruinterface och hjälpprogram. På motsvarande sätt behöver sensorerna utrustas med nätverkskapacitet och en processor som kan sköta alla uppgifter. Det finns dock krav på militära sensornätverk som är högre än motsvarande krav på Internet:

- *Säkerhet:* Det skall inte gå att avsiktligt föra in falsk information. Oönskade användare skall inte ha tillgång till information. Felaktiga sensorer får inte påverka slutresultatet som presenteras för användaren.
- *Användargränssnitt:* Resultaten skall inte kunna feltolkas.
- *Dataöverföring:* Måste ske med tillräcklig bandbredd.
- *Autonomitet:* Flera olika noder skall kunna kopplas in utan operatörens medverkan.

Dessa aspekter kommer inte att beaktas nedan. Istället behandlas arkitektur samt de mervärden och utmaningar som användandet av data från sensorer i nätverk kan innebära signalbehandlingsmässigt.

Arkitektur

Arkitektur är de principer som reglerar hur data skall skickas i ett nätverk. En arkitektur är nödvändig för att på ett organiserat sätt kunna hantera sensordata i ett nätverk. De två extremfallen utgörs av centra-

liserad respektive distribuerad arkitektur. I verkligheten utnyttjas ofta ett mellanting av dessa varianter.

I en centraliserad arkitektur skickas data från alla sensorer till en centralpunkt i nätverket, där all datafusion sker. Fördelen med denna typ av arkitektur är att all rådata behandlas samtidigt, vilket teoretiskt ger högsta möjliga kvalitet på det fusionerade slutresultatet. Centraliserad arkitektur kräver dock stor bandbredd och energi för att kunna skicka alla data. Dessutom blir den mycket sårbar.

I en distribuerad arkitektur krävs att data förbehandlas i varje sensornod, och att en grupp av sensornoder kan samverka autonomt för att sammanställa data innan de skickas vidare. Detta innebär att data som fusioneras är komprimerad och inte innehåller riktigt lika mycket information som rådata. Oftast är detta inget problem, men den teoretiska prestandan blir lägre. I förhållande till centraliserad arkitektur behöver inte lika mycket data skickas i nätverket. Dessutom blir sårbarheten mycket lägre.

Mervärden

Den första uppenbara fördelen med att ha sensorer i nätverk är att det är möjligt att få stor yttäckning även med sensorer med begränsad räckvidd. Detta kan ge möjlighet att ersätta dyra enkelsensorer med många billiga sensorer eller att enbart använda passiva istället för aktiva sensorer.

Det blir även möjligt att följa mål över hela sensornätverkets

täckningsområde och kombinera data om målet från alla de olika sensortyper som är tillgängliga.

En annan fördel kan vara att spaningskvaliteten höjs, särskilt om enstaka sensorer temporärt blir utstörda eller oanvändbara av andra skäl.

Det kan vara intressant att använda delar av ett nät, till exempel alla sensorer i ett delområde. Sådana subnät eller logiska nät kan skapas tillfälligt eller vara av mer permanent natur, och för flera av dem finns speciella tjänster och funktioner. Informationsflödet i olika subnät har också starkt varierande realtidskrav.

Utmaningar

Säkerställande av kommunikationen mellan noderna är i stor utsträckning gränssättande för möjligheterna att effektivt utnyttja en nätverkslösning. Detta handlar såväl om förmåga att överföra stora datamängder och robusthet hos kommunikationslösningen som om att säkra tillgång till de sensorer som är av intresse och få dessa att skicka data till rätt ställe.

Ur databehandlingssynpunkt finns det några huvudsakliga utmaningar:

- Då flera olika sensorer upptäcker något så måste de ta reda på om det är samma objekt de mäter på. Denna process kallas associering, och försvaras av att alla sensorer har olika vyer av det uppmätta målet eftersom de är placerade på olika geografiska positioner. Detta innebär att även om sensorerna är identiska så kommer de att uppmäta olika signaturer från

samma mål. I nätverket måste det vara möjligt att beräkna sannolikheten för att det är samma mål. Det måste också vara möjligt att upprätthålla multipla hypoteser (t.ex. såväl att det är ett enda mål, som att det är två olika mål), där den felaktiga hypotesen stryks när tillräckligt hög säkerhet har uppnåtts.

- Då man endast har tillgång till en på förhand bestämd

uppsättning av sensorer är det möjligt att veta vilken vikt som skall tilldelas de olika sensorerna i olika situationer. I detta fall är det tämligen enkelt att välja en lämplig datafusionsalgoritm. När både antalet möjliga sensorer och sensortyper är mycket stort, och dessutom föränderligt, blir det omöjligt att på förhand lagra alla möjliga algoritmer. Istället krävs det att nätverket på egen hand kan bedöma datakvaliteten från de

olika sensorerna eller sensortyperna. Det gäller att undvika algoritmer som är så detaljerade att de kan riskera att modellera även brus. På så sätt erhålls större robusthet i de fusionerade resultaten, även om det kan resultera i en lägre detaljnoggrannhet.

- Sensorer måste kunna uppgraderas och bytas ut utan att alla andra noder i nätverket måste uppgraderas.

Denna skrift fokuserar på sensorfunktion och sensoranvändning. För att få en mer komplett bild av sensorernas prestanda, begränsningar och utnyttjande är det viktigt att förutom de begränsningar som ges av fysiken även beskriva medvetna försök att påverka (motverka) sensorerna.

Alla typer av sensorer kan utsättas för motverkan. Motverkan kan antingen handla om att direkt påverka en sensor genom att utsätta den för störning eller fysisk bekämpning, eller om att vidta åtgärder på målobjektssidan genom att t.ex. tillföra målobjektet smygegenskaper eller utnyttja skenmål som framhävs i syfte att vilseleda sensorn.

Den uppdelningen är inte entydig eftersom störning kan vara av vilseledande karaktär och t.ex. leda till att falska målobjekt uppfattas av sensorn. Allmänt ställer moderna sensorer betydligt större krav på motverkanssystemen än äldre sensorer. Genom att använda tekniska motmedel kombinerat med taktiska åtgärder kan spaning försvåras.

Fysisk bekämpning är en möjlighet mot alla sensorer då dessa blivit upptäckta. Exempelvis är en radarsändare sårbar för vapenbekämpning så snart dess position fastställts, vilket kan gå relativt fort så snart den röjt sig genom att sända. Så länge radarn sänder kan signalsökande robotar dessutom styra mot den. Fysisk bekämpning av sensorer kommer inte att diskuteras vidare.

Störning

Sensorer kan utsättas för mer eller mindre sofistikerad störning. Störning handlar inte enbart om att överbelasta sensorns detektor utan även om att vilseleda sensorn, t.ex. genom att få den att uppfatta falska mål.

Inom *det elektrooptiska området* kan äldre störare vara av blinktyp (t.ex. blixtlampa), medan moderna system allt oftare baseras på laserteknik (s.k. antisensorlaser). Sådana laserbaserade motmedel, s.k. DIRCM (eng. directional IR countermeasures) är möjliga inom nästan hela det optiska våglängdsområdet och kan användas för att störa, blända eller vilseleda sensorer. Antisensorlaser finns utvecklade för användning på fordon, fartyg, flygplan och för enskilda soldater. De kan användas mot såväl spanings- som målsökarsensorer inom både det visuella och det infraröda området. Laserpulserna kan vara så energirika att optiska komponenter i visuella sikten, TV-kameror och bildförstärkare blir obrukbara. Invisning och inriktning av en laser kan ske på olika sätt, med information från TV- eller IR-sensorer, radar, laservarnare m.m.

En *radarsensor* kan påverkas med olika former av störning. Det ställs olika krav på störsändaren beroende på var den är placerad. En bakgrundsstörare befinner sig vanligen långt från den radar som skall störas varför den behöver vara effektstark. En närstörare befinner sig däremot nära den störda radarn och kan

därför ha låg effekt. För medstörare och egenstörare ligger kraven på effekt mellan dessa ytterligheter. Vid medstörning utnyttjas särskilt utrustade störplattformar, medan egenstörning innebär att varje plattform har sin egen störutrustning och ansvar för sitt eget skydd.

Störformer kan delas in i maskerande, vilseledande och mätande. Maskerande störning utnyttjas mest för bakgrunds- och medstörning. Vilseledande störning utnyttjas främst för egenskydd av farkoster och innebär att radarekot förvanskas på olika sätt (fördröjs, dopplerförskjuts etc.). Mätande (informationsöversvämmande) störning förväntas bli vanligare.

Inom *det hydroakustiska området* kan spaningssonar utsättas för olika typer av störning. För bredbandig störning av lågfrekventa passiva spaningssonar kan stora elektroakustiska omvandlare användas. Ett alternativ är att utnyttja motmedelspaket bestående av ett stort antal mindre laddningar. Genom att laddningarna detonerar successivt kan bredbandigt buller genereras under viss tid. Motmedel med elektroakustiska omvandlare kan också användas för att störa aktiva spaningssonar. Om störsignalerna anpassas till de signalformer som sänds ut av sonarerna kan kraftig störverkan erhållas.

Vissa (men inte alla) störmeter som används mot radar kan också användas mot sonarer, t.ex. maskerande brusstörning och repetering.

Framhåva falska mål-objekt

Det finns ett antal olika tekniker för att skapa falska mål-objekt som i bästa fall lurar sensorn genom att vara ett för sensorn 'bättre' mål-objekt än det äkta.

Ett exempel inom *det elektrooptiska området* är s.k. facklor. Dessa brinner under en kort tid och genererar då en stark IR-signatur, som har till uppgift att lura sensorn (oftast en målsökare). Facklor för skydd av flygplan brinner vanligen i 3-6 sekunder. För skydd av fartyg krävs längre insatstider, gärna mer än 20 sekunder.

Eftersom utvecklingen av IR-målsökare går mot högre stör-fasthet och multispektral teknik ställs allt större krav på dessa facklor. Enfärgsfacklor klarar t.ex. inte av att haka av moderna målsökare. Stora ansträngningar görs för att vidareutveckla facklor (spektralutseende, form och rörelsemönster). Generellt gäller att facklor får optimal effekt endast om de initieras i rätt tid, vilket kräver varningssensorer. Alternativt kan facklor seriefå-las, vilket kräver riklig tillgång till facklor.

Inom *radarområdet* utnyttjas s.k. remsor, vilka är hårstrå-tunna metalliserade trådar, ofta som fysiska skenmål. På centimetervåglängder får varje sådan remsa mycket liten radar-målarea. För att få skenmåls-effekt packas de tillsammans i buntar, vilka med hjälp av fart-vinden i flygfallet, eller en liten sprängladdning i fartygsfallet, sprids ut. Remsor används för att generera skenekon. Deras blockerande/avskärmande ver-

kan är försumbar, då remsmol-net inte döljer bakomliggande mål. Remsorna bör ha längden en halv våglängd för att få optimal effekt. De har en stor fördel i att de är passiva och som skenmål därför oberoende av vågformen. Remsornas stora och ofta avgörande nackdel är att de omedelbart bromsas upp och får samma hastighet som den omgivande luften. Den vanligaste användningen är i marina scenarier mot sjömåls-robotar.

Inom *det hydroakustiska områ-det* finns självgående skenmål med akustiska ekorepeterare och målbullersimulatorer som kan användas för vilseledning av spanings- och eldlednings-sonarer. En ekorepeterare kan återsända signaler som efter-liknar ekon av verkliga objekt. Mot sonarer som arbetar vid låga frekvenser krävs skenmål av relativt stor dimension för att generera tillräcklig uteffekt. Mot passiva sonarer används en sändare (en målbullersimulator) som sänder ut en signal som efterliknar signalen från ett verkligt objekt.

Elektromagnetiska sensorer under vattenytan kan vilseledas om skenmål ges målliknande magnetisk respektive elektrisk signatur. Utvecklingen inom strömförsörjningsområdet med-för att stora självgående sken-mål med stor uthållighet och gångdistans kan användas för vilseledning av spaningssystem över stora havsområden. Ett sådant skenmål kan baseras på en torpedliknande kropp eller annan typ av obemannad far-kost (Unmanned Underwater Vehicle, UUV).

Dölja äkta mål-objekt

Att dölja äkta mål-objekt inne-bär att utnyttja olika metoder för att minska objektets signa-tur. Det kan handla såväl om konstruktionsåtgärder (leda bort värme, smygegenskaper hos material eller anpassning av form) som om att utnyttja döl-jande medel som rök. Det finns idag en strävan att minska sig-naturerna för nya plattformar. Ett välkänt svenskt exempel är korvett Visby.

En lyckad signaturanpassning innebär ökad överlevnadsför-måga för det hotade objektet. Här kan man jämföra med djur-världen där många bytesdjur har en kroppsteckning som, betrak-tad i rovdjurets ögon (sensorer), liknar omgivningen. Kunskap om hur mål upptäcks kan an-vändas för att gömma föremål. Signaturanpassning är verksamt mot sensorer i hela kedjan från upptäckt, klassificering och identifiering till slutfasstyrning och zonrörsfunktioner.

Inom *det elektrooptiska området* utnyttjas bl.a. rök och vatten-dimma för att dölja mål-objekt. Rök dämpar målstrålningen, genom absorption eller sprid-ning. Det finns också rök som i huvudsak är emitterande, vil-ket innebär att målstrålningen 'försviner' i en förhöjd om-givningsnivå. Effekten i tid är mycket varierande och är starkt vindberoende. Rök behöver genereras kontinuerligt för att ge skydd.

Ett annat sätt att dölja objekt är att utnyttja multispektral vattendimma, en teknik som är under utveckling. En fördel med denna är att skyddsob-jektet kyls av vattendimman,

m.a.o. spelar det inte lika stor roll om skyddsobjektet blottas i en vindby. Det är dock svårt att producera riktigt små vattendroppar. En vanlig storlek är 30 µm, vilket innebär att vattendimman är effektiv i hela det optiska området.

Bland åtgärder som kan vidtas för att minska IR-signaturen är ventilering och skärmning av heta källor, isolering av farkoster för att inte intern värme skall ledas ut, skärmning av karakteristiska strukturer som kan medge klassificering och identifiering samt ytbeläggningar som reducerar den termiska utstrålningen.

Eftersom bakgrunden skiftar i takt med att ett fordon rör sig eller att en hotsensor ändrar position bör signaturanpassningen ske dynamiskt och vara styrbar. Detta kan ske genom att variera ventilationsflöden. På senare tid satsas allt större resurser på att utveckla olika material som är styrbara och kan ändra sin reflektans genom yttre styrning (t.ex. efter temperatur). Det finns också tankar om att bygga in böjbara plastbildskärmar direkt i skrovet på t.ex. fordon för att kunna återge bakgrunden upptagen med en sensor. Detta borde också vara möjligt att utvidga till IR-området.

Inom *radarområdet* har s.k. stealthteknik börjat tillämpas under de senaste decennierna. Plattformer, bl.a. flygplan och fartyg, har konstruerats för att minimera radarsignaturen. Detta leder till att dessa smyg-anpassade plattformar sprider mycket av radarstrålningen i andra riktningar än till mottagaren, varför räckvidderna för monostatisk radar minskar.

Denna utveckling på målsidan försöker radarsystemen möta genom olika slag av förbättringar, t.ex. högre medeleffekt, större antenn, mindre förluster i mottagare och signalbehandling samt mer flexibla avsökningsmönster och belysningstider (effektiv radarstyrning).

Inom det hydroakustiska området förekommer också signaturanpassningsåtgärder för att försvåra upptäckt och följning. Ubåtarnas skydd och taktiska agerande bygger i grunden på att, i det längsta, undgå upptäckt. De goda möjligheterna som finns under vattenytan för en tyst farkost att uppträda dolt har givit ubåtarna deras höga stridsvärde. Signaturanpassningen mot passiva sonarer har också drivits långt för yststridsfartyg med ubåtsjakt och minröjning som huvuduppgifter. Signaturanpassningen har inte drivits lika långt mot aktiva sonarer. Passiva absorberande skikt används dock sedan lång tid tillbaka på ubåtar. Farkoster under vattenytan skulle liksom 'stealth'-flygplan kunna ges geometrisk form som skulle försvåra spaning med 'normala' aktiva spaningssonarer avsevärt. Ubåtar med extrem skrovutformning har dock inte utvecklats på grund av att sådan utformning har nackdelar i andra avseenden. Ett mer realistiskt exempel är att ge på botten liggande minor, så kallade bottenavståndsmminor, en form som gör att de är svåra att särskilja från botten. Ett komplement till de passiva ytbeläggningar som används idag för att reducera akustiska ekon kan i framtiden vara att använda aktiva styrbara material. Dessa kan också användas för

ett flertal andra tillämpningar såsom att 'styra' uppkomsten av turbulens kring en kropp, reducera utstrålat buller och kontrollera vibrationer i mekaniska strukturer.

För att motverka *elektromagnetiska sensorer under vattenytan* kan t.ex. avmagnetisering och magnetisk behandling av fartygen utnyttjas. Detta är ett sätt att svara på hotet från magnetiskt aktiverade minor och magnetisk spaning. Metoderna har till syfte att minska fartygens magnetiska påverkan på den omgivande fältbilden, så att de blir mindre synliga för de magnetiska sensorerna. Vid avmagnetisering appliceras ett tidsvarierande fält nära fartygsskrovet för att minimera den remanenta magnetiseringen. Detta kan t.ex. ske genom att ett fartyg långsamt rör sig över ett spolsystem som installerats på havsbotten. Mätstationer brukar finnas vid avmagnetiseringsstationerna för att mäta fartygets magnetisering.

Det finns även metoder för att minska fartygens elektriska signatur. Dessa omfattar bl.a. användande av bättre och mer heltäckande ytskikt på fartygsskroven, lämpligare val av skrovmaterial (t.ex. plast eller komposit) samt alternativa framdrivningssätt.

Många fartyg är utrustade med ett aktivt magnetskydd som tar hand om den inducerade magnetiseringen. Ett sådant system består i huvudsak av ett antal magnetometrar som har placerats runt om på fartyget, ett datorsystem som i varje tidpunkt beräknar hur stort kompensationsfält som behövs och ett fast spolsystem för att skapa

fältet. Under ideala förhållanden släcker fältet från spolsystemet ut fartygets magnetiska bild. På motsvarande sätt görs även försök med aktiva elektriska metoder för att minska den elektriska signaturen.

DECIBELBEGREPPET

För fysikaliska storheter vars mätetal vanligen varierar inom ett stort område, åtskilliga tiopotenser, finns det ett behov av att göra värdeskalan mer kompakt. Ett sätt att göra detta är att utnyttja ett relativt, logaritmiskt mått, som betecknas decibel, förkortat dB. En egenskap vid användandet av dB är att addition och subtraktion ersätter multiplikation och division, vilket förenklar beräkningar och underlättar förståelsen av grafiska presentationer.

Grundläggande definition:

$$B = \text{Bel} = \log_{10}(P_1/P_2), \text{ d.v.s.}$$

$$\text{dB} = \text{decibel} = 10 \cdot \log_{10}(P_1/P_2)$$

där P_1 = den uppmätta eller beräknade effekten, och P_2 = referenseffekten.

Decibel uttrycker alltså förhållandet mellan två kvantiteter. För att uttrycka en absolut storhet refereras denna till en baskvantitet. Ett exempel är dBm, som t.ex. används för att ange uteffekten från en generator. I detta fall ansätts att baskvantiteten, det vill säga referenseffekten P_2 , är 1 mW. Om $P_1 = 1$ watt uttrycks alltså detta som $P_1 = 30$ dBm.

DOPPLEREFFEKT

Då ett målobjekt rör sig i förhållande till den detekterande sensorn blir vanligen frekvensen hos den mottagna signalen en annan än hos den utsända. Fenomenet kallas dopplereffekt och uppträder för alla slags vågor.

Dopplereffekt uppstår både då sändaren rör sig, då observatören rör sig och då bägge rör sig (så länge inte den relativa rörelsen är noll).

Det kanske allra lättast iakttagbara exemplet på dopplereffekten är sirenerna från utryckningsfordon. Ljudet från dessa minskar i frekvens då fordonen passerar observatören. Allmänt gäller att då avståndet minskar uppfattar observatören en högre frekvens än den utsända medan då avståndet ökar observatören uppfattar en lägre frekvens än den utsända.

För fallet aktiv sensor med sändare och mottagare (observatör) på samma plattform (och således med samma rörelse) kan frekvensförskjutningen skrivas

$$\Delta f = \frac{2 \cdot v}{c} f = \frac{2 \cdot v}{\lambda}$$

där f är den utsända frekvensen, λ våglängden, v målets hastighet relativt sensorn längs siktlinjen och c vågens utbredningshastighet. Beroende på om målet närmar eller fjärfar sig kan dopplereffekten bli positiv eller negativ.

Dopplereffekten har mycket stor betydelse eftersom frekvensförskjutningen hos ett eko dels gör detta lättare att uppfatta, dels ger uppgifter om målets rörelser.

Exempel: Vid en sändarfrekvens $f=20\,000$ Hz och ljudhastigheten $1\,500$ m/s ger en relativ hastighet av $7,5$ m/s mellan målobjekt och sensor en dopplereffekt av 200 Hz.

Förkortningar

AESA	Aktiv elektriskt styrd antenn	HPD	Hög pulsdoppler
AH	Attackhelikopter	IHO	Internationella hydrografiska organisationen
ARTHUR	Artillery Hunting Radar	IK	Igenkänning
ASLU	Adaptiv sidolobsundertryckning	IR	Infrared/ Infrarött
ATR	Automatic Target Recognition	IRST	Infrared Search and Track
AWACS	Airborne Warning And Control System	IRV	Infrared Vision
BTR	Bearing Time Recorder	ISAR	Invers syntetisk aperturradar
CARABAS	Coherent All Radio Band Sensing	JAS	Jakt Attack Spaning
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter	JDL	Joint Directors of Laboratories
CNTBTO	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation	JSF	Joint Strike Fighter
CW	Continuous Wave	JSTARS	Joint Surveillance Target Attack Radar System
DDOA	Doppler Difference of Arrival	LBI	Long Baseline Interferometry
DI	Directivity Index	LFAS	Lågfrekventa aktiva sonarer
DIRCM	Directional Infrared Counter Measures	LIDAR	Light Detection and Ranging
DPCA	Displaced Phase Center Antenna	LO	Lokaloscillator
DT	Detection Threshold	LPD	Låg pulsdoppler
ELF	Extremely Low Frequency	LPI	Low Probability of Intercept
EO	Elektrooptik, elektrooptisk	LWIR	Long Wave IR
ESA	Elektriskt styrd antenn	MAD	Magnetic Anomaly Detection
FLIR	Forward Looking Infrared	MTI	Moving Target Indication
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave	MPD	Medium pulsdoppler
FMV	Försvarets materielverk	MWIR	Mid Wave IR
FOA	Försvarets forskningsanstalt	NBC	Nuclear Biological Chemical
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut	NIR	Near IR/Nära IR
FPA	Focal Plane Array	NL	Noise Level
FPN	Fixed Pattern Noise	NVD	Night Vision Device
GMTI	Ground Moving Target Indication	NVG	Night Vision Goggles
HF	High Frequency	OTH	Over the Horizon (Radar)
		PCL	Passive Coherent Location
		PCR	Passive Coherent Radar
		PRF	Pulsrepetitionsfrekvens

PRI	Pulsrepetitionsintervall
RADAR	Radio Detection and Ranging
RL	Reverberation Level
S/M-modul	Sändar-/mottagarmodul
SAL	Syntetisk aperturlaser
SAR	Syntetisk aperturradar
SAS	Syntetisk apertursonar
SE	Signal Excess
SEAD	Suppression of Enemy Air Defences
SIS	Signalspaning
SL	Source Level
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Signal-till-brusförhållande)
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
SRR	Signal-to-Reverberation Ratio
SSRB	Signalsökande robot
SWIR	Short Wave IR
TAS	Towed Array Sonar
TDOA	Time Difference of Arrival
TIR	Termisk IR
TL	Transmission Loss
TPK	Turns per Knots
TS	Target Strength
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UHF	Ultra High Frequency
ULF	Ultra Low Frequency
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
UV	Ultraviolett
VHF	Very High Frequency
VIS	Visuellt
VMS	Varnar- och motverkanssystem

Hydroakustik

Urick, R., **Principles of Underwater Sound**, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.

Lurton, X., **An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications**, Springer, 2002.

Pihl, J. et al., **Underwater Acoustics in the Baltic**, FOA-R--98-00727-409--SE, FOA, 1998.

Elektromagnetiska sensorer för marint bruk

Bornhofft, W. & Trenkler, G., **Sensors: A Comprehensive Survey, Vol. 5 - Magnetic Sensors**, (i Göpel, W., Hesse, J., & Zemel, J. N. eds.), VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1989.

Lenz, J. E., **A Review of Magnetic Sensors**, Proc. IEEE, vol.78, 973, 1990.

Peddell, J. B. & Garnett, G. W., **Review of Electromagnetic Research in an Ocean Environment**, Proceedings of International Conference on Marine Electromagnetics, MARELEC, 1997.

Filloux, J. H., **Instrumentation and Experimental Methods for Oceanic Studies**, (i Jacobs, J. A. (ed.), Geomagnetism), Academic Press, 1987.

Kittel, C., **Introduction to Solid State Physics**, 6th ed. John Wiley & Sons, 1986.

Cheng, D. K., **Field and Wave Electromagnetics**, 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

Seismik och akustik

Båth, M., **Introduktion till Seismologin**, Natur och Kultur, 1970.

Lay, T. & Wallace, T. C., **Modern Global Seismology**, Academic Press, 1995.

Dahlman, O. & Israelson, H., **Monitoring Underground Nuclear Explosions**, Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.

Elektrooptik

FOI orienterar om: **Elektromagnetiska vapen och skydd**, FOI, 2001.

Lindgren, M., **Teknisk Prognos Fotonik**, FMV Analys 21810/10116:03, 2003.

Passiva system

Campana, S. B. (ed.), **The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 5: Passive Electro-Optical Systems**, SPIE Optical Engineering Press, 1993.

Aktiva system

Steinvall, O. et al., **Grindad avbildning - fördjupad studie**, FOI-R--0991--SE, FOI, 2003.

Steinvall, O. et al., **Laser based 3-D Imaging New Capabilities for Optical Sensing**, FOI-R--0856--SE, FOI, 2003.

Osche, G. R., **Optical Detection Theory for Laser Applications**, John Wiley & Sons, 2002.

Jelalian, A. V., **Laser Radar Systems**, Artech House, 1991.

Vaughan, J. M. et al., **Coherent Laser Radar in Europe**, Proc. IEEE, Vol. 84, No. 2, pp. 205-226, February 1996.

Fox, C. S. (ed.), **The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 6: Active Electro-Optical Systems**, SPIE Optical Engineering Press, 1993.

Hydrooptik

Mobley, C. D., **Light and Water**. Academic Press, 1994.

Steinvall, K. O., Koppari, K. R., & Karlsson, U. C. M., **Airborne Laser Depth Sounding. System Aspects and Performance**. In Ocean Optics XII, Jaffe, J. S. ed., Proc. SPIE 2258, pp. 392-412, 1994.

Tulldahl, M., **Detection and Depth Sounding of Small Targets with Airborne Laser Bathymetry**, Ph D Thesis, Dissertation No. 855, Linköpings Universitet, 2003.

Radar

Alm, A. et al., **Elektriskt styrda gruppantenn-er för radar i stridsflygplan**, FOI 02-1590:2, FOI, 2002.

Alm, A. et al., **Systemkoncept med konforma gruppantenn-er**, FOI-R--0934--SE, FOI, 2003.

Carreram, W., Goodman, R. & Majewski, R., **Spotlight Synthetic Apertur Radar - Signal Processing Algorithms**, Artech House, 1995.

Curland, J. & McDonough, R., **Syntethetic Apertur Radar - System and Signal Processing**, John Wiley & Sons, 1991.

Kingsley, S. & Quegan, S., **Understanding Ra-dar Systems**, SciTech Publishing, 1999.

Stimson, G., **Introduction to Airborne Radar**, SciTech Publishing, 1998.

Skolnik, M., **Introduction to Radar Systems**, McGraw-Hill, 2001.

Telekrig - lärobok för armén, M7746-168001, Försvarsmakten, 1997.

SIS- sensorer

Andersson, B. et al., **Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer**, FOI-R--0719--SE, FOI, 2002.

Bergdal, H. et al., **Signalspaningsteknik del 1, Grunder samt radiosignalspaning**, FOI, 2001.

Bergdal, H. et al., **Signalspaningsteknik del 2, Radarsignalspaning**, FOI, 2002.

Datafusion och sensorstyrning

Hall, D. & Llinas, J. (eds.), **Handbook of Mul-tisensor Data Fusion**, CRC Press, 2001.

Blackman, S. & Popoli, R., **Design and Analysis of Modern Tracking Systems**, Artech House, 1999.

OMRÄKNINGSTABELL	BETECKNING	FÖR-KORTN	10-POTENS	MULTIPLAR OCH DELAR
Ljushastigheten	tera-	T	10 ¹²	En biljon
$c \approx 3 \times 10^8$ meter/sekund	giga-	G	10 ⁹	En miljard
Våglängd i meter	mega-	M	10 ⁶	En miljon
$\lambda = \frac{c}{f}$	kilo-	k	10 ³	Ett tusen
Frekvensen i hertz	hekto-	h	10 ²	Etthundra
$f = \frac{c}{\lambda}$	deka-	da	10 ¹	Tio
Energin i elektronvolt (eV)	deci-	d	10 ⁻¹	En tiondel
$E = h \times f$	centi-	c	10 ⁻²	En hundraedel
$h = 4,1 \times 10^{-15}$ eV x sekund	milli-	m	10 ⁻³	En tusendel
(Plancks konstant)	mikro-	m	10 ⁻⁶	En miljontedel
	nano-	n	10 ⁻⁹	En miljarddel
	piko-	p	10 ⁻¹²	En biljondel
	femto-	f	10 ⁻¹⁵	En kvadriljondel
	atto-	a	10 ⁻¹⁸	En kvintiljondel
	Ångström	1 Å	1 x 10 ⁻¹⁰ m	En tio miljarddel meter