

Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning

Lars Falk



Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning

Lars Falk

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Försvarsanalys 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1250--SE	Klassificering Vetenskaplig rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år Juni 2004	Projektnummer E 7019
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
Författare/redaktör Lars Falk	Projektledare Sven Berglund	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning		
Sammanfattning (högst 200 ord) Crosseye-störning används för att på elektronisk väg skapa skenmål belägna utanför en plattform som ska försvaras mot anfallande robotar. Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning har studerats för att undersöka hur noga ett crosseye-system måste vara konstruerat för att bli verksamt mot robotar. Radarsignaler från roboten kan sprida sig på ett komplicerat sätt, särskilt över vatten, och det påverkar den noggranna fasstyrning som krävs i ett crosseye-system. De avvikelser som kan sätta ett skenmål ur funktion har uppskattats med hjälp av reciprocitetssatsen, som visar att crosseye-system fungerar även i komplicerade miljöer. Kvantitativa resultat härleds beträffande kraven på komponenter i ett crosseye-system. Reciprocitetssatsen för elektromagnetiska vågor utnyttjas i denna analys genom att begreppen "idealisk målsökare" och "idealiskt reciprokt crosseye-system" införs för att uppskatta de praktiska gränserna för crosseye-störning.		
Nyckelord telekrig, monopuls, robot, crosseye, störning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650 - 1942	Antal sidor: 31 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Defence Analysis SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1250--SE	Report type Scientific report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year June 2004	Project no. E 7019
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Lars Falk	Project manager Sven Berglund	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Influence of wave propagation on crosseye jamming		
Abstract (not more than 200 words) Crosseye jamming is a method used to create electronic decoys outside a platform in order to deflect attacking missiles. The effect of wave propagation in complicated environments has been studied to investigate how precisely a crosseye system must be constructed to handle incoming missiles. Radar waves emitted by the missile will be scattered, especially over sea, and this may affect the delicate phase balance required in a crosseye system. The level of phase error that will invalidate crosseye jamming has been estimated by employing the principle of reciprocity, which shows that a system may work even in complicated environments. Quantitative results are also derived concerning the requirements on components used in crosseye systems. The principle of reciprocity is invoked in this analysis by defining an “ideal missile seeker” and an “ideal reciprocal crosseye system”, which are used to obtain the practical limits imposed on crosseye jamming.		
Keywords electronic warfare, monopulse, missile, crosseye, jamming		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650 - 1942	Pages 31 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

1.	INLEDNING.....	6
1.1	SYFTE.....	7
2.	METODIK.....	7
3.	RESULTAT	8
4.	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	8
5.	CROSSEYE-PRINCIPEN.....	9
5.1	TIDEN FÖRE 1990	9
5.2	TIDEN EFTER 1990.....	10
6.	RADARMÅLSÖKARE	11
7.	GEOMETRISK HÄRLEDNING.....	14
7.1	SIGNALER I FAS	14
7.2	SIGNALER UR FAS	15
7.3	MISSAVSTÅND.....	17
8.	PARAMETERVAL.....	20
8.1	AMPLITUD OCH FAS	20
8.2	SIGNALSTYRKA	21
9.	KONSTRUKTION AV CROSSEYE-SYSTEM.....	23
9.1	ANALOGA OCH DIGITALA KOMPONENTER	23
9.2	RECIPROCITETSSATSEN	25
10.	INVERKAN AV SPRIDNING	27
11.	SLUTSATSER.....	30
12.	ERKÄNNANDE	30
13.	REFERENSER.....	30

1. Inledning

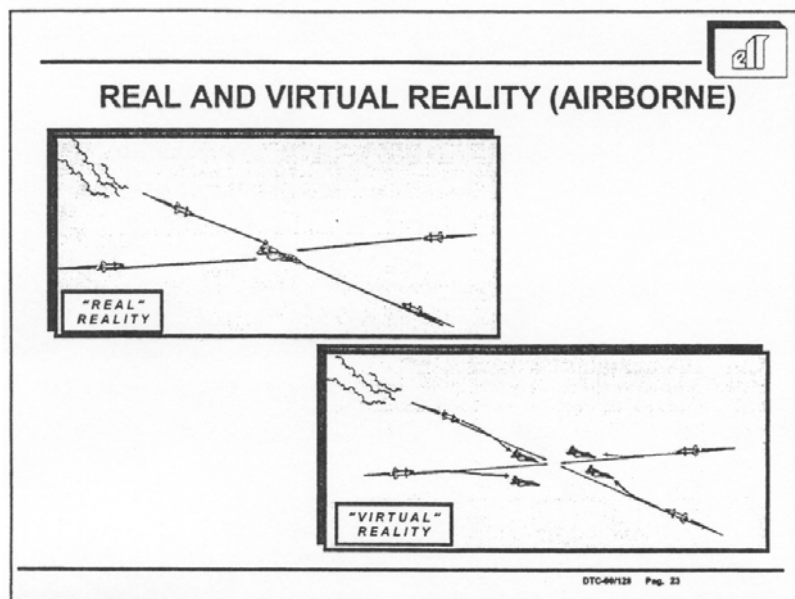
Målsökande robotar är ett allvarligt hot mot militära plattformar. Det gäller särskilt till sjöss och i luften, där klotter inte påverkar målsökaren i någon större utsträckning. Robotar är billigare än sina mål och kan skjutas i salvor. Den höga accelerationen och rörligheten i svängar gör dem dessutom svåra att undvika genom manövrer.

Modernt försvar mot robotar går främst ut på att undvika upptäckt av spaningssensorer. Om detta misslyckas måste man locka roboten bort från målet. Traditionellt sker det med en kombination av brusstörning och remsor. Man kan också repetera radarsignalen och försöka avhaka roboten i avstånd och hastighet.

En översikt av de alltmer avancerade metoder som används för att leda bort robotar visar att de flesta utnyttjar någon ofullkomlighet hos målsökaren (Eneroth och Falk, 2003). Sådana svagheter är svåra att utnyttja i modern krigföring, eftersom robotarnas målsökare successivt byts ut så att svagheter elimineras. Vid asymmetrisk krigföring är det svårt att veta vilka robotar och målsökare motståndarsidan förfogar över.

Dessa omständigheter gör det önskvärt att utveckla nya försvarsmetoder som är oberoende av robotens tekniska nivå. *Crosseye* är en sådan metod som använder ett system av två antenner för att vrida fasfronten hos den returnerade radarsignalen. Det uppstår ett skenmål bredvid det verkliga målet i en process som kallas *crosseye* eller *fasfrontsdistorsion*.

Den svaghet som utnyttjas vid *crosseye* ligger inte i radarns konstruktion utan i principen för riktningsmätning med radar och kan näppeligen ändras inom överskådlig tid. Skenmålet måste vara starkare än farkostens eko för att locka till sig roboten och leda den vid sidan om plattformen (Figur 1). Det paradoxala ligger i att antennerna befinner sig ombord på farkosten.



Figur 1. Vilseledning av robotar vid anfall mot flygplan (Aviation Week & Space Technology, June 25, 2001, "New Jammer Aims To Oust Towed Decoy" (Bild från Elettronica)).

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att analysera hur crosseye-system fungerar i komplicerade miljöer. Det är svårt att bedöma hur radarvågornas spridning påverkar metoden, eftersom den är känslig för små färfel. Experiment har tidigare utförts i utvalda miljöer, men det är en osäker metod, med tanke på hur svåra och kostsamma försöken är.

För att öka förtroendet för crosseye är det viktigt att funktionen prövas systematiskt. Framför allt måste man visa att störningar och färfel i naturen inte påverkar metodens tillförlitlighet. Bara på så vis kan man avgöra om ett crosseye-system verkligen förmår skydda ett fartyg eller flygplan mot robotar.

Det är särskilt svårt att avgöra hur radarstrålarnas spridning påverkar crosseye-metoden i komplicerade miljöer, t ex vid sjögång. I luften har italienska Elettronica genomfört en serie framgångsrika experiment (Neri 2000; Bacchelli 2001). Elettronica har också utfört experiment i marin miljö, men där är det svårt att dra generella slutsatser med tanke på hur oberäkneligt vattenvågor uppträder.

Liknande erfarenheter gjordes i svenska försök 1995-96. Experimenten visade att det är nödvändigt att finna kvantitativa mått på hur ett crosseye-system fungerar, om radarvågorna sprids mot vattenvågor, skum och andra föremål. Försök i flera länder har bekräftat att en robot kan avhakas i vinkel med hjälp av crosseye, men inofficiellt har många länder rapporterat om svårigheter när förhållandena inte längre är ideala. Det är oklart vilka omständigheter som krävs för att crosseye-störning ska lyckas, eftersom de flesta försök är hemliga.

Syfte med detta arbete är att kontrollera principerna för crosseye och föreslå en praktisk konstruktion av ett system. För det ändamålet krävs en lättbegriplig teori som beskriver alla former av crosseye-störning. Dessutom måste den vara tillräckligt tydlig för att övertyga användarna om att metoden är användbar i praktiken.

2. Metodik

Tidigare arbeten om crosseye byggde på traditionella radarberäkningar, men ett sådant synsätt leder till svårigheter i marin miljö. Radarvågors spridning mot havsvatten kan knappast beskrivas på traditionellt sätt.

I denna rapport används en metod som bygger på allmänna principer, som tidigare använts för att visa att crosseye-störning fungerar i komplicerade miljöer (Falk 2000). För första gången analyseras crosseye-principen också kvantitativt. Gränserna för metoden undersöks liksom de avvikelser ett system tål innan skenmålet upphör att fungera. För detta ändamål införs begreppen "idealisk målsökare" och "idealiskt reciprokt crosseye-system", som används för att analysera de praktiska gränserna för crosseye-störning.

3. Resultat

Analysen visar att spridning av radarvågor inte behöver påverka effekten av crosseystörning i ett korrekt konstruerat system. Denna överraskande slutsats redovisades på AOC-konferensen i Rom i maj 2004 (Falk 2004).

Analysen visar också att man kan ge kvantitativa mått på hur noga systemet måste vara konstruerat vid spridning i olika typer av terräng. Till skillnad från tidigare arbeten ges kvantitativa resultat som beskriver de krav som måste ställas på komponenterna i ett crosseystem.

I ett senare arbete kommer fördjupade resultat att presenteras, men redan här bör nämnas att analysen tycks förklara vissa störningar som observerats under försök utförda vid FOI och vid Elettronica. Det rör sig om de fall där radarsignaler utbreder sig över vattenvågor. Det är angeläget att med hjälp av teorin planera försök för att pröva dessa effekter systematiskt.

Analysen är också teoretiskt intressant, eftersom crosseystem är ett av de få system där en allmän princip (reciprocitessatsen för elektromagnetiska vågor) kan användas för att härleda kvantitativa resultat om en metods praktiska användning. Tidigare experiment har visat att crosseystem-principen fungerar i praktiken. De nya resultaten antyder att teorin kan användas för att prediktera och planera praktiska försök.

4. Förslag till fortsatt arbete

Ett fungerande robotskydd baserat på crosseystem kräver att grundprincipen prövas i systematiska försök. Proven bör gälla komponenter och utbredningsproblem. I det senare fallet krävs en exakt teori för planering och tolkning av försöken av det slag som initieras i denna rapport.

Ett intressant alternativ vore att utföra praktiska försök tillsammans med italienska försvarsmakten. Den italienska marinen och det italienska flygvapnet har fungerande prototyper till crosseystem levererade av Elettronica. Utrustningarna fungerar utmärkt och den italienska marinen har utfört försök i Medelhavet. Det vore angeläget att inleda ett samarbete mellan Sverige och Italien för att granska denna fråga med tanke på att vi redan diskuterat praktiska och teoretiska frågor tillsammans.

5. Crosseye-principen

Crosseye-störning är en metod för att skapa elektroniska skenmål vid sidan om ett verkligt mål. Skenmålet skapas av antenner ombord på farkosten, men ligger ändå tillräckligt långt ut för att skydda plattformen från robotar (Figur 2).



Figur 2. En sjömålsrobot anfaller ett fartyg som är utrustat med ett crosseye-system och genererar ett trovärdigt elektroniskt skenmål beläget bredvid fartyget.

Skenmålet måste vara starkare än farkostens radareko för att locka till sig roboten. För att skenmålet ska bli trovärdigt repeteras radarns signal i crosseye-systemet, där man också kan lägga på lämpliga modulationer och fluktuationer. Denna process utförs naturligtast med digitala komponenter.

Tidigare försökte man utnyttja analoga komponenter för att skapa crosseye-signaler. Digitala komponenter såsom radiofrekventa minnen (DRFM) har tagits fram under de senaste tjugo åren och visar sig vara överlägsna i denna tillämpning. Utvecklingen av crosseye är därför naturligt uppdelad i två perioder, före och efter 1990.

5.1 Tiden före 1990

Idén till crosseye är gammal, men det dröjde länge innan tekniken nådde en sådan mognad att metoden kunde förverkligas. Forskning har bedrivits i största hemlighet i flera länder, men de flesta gav upp på grund av tekniska problem. Det var något av en sensation när Sverige och Italien visade att crosseye trots allt fungerar (Falk 2000, Neri 2000)

Crosseye bygger på interferens mellan två nästan lika starka signalkällor och leder till samma typ av vinkelglitter som kännetecknar komplicerade radarmål. Två signaler kan försvaga varandra och samtidigt förvrida fasfronten, så att riktningen till målet börjar fluktuera.

Denna effekt utnyttjas i förfinad form i crosseye. Signalerna styrs så att ett skenmål skapas långt från plattformen av antennerna ombord på det fartyg eller flygplan som ska skyddas. Man slipper använda släpmål och andra typer av ”off board decoys”, som kan bli ytterst kostsamma.

Flygburna släpmål kastas ofta direkt efter begagnandet. Marina släpmål är dyra och kräver lång förberedelsestid. Crosseye är dyrt att installera men billigt till sin

användning. Systemet behöver bara kalibreras med jämna mellanrum, vilket kan ske mot egna fartyg. Driftkostanden är låg och stridsekonomin blir god.

Flera länder har undersökt crosseye-principen under de senaste decennierna. USA drev under många år ett crosseye-program, som avbröts i början av 1990-talet. Man satsade i stället på släpsmål, men det är symptomatiskt att beslutet togs just innan revolutionen i digitala komponenter gjorde det möjligt att förverkliga crosseye.

Representanter för andra länder har vid samtal redogjort för liknande erfarenheter. Främst talar man om praktiska problemen, som skapade ett intryck av att metoden var för komplicerad för att kunna förverkligas. Anledningen tycks främst ha varit användningen av analoga komponenter, som gör det svårt att spåra orsakerna till felen.

Ett svenskt bidrag vid AOC-konferensen i Zürich (Falk, 2000) klargjorde under vilka förutsättningar crosseye-principen kan fungera. Föredraget framkallade starka rektioner hos de länder som tidigare sysslat med crosseye. Många representanter förklarade att metoden visserligen är intressant men omöjlig att få att fungera i praktiken.

Anledningen ansågs vara svårigheter med att få balans i amplitud och fas. Dessutom nämndes vibrationer hos antenner placerade ute i vingspetsarna på ett flygplan och vågutbredningseffekter.

I detta läge reste sig Filippo Neri vid italienska Elettronica upp och påpekade att italienarna redan skapat ett fungerande crosseye-system! Elettronica har tillverkat två crosseye-system avsedda för marinen och för den italienska versionen av EFA (Eurofighter). Till den följande AOC-konferens i Las Vegas hösten 2000 inbjöds två svenska och italienska föredrag om crosseye vid försvar av fartyg (Falk, 2000; Neri, 2000). Elettronica visade vid detta tillfälle filmer från prov utförda av den italienska marinen och flyget, där en robotmålsökare hakades av.

5.2 Tiden efter 1990

Orsaken till förändringen var att modern signalbehandling och snabba datorer radikalt ändrat förutsättningarna för crosseye. Tidigare svårigheter berodde på bristfällig teori och användningen av analoga komponenter med otillräcklig precision. Digitala radiofrekventa minnen (DRFM) ger bättre noggrannhet och kan styras i detalj.

De beräkningar som utförts av Elettronica visar att man måste välja det område där crosseye-störning ska sättas in noggrannare än äldre litteratur antyder. Fas och amplitud måste väljas så att skenmålet blir optimalt. Detta är ett nytt synsätt jämfört med äldre krav på att ett system ska fungera autonomt utan hänsyn till de uppgifter som kan komma om robothotet från andra plattformar.

Tidigare forskare studerade den tekniska utformningen av crosseye-system och försummade den taktiska aspekten. Dessa frågor har aldrig utretts i detalj och litteraturen innehåller mest skisser till tänkbara system (Van Brunt 1995). Erfarenheten visar att de flesta inte fungerar särskilt väl i praktiken, fast anledningen länge var oklar. Det vållade misstro mot crosseye med tanke på ett felaktigt system förmodligen lockar roboten till sig. Crosseye-antennerna repeterar målsökarens signal och det innebär att en radarsökande robot går rakt mot målet, om systemet inte lyckas skapa ett lämpligt vinkelfel.

En huvudfråga är hur man ska åstadkomma ett system som genererar rätt vinkelfel i alla lägen. Det var särskilt oklart hur radarvågornas spridning påverkar crosseye med tanke på hur små fel i fas som krävs för att locka målsökaren mot antennerna. De omständigheter under vilka crosseye fungerar studeras systematiskt för första gången i denna rapport.

Elettronica löste denna uppgift genom simuleringar som visar att metoden fungerar i många fall besvärliga fall, t ex spegling i vatten. På svensk sida utnyttjades i stället allmänna principer rörande strålgångens omvändbarhet. De garanterar att systemet ger åsyftad verkan under skiftande förutsättningar.

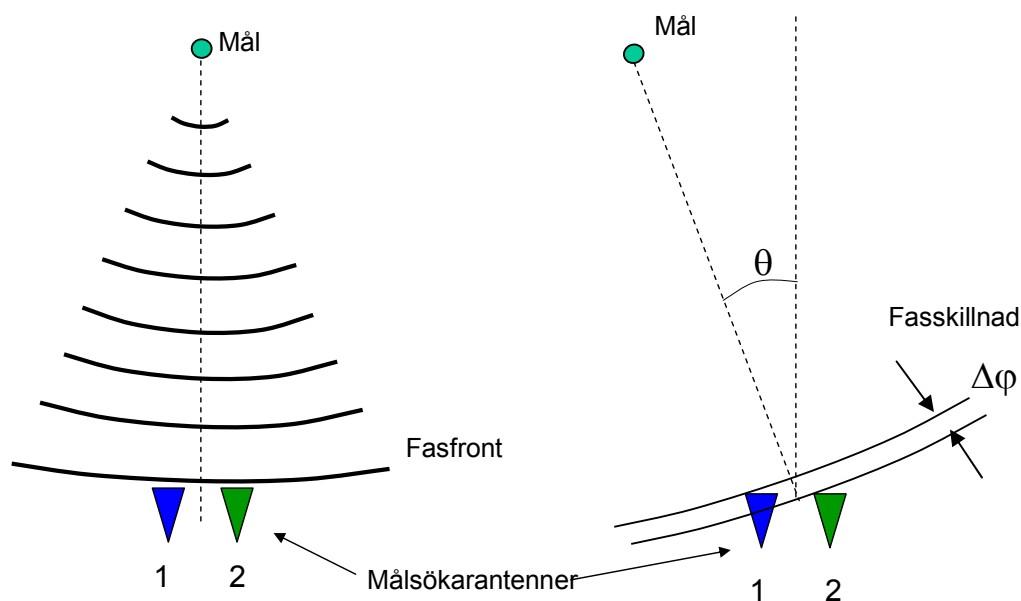
De svenska försöken med crosseye sammanfattades vid AOC-konferensen i Stockholm 2002 (Falk 2002). Kvantitativa bedömanden gavs vid AOC-konferensen i Rom 2004, där de praktiska förutsättningarna för att använda crosseye till sjöss beskrevs (Falk, 2004). Motsvarande slutsatser redovisas i utvidgad form i denna rapport.

6. Radarmålsökare

Målsökande robotar använder främst radar eller IR för att lokalisera sina mål. IR används på korta avstånd, medan radarvågor med sin räckvidd i all slags väderlek lämpar sig för att bekämpa fartyg och flygplan på stora avstånd, i synnerhet när roboten uppträder autonomt

Erfarenheterna från Falklandkriget visar hur svårt det är att värja sig mot ett robotanfall till havs. Av fem Exocet-robotar som avsköts från argentinska Super Etendard-plan träffade två brittiska fartyg, i båda fallen med förödande verkan. Robotarna upptäcktes tidigt genom signalspaning och observerades visuellt under slutsträckan men det fanns ingen möjlighet att bekämpa dem. Remsor hade blandad effekt och tycks bland annat ha dragit en robot mot ett fartyg som skulle skyddas, *Atlantic Conveyor*.

Robotens målsökare använder monopulsprincipen för att lokalisera sina mål. Det innebär att roboten har två mottagarantennor som jämför sina radarsignaler. Fassettnaden ger information om riktningen till målet (Figur 3). En sådan konstruktion är nödvändig, eftersom antennens vinkelupplösning är otillräcklig för att mäta in mål med nödvändig noggrannhet.



Figur 3. Principen för monopulsmätning: ett mål beläget rakt fram ger signaler med samma fas i mottagarna, medan ett mål beläget snett framför målsökaren ger en fasskillnad proportionell mot vinkeln.

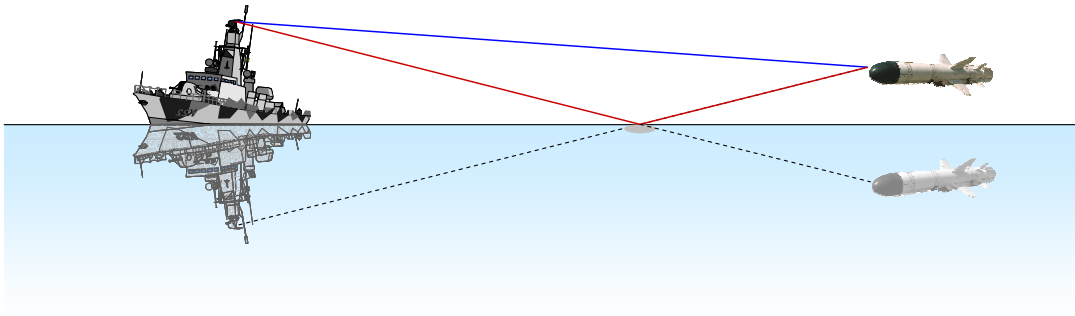
Målsökarens antennstorlek begränsas av robotens diameter. Samma problem förekommer i flygplan och i båda fallen får man nöja sig med en lob som är flera grader bred. Inriktningen måste ske bättre än så och roboten har därför en monopulsantenn som lokaliserar målet inom en tiondel av en lobbredd eller bättre.

Mätningen är möjlig om signalen är tillräckligt stark jämfört med bruset och målsökaren bara har ett mål i loben. Monopulssystemet kan i princip inte lösa upp flera mål, t ex en grupp flygplan i tät formation. Roboten kan inte heller lösa upp antennerna i ett crosseye-system ombord på ett fartyg och det är denna begränsning som utnyttjas i crosseye. Svagheten hänger samman med att robotens antenn begränsas av diametern, ett förhållande som knappast kan påverkas inom överskådlig tid.

Monopulsmottagaren mäter fasskillnaden mellan två signaler och omsätter den i en vinkel till målet. Om signalerna ligger i fas är målet beläget rakt fram, medan en fasskillnad svarar mot en bestämd vinkel som beror på avståndet mellan antennerna och våglängden (Figur 3).

Monopulssystem kan utformas på många olika sätt men grundprincipen är alltid densamma. Visserligen skiljer man på amplitudmonopuls och fasmonopuls, men båda systemet mäter fasen. Skillnaden ligger bara i den princip som används för att utföra mätningen. För tydlighets skull illustreras förloppet i figurerna med fasmonopuls.

Monopulsprincipens svaghet att bara klara av ett mål är väl omskrivet i litteraturen (Sherman 1984). Särskilt välkänt är det fall då en radar används nära vattenytan. Om en robot anfaller ett fartyg kommer båda parter att lida av problemet som framgår av figuren. Robotens radarmålsökare och eldledningsradar ombord på fartyget kommer båda att se mål och spegelbild. Om de är lika starka och båda hamnar inom loben ger de upphov till ett fluktuerande mål som systemet måste kunna hantera (Sherman 1984).



Figur 4. Speglingsproblemet drabbar både en robot och eldledningsradarn på det fartyg den anfaller.

Tolkningen av ett fluktuerande mål är alltid modellberoende. I princip kan man lösa upp flera mål inom en antennlob, men det kräver god kunskap om målet och lågt brus, en situation som sällan föreligger. Ett crosseye-systemet utnyttjar denna omständighet genom att låta två antenner repetera radarns signal. Det åstadkommer en signal som monopulsmottagaren kommer att tolka som att den kommer från ett mål något förskjutet åt sidan (Figur 2). Storleken av denna förskjutning kan härledas på ett åskådligt sätt som visas i nästa avsnitt.

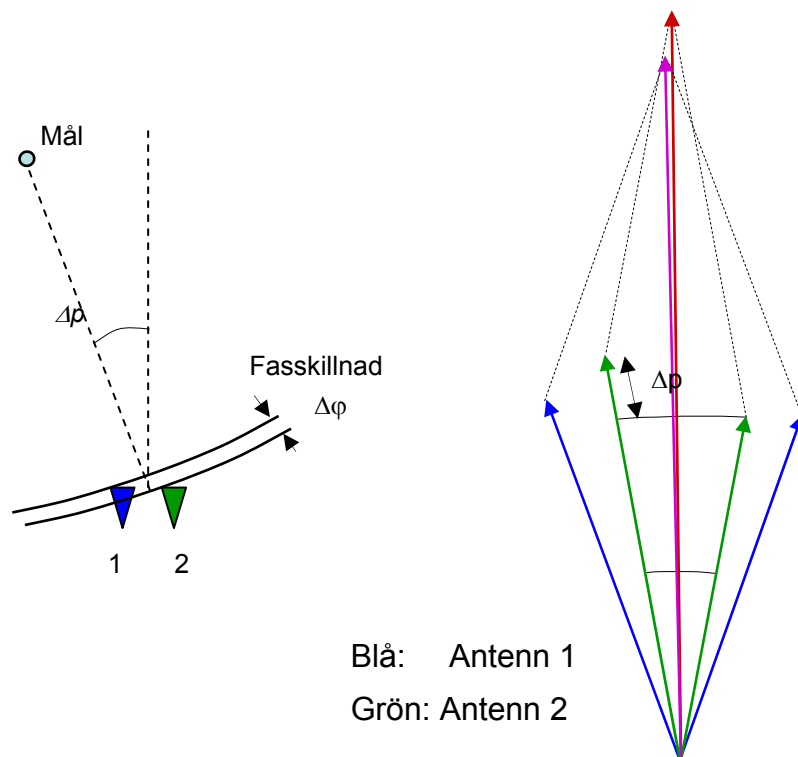
7. Geometrisk härledning

En monopulsmålsökare är synnerligen effektiv vid följning av ett mål. Det lönar sig inte att störa med brus från antenner ombord i någon större omfattning, eftersom målsökaren slår om till HOJ-mod (Home On Jam) och fortsätter följa plattformen. Denna förmåga att följa ett mål utnyttjar crosseye-systemet genom att åstadkomma ett skenmål som monopulssystemet tvingas acceptera.

Målet bildas av två signaler som ligger ur fas. Då uppstår en felpekning som kan beräknas med formler för vinkelglitter hämtade från teorin för monopulsradar (Sherman 1984), men det är mer instruktivt att härleda formlerna med en geometrisk betraktelse. Det underlättar tolkningen av crosseye-principen som bygger på skillnaden mellan signaler i och ur fas.

7.1 Signaler i fas

Ett crosseye-system består av två antenner förskjutna horisontellt i förhållande till varandra. Båda antennerna repeterar den infallande radarsignalen. Om signalerna ligger i fas dras målsökare mot tyngdpunkten mellan antennerna och målsökaren riktas mot målet.

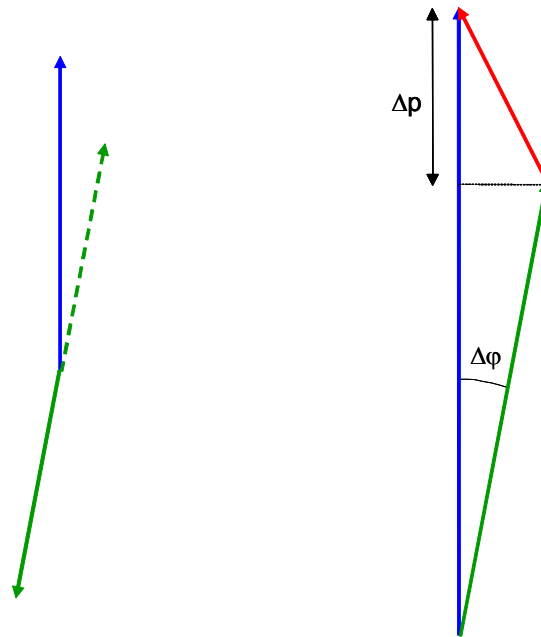


Figur 5. Två sändare nästan i fas ger tillsammans i en monopulsmålsökare ett mål med tydlig riktning nära antennsystemets tyngdpunkt. Pilarnas längd motsvarar signalernas amplitud (som är tämligen lika) och pilarnas riktning anger fasläget.

Signalerna kan enklast beskrivas med ett cirkeldiagram, där pilens längd motsvarar dess amplitud och riktningen dess fas. Om båda signalerna är i fas mäter monopolssystemet en obetydlig skillnad i fas mellan sina båda antenner. Summasignalen tolkas då som att målet ligger rakt fram. Figuren visar att målsökaren kommer att låsa på ett läge mellan crosseye-antennerna, d v s nära tyngdpunkten.

7.2 Signaler ur fas

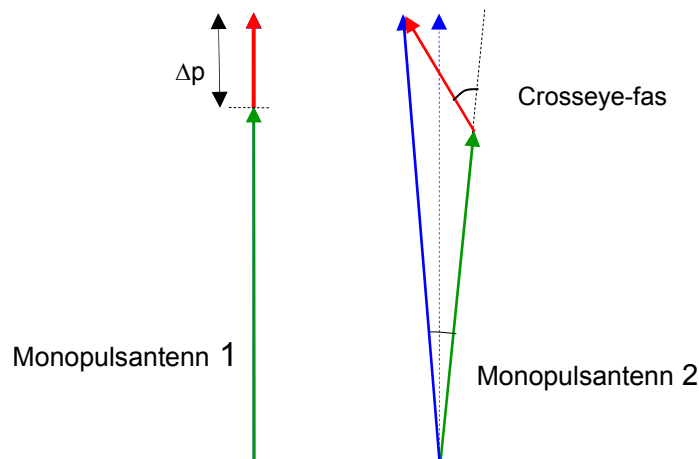
Om de båda signalerna är ur fas uppstår en situation typisk för crosseye (se Figur 6). Komponenterna tar nästan helt ut varandra. Summasignalen ges av skillnaden mellan två pilar som pekar nästan i samma riktning och den totala signalen blir svag.



Figur 6. Crosseye-fallet: Två ungefär lika stora komponenter nästan i motfas. Summasignalen (röd i figuren) har liten amplitud och en fas som starkt beror på skillnaden i amplitud (Δp) och fas ($\Delta \varphi$).

Å andra sidan varierar pilens riktning (signalens fas) snabbt och denna effekt påverkar målsökaren. Resultatet beror på hur nära pilarna ligger varandra (fasskillnaden $\Delta \varphi$) och hur lika deras längd är (amplitudskillnaden Δp).

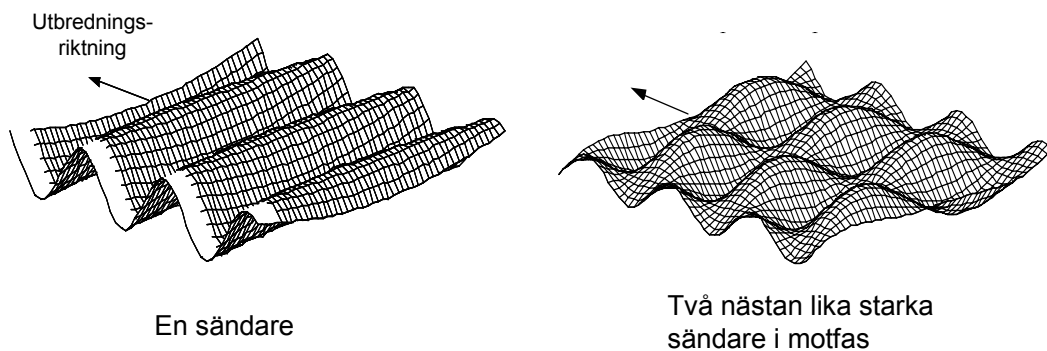
Dessa förhållanden är enklast att studera geometriskt. Om den ena antennen i monopolsmottagaren ser två komponenter i motfas blir pilarna parallella som i Figur 7. Den andra mottagarantennen ser en liten fasskillnad som beror på att den ligger något närmare den ena crosseye-antennen och längre ifrån den andra.



Figur 7. Monopulsmålsökarens mätning av den fasskillnad som skapas av ett crosseye-system, om signalerna till monopulsantenn 1 antas ligga exakt i motfas

Denna effekt är liten men fullt mätbar. Den motsvarar en monopulsmätning, och när summapilen vrider sig snabbare än de enskilda komponenterna tolkar målsökare resultat som att signalen kommer från ett svagt mål beläget längre ut. Fasen ändrar sig nämligen snabbt mellan de båda monopulsmottagarna och det tolkas som att signalen kommer in snett.

Detta är meningen med termen fasfrontsdistorsion som beror på att de båda crosseye-antennerna lokalt skapar en signal med sned fasfront och minskad amplitud. Figur 8 visar ett sådant fält. Roboten måste ligga inom det område där crosseye-signalerna tar ut varandra och förvrider fasfronten. Det förutsätter att signalerna är i motfas just i detta område.

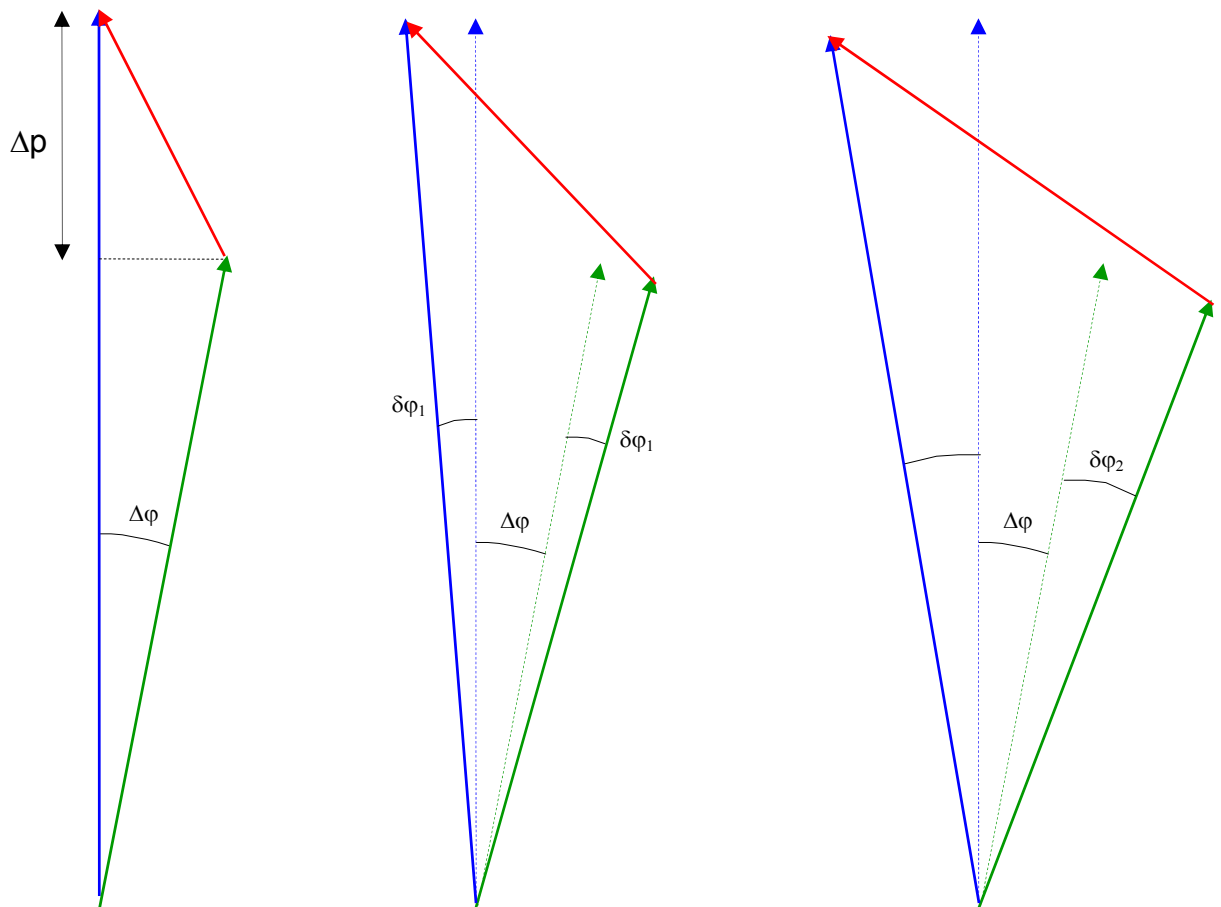


Figur 8. Fas och amplitud för vågor bildade av en sändare respektive ett crosseye-system. Figur av Per Hyberg, se Referens [13].

7.3 Missavstånd

Det skenmål som skapas genom fasfrontsdistorsion uppträder i alla avseenden som ett vanligt monopulsmål. Målsökaren har ingen möjlighet att upptäcka vad som sker. Om avståndet mellan antennerna i mottagaren ökar, så ökar också fasskillnaden (se Figur 9).

Figur 9 visar att fasskillnaden mellan monopulsantennerna inte får bli för stor. Då växer nämligen inte fasan linjärt som funktion av avståndet, vilket den måste göra för ett riktigt mål. Det är värt att notera att fasfrontsdistorsion återkommer när fasskillnaden gått ett varv. Det skulle alltså i princip vara möjligt att successivt dra en robot alltmer åt sidan men för att beräkna den effekten måste man också ta hänsyn till andra parametrar som lobernas bredd, robotens avstånd till målet, osv.



Figur 9. Fasskillnaden som skapas av crosseye-systemet ökar proportionellt mot avståndet mellan monopulsantennerna så länge vinklarna är små.

En enkel uppskattning visar att målsökaren kan skilja crosseye-antennerna åt först när den befinner sig några hundra meter från plattformen. Våglängden är några centimeter och antenndiametern kan inte gärna vara större än 1 meter. Även med optimistiska värden finner man att lobbredden för en radarmålsökare blir flera grader. Siffrorna liknar de värden som gäller för radarns upplösning i militära flygplan.

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{d} \approx \frac{0.02}{0.5} \approx 2^\circ$$

Resultatet innebär att två crosseye-antennor placerade 10-20 meter från varandra kan lösas upp först när roboten är på mindre än 200 meters avstånd. Då är det för sent att ändra riktning, och den taktiska användningen av crosseye beror alltså på denna effekt. Fasfrontsdistorsionen tolkas av målsökaren som ett mål i fel riktning som ger robotens missavstånd. Så länge faserna är små vrider sig summapilen proportionellt mot avståndet mellan antennerna i målsökaren (Figur 7). Summapilen vrider sig allt fortare när dess amplitud minskar. Denna effekt tolkar monopolssystemet som att målet ligger längre ut från antensystemets mittpunkt. För att beräkna förflyttningen kan man lägga märke till att förskjutningen i läge motsvarar en fasförskjutning mellan de båda monopulssystemen.

Vinkeln mellan två komponenter (långa pilar) till höger i Figur 7 motsvarar en monopulsmätning av avståndet (D) mellan de båda antennerna i crosseye-systemet. Så länge vinklarna är små tolkar monopolssystemet summasignalens vridning som ett mål beläget motsvarande längre ut från centrumlinjen. Eftersom summapilen vrider sig ungefär $1/\Delta p$ snabbare än de enskilda komponenterna kommer det maximala missavståndet för två signaler i motfas att ges av formeln,

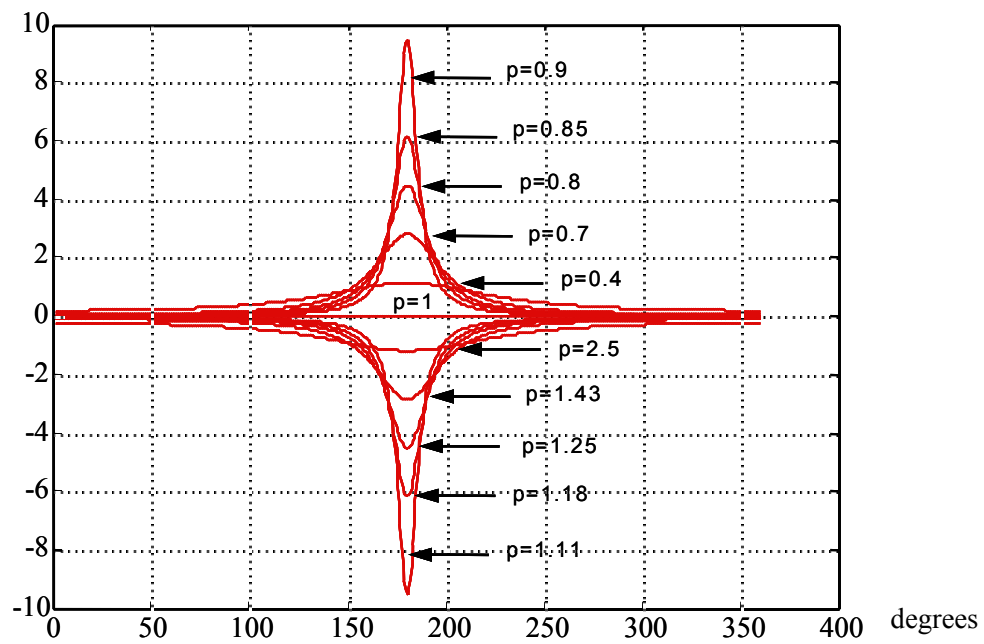
$$X = \frac{D}{\Delta p}$$

Detta intressanta resultat visar att crosseye-antennerna åstadkommer ett skenmål som ligger ett antal baslängder D utanför antennerna. Det är alltså inte en konstant vilseledning i vinkel utan missavståndet är oberoende av avståndet till radarn.

Detta fundamentala resultat innebär att felppekningen alltid är liten uttryckt i vinkel. Verkan på målsökaren är svår att upptäcka innan roboten kommit så nära att man kan se om roboten böjer av mot ett mål utanför plattformen. Det är inte lönt att vilseleda på alltför stora avstånd. Man bör nöja sig med att skapa ett trovärdigt skenmål och sedan på rätt avstånd börja dra i vinkel.

Uttrycket för missavståndet X överensstämmer med den formel Sherman och andra anger för vinkelglitter. Den fullständiga formeln innefattar skillnaden i fas och amplitud och kan också härledas ur en geometrisk betraktelse, vilket kommer att visas i ett senare arbete. Uttrycket för maximal felppekning (X) som funktion av fasskillnad ($\Delta\phi$) och amplitudskillnad (Δp) mellan crosseye-komponenterna blir

$$X = D \cdot \cos\psi \cdot \frac{\Delta p}{\Delta p^2 + \Delta\phi^2}$$



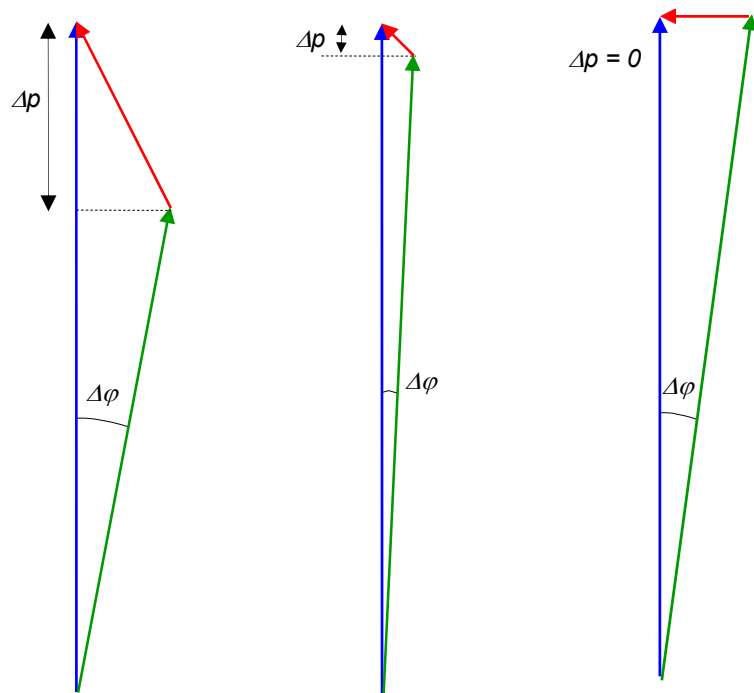
Figur 10. Missavståndet som funktion av amplitudskillnaden Δp och fasskillnaden $\Delta \varphi$ mellan signalerna från ett crosseye-system. Se [13].

Uttrycket $D \cdot \cos \psi$ tar hänsyn till att avståndet mellan antennerna kommer att projiceras i robotens anfallsriktning. Figur 8 visar hur vågfronten kommer att se ut för två sända-antennerna som sänder i fas respektive ur fas.

8. Parameterväl

8.1 Amplitud och fas

Den traditionella uppfattningen om crosseye har varit att fasskillnaden och amplitudskillnaden ska ha extrema värden så att till exempel amplituderna ligger mycket nära varandra. Den geometriska analysen visar att så inte är fallet. Om amplitudskillnaden blir alltför liten kommer målsökaren inte att mäta någon fasskillnad alls (se Figur 11).



Figur 11. Val av amplitud och fas hos crosseye-komponenter.

Skenmålet kommer då att hamna rakt fram i tyngdpunkten mellan antennerna. Däremot kan faserna ligga exakt i motfas, men det är inte nödvändigt för funktionen.

Villkoren på fas- och amplitudskillnader framgår bäst av figurerna och kan formuleras som följer:

1. Amplitudskillnaden måste vara större än fasskillnaden för att ge tillräcklig avböjning.
2. Amplitudskillnaden och fasskillnaden måste båda vara små för att ge en rimligt stor felpekning.
3. Amplitudskillnaden och fasskillnaden får inte vara så små att fluktuationer påverkar felpekningens storlek och riktning. Framför allt får skenmålet inte hoppa från sida till sida.

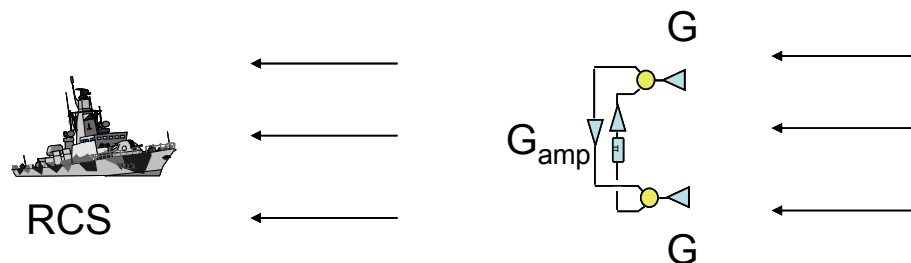
Det krävs noggrann planering för att uppfylla dessa krav i ett verkligt system. Elettronica har gjort en betydelsefull insats genom att visa att felppekningen inte behöver vara extrem för att skydda en plattform mot robotar. Det kan räcka med ett måttligt värde, t ex $\Delta p = 1/5$, för att ge ett tillräckligt missavstånd,

$$X = \frac{D}{\Delta p} = 5D$$

Detta avstånd kan räcka för att skydda ett fartyg beroende på hur långt ifrån varandra antennerna står. Fasen behöver inte vara bestämd med någon större precision utan det räcker att fasskillnaden (uttryckt i radianer) är minde än Δp i figuren. Kravet på fluktuationerna i amplitud och fas blir därmed enklare att uppfylla.

8.2 Signalstyrka

En följd av föregående val är att signalen inte behöver göras alltför svag genom kompensation mellan två nästan lika stora komponenter. Tidigare beskrevs crosseye som ett system där två signaler ligger i motfas och tar ut varandra. I själva verket måste man göra ett val. Skenmålet tävlar med radarekot om uppmärksamhet och det finns ingen anledning att minska signalen i onödan.



Figur 12. Jämförelse mellan den effekt som återsänds av ett radarmål och ett crosseye-system.

För att uppskatta skenmålets styrka jämfört med radarekot från ett flygplan eller fartyg räknar man som följer (Figur 12). För ett givet inflöde av radarstrålning måste man jämföra den effekt som sänds tillbaka som radareko från en plattform med given radarmålyta (RCS) och vad crosseye-systemet åstadkommer.

Den radareffekt som reflekteras som radareko från plattformen blir

$$P_{out} = (Flux)_in \cdot RCS$$

Den effekt som sänds ut från crosseye-systemet bestäms av våglängden λ , de båda antennvinsterna G , förstärkningen G_{amp} , samt att amplituden reduceras med en faktor $\Delta p = p-l$, när två nästan lika stora komponenter interfererar destruktivt.

$$P_{out} = (Flux)_{in} \cdot G^2 \cdot G_{amp} \cdot \frac{(\Delta p)^2 \cdot \lambda^2}{4\pi}$$

Skenmålet bör vara 10- 30 gånger starkare än det verkliga målet för att locka roboten till sig. För realistiska plattformar finner man en rätt nedslående siffra,

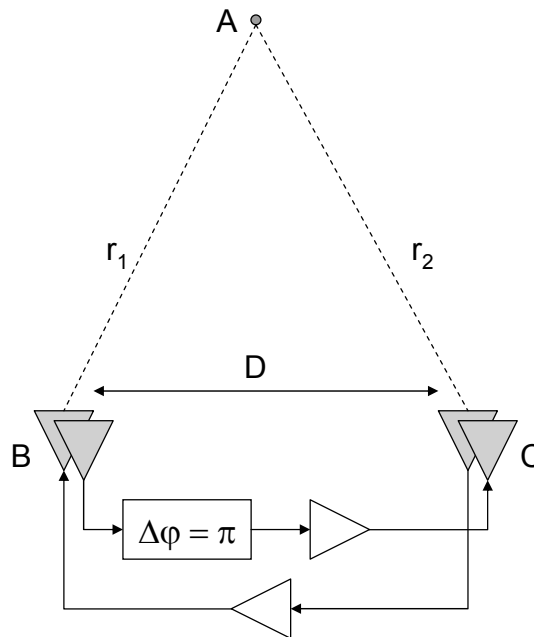
$$\frac{4\pi \cdot RCS}{\lambda^2} \approx 10^6$$

Resultatet visar att ett crosseye-system bör ha hög antennvinst, G , och relativt stor förstärkning, G_{amp} , för att lyckas avlänka roboten. Det är till god hjälp om man väljer den nödvändiga felppekningen så noga att amplitudfaktorn Δp inte blir alltför liten. Denna strategi har införts av Elettronica.

Tidigare valde man ofta att använda antenner med låg antennvinst, G , för att täcka en stor sektor. Detta måste kompenseras med en enorm förstärkning, G_{amp} , för att uppväga den lilla amplitudfaktorn, Δp . Följden blev orealistiska krav på förstärkarna och övriga komponenter.

9. Konstruktion av crosseye-system

FOI har ägnat stor uppmärksamhet åt frågan om hur vågutbredning påverkar crosseye-störning. Crosseye bygger på kompensation mellan två signaler och det får inte införas några fasändringar enbart i den ena signalen, t ex genom inverkan från omgivningen. I så fall kommer roboten dras mot plattformen.

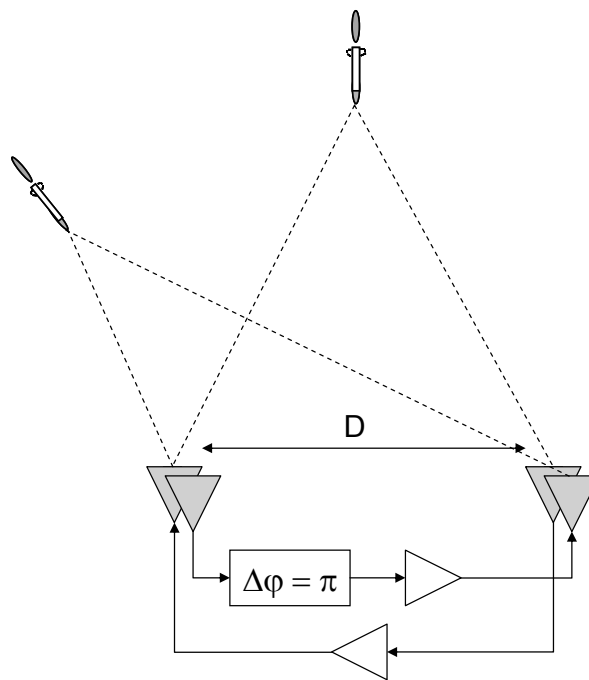


Figur 13. Principen för ett crosseye-system med analoga komponenter. Väglängden ABCA och ACBA skiljer sig halva våglängden som införs av en fasvridare.

Interferensen är ytterst känslig för faser hos signalerna. Crosseye-system med analoga komponenter är därför utformade så att strålarna ska ha lika långa vägar (se Figur 13). Denna geometriska effekt utnyttjar att en väg är lika lång åt båda hållen. Enligt lagen om strålgångens omvändbarhet blir då fasändringen lika, men det är inte uppenbart att samma resonemang gäller för radiovågor.

9.1 Analoga och digitala komponenter

Det enklaste sättet att garantera signalens omvändbarhet är att låta en våg röra sig längs en ledning. Det födde tanken att man kunde skapa ett crosseye-system genom att använda omvändbara (reciproka) komponenter som arrangeras som i Figur 13.

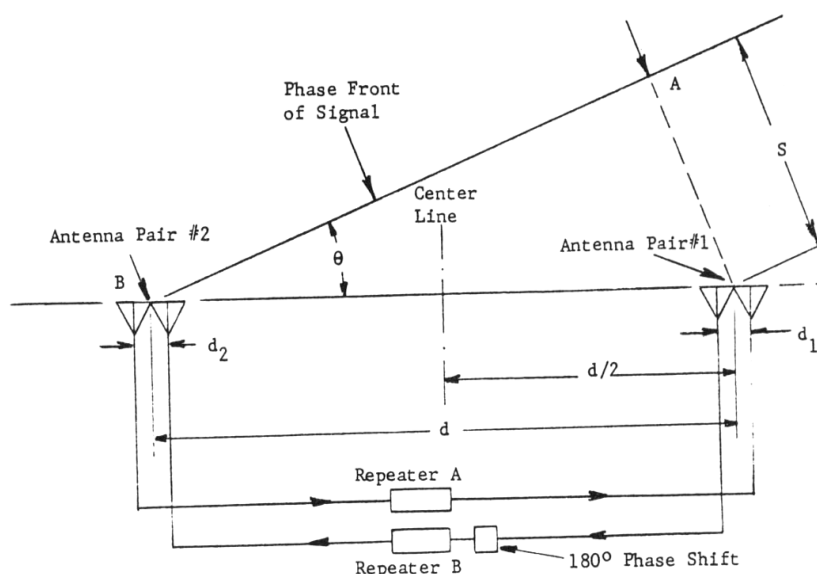


Figur 14. Ett crosseye-system kan möta ett anfall av flera robotar samtidigt.

Systemet kan möta robotar från godtycklig anfallsriktning genom att ta emot signalen i en antenn och sända ut den genom den andra (se Figur 14). Denna eleganta metod garanterar att fasskillnaden tas upp vid snett infall och kompenseras genom att den andra signalen löper samma väg men åt andra hållet (se Figur 15). Det är en rent geometrisk effekt, som garanterar att inga fasskillnader förs in, men problemet är att det kräver stor noggrannhet i fas – i själva verket några få grader enligt tidigare resonemang.

Ett crosseye-system byggt enligt denna princip med analoga komponenter kan klara flera robotar samtidigt, men det kräver att förstärkarna är tillräckligt bredbandiga och linjära. Crosseye-signaler genereras då mot båda robotarna. Ursprungligen tänkte man sig att ett sådant system borde ha breda antennlober som kan belysa alla inflygande robotar inom en vid sektor, men det innebär ett enormt slöseri med energi. Erfarenheten visar att förstärkare och cirkulatorer sällan klarar sådana krav.

Under årens lopp har det ritats upp åtskilliga fantasifulla förslag som försöker utnyttja den geometriska principen. En nödvändig förutsättning är att sändar- och mottagarantennerna är belägna i samma punkt eller åtminstone nära varandra för att inte införa några fasskillnader.



Figur 15. Ett ålderdomligt förslag till crosseye med analoga komponenter och skilda antennhorn för respektive slinga. Se referens [2.].

I praktiken fungerar knappast ett sådant arrangemang. Cirkulatorerna har inte den isolation som krävs för att hindra en signal från att gå ”baklänges” genom systemet. Vandringsvågrör (TWT) har visserligen stor förstärkning och är linjära över ett brett område, men förstärkningen måste vara lika stor åt båda hållen. Det ordnas antingen genom kalibrering eller genom att samma TWT omväxlande används för att förstärka båda signalerna. Båda möjligheterna har prövats men är besvärliga.

En modern konstruktion kräver säker funktion och korta förberedelser (ingen uppvärmning av rören). Det gör vandringsvågrör mindre attraktiva än tidigare, då deras höga förstärkning och linearitet var unika egenskaper. Det är bättre att använda digitala komponenter om man vill uppnå den stabilitet och precision som krävs av ett crosseye-system. Enklarest sker detta genom att man använder en mottagare för att registrera radarsignalen, som lagras i DRFM, varpå exakt definierade signaler matas till två sändarantennerna. Till detta kommer behovet att definiera riktningen till målet noga.

9.2 Reciprocitetssatsen

Det bästa sättet att utnyttja strålgångens omvändbarhet är för analys av crosseye-problemet. Motsvarigheten för vågor är reciprocitetssatsen. Med tanke på att radarmålsökare och crosseye-system måste fungera i skiftande väderlek och miljöer behövs det en allmän princip som garanterar deras funktion. Reciprocitetssatsen garanterar att crosseye fungerar även under komplicerade förhållanden (Falk 1999).

Man kan få en åskådlig förklaring till detta genom att betrakta system med analoga, reciproka komponenter av den typ som beskrevs ovan. Crosseye fungerar med sådana komponenter, eftersom de inte för in några fasskillnader mellan de båda signaler som ska kompensera varandra. Det kräver stora ansträngningar att konstruera sådana komponenter men naturen har redan löst problemet för elektromagnetiska vågor.

Så länge man har en rät stråle eller signaler begränsade till en ledning är utbredningen i princip alltid omvändbar, eftersom den är endimensionell. Nya problem uppstår vid vågutbredning i tre dimensioner. Radarsignalerna utbreder sig inte som strålar utan som vågor och sprider sig över ett brett område, där terrängen kan påverka signalen. Det gäller särskilt om vågen utbreder sig över en vattenyta, där vattenvågor och skum kan påverka utbredningen.

Effekten av crosseye beror på om de två signalerna alltid tillförs samma fasskillnad. Annars skulle störningen misslyckas och förmodligen dra roboten till målet. Med hänsyn till dessa risker har funktionen hos crosseye-störning analyserats noga (Falk 1999, 2002).

I stället för strålgångens omvändbarhet bör man använda reciprocitetssatsen för elektromagnetiska vågor som utgångspunkt (Falk 2001). Den garanterar att signaler som sänds ut och tas emot av två antenner alltid blir desamma om matningen kastas om. Det innebär att vågutbredning mellan två punkter åstadkommer samma fasskillnad och amplitudskillnad oavsett vågens riktning. Under denna förutsättning kan man garantera att ett crosseye-system fungerar i en komplicerad miljö så länge systemet självt är reciprokt.

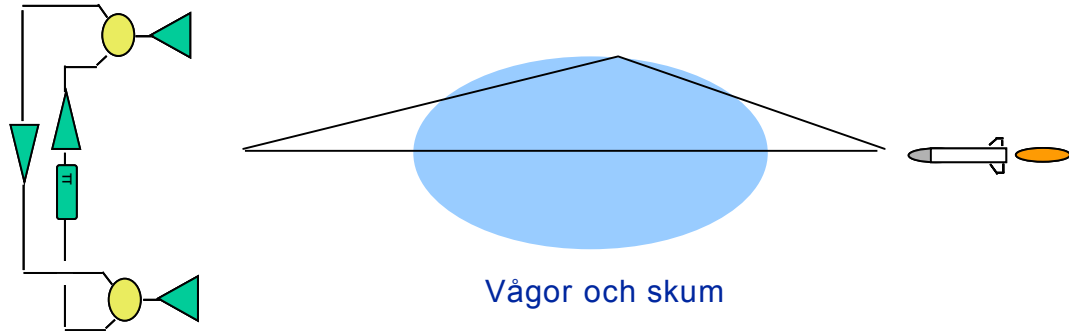
Villkoren för att reciprocitetssatsen ska gälla är besvärliga att formulera exakt, eftersom den sällan används i så svåra problem. Den vanliga användningen av reciprocitetssatsen är i antennproblem där satsen knyter samman olika lösningar. Följande villkor gäller om reciprocitetssatsen ska vara tillämplig (Falk 1999).

1. Ekvationerna för elektromagnetiska vågor är linjära och invarianta under tidens omvändning;
2. Mediet är linjärt (superpositionsprincipen gäller);
3. Energiförluster i mediet är linjära funktioner av fältet;
4. Läget är stationärt under vågutbredningen.

Det sista villkoret gör att crosseye inte kan användas mot torpeder. Ljudvågornas utbredning är för långsam för att läget ska vara oförändrat under utbredning fram och tillbaka till torpedens målsökare. Radarvågor är en miljon gånger snabbare och en enkel uppskattning visar att inga ändringar i mediet påverkar vågutbredningen (Falk 1999).

10. Inverkan av spridning

Ett av de svåraste problemen med crosseye är att analysera inverkan av spridning på robotförsvaret. Spridning av radarvågor kan ske på många olika sätt men i inget fall får crosseye-systemet sättas ur spel. Till havs sker spridning av radarsignalen från vattenvågor och skum eftersom en sjörobot vanligen anfaller på låg höjd (Figur 16).



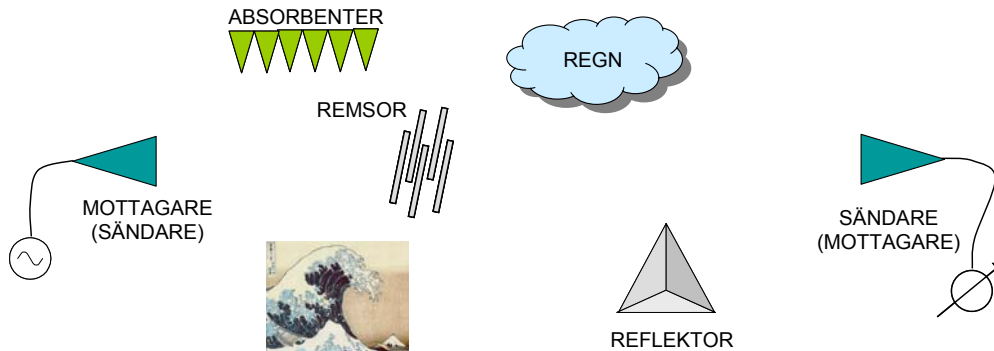
Figur 16. Spridning av radarvågor mot vattenvågor och skum kan påverka funktionen av ett crosseye-system.

För att analysera inverkan av spridning krävs en allmän princip som är oberoende av den specifika modellen för spridning av radarvågor. En sådan princip är reciprocitets-satsen som beskrevs i föregående avsnitt. Frågan i detta fall är om utbredning över en vattenvåg alltid ger upphov till samma fasskillnad om radarvågen möter den framifrån som bakifrån. Det verkar till synes orimligt att en osymmetrisk spridare som en brytande vattenvåg (Figur 17) skulle kunna införa samma fas- och amplitudskillnad vid utbredning i två motsatta riktningar, men i själva verket garanteras detta av reciprocitetssatsen, som i sin tur garanterar funktionen av crosseye.



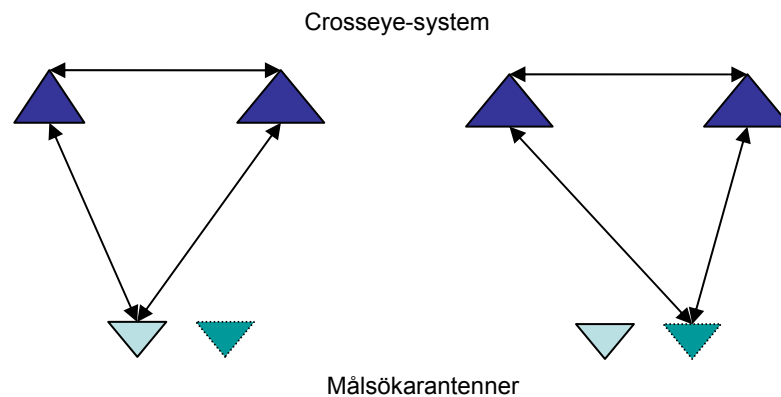
Figur 17. Reciprocitet: Kan fas och amplitud förändras på samma sätt när en radarvåg möter denna vattenvåg framifrån respektive bakifrån?

Reciprocitetssatsens innebörd illustreras i Figur 18. Om matningen till sändaren och mottagaren kastas om blir den mottagna signalen exakt densamma trots närvaron av spridare och absorbenter. Denna princip uttrycker strålgångens omvändbarhet för alla typer av vågor (Falk 1999). Dess användning på crosseye visas i nästa figur.



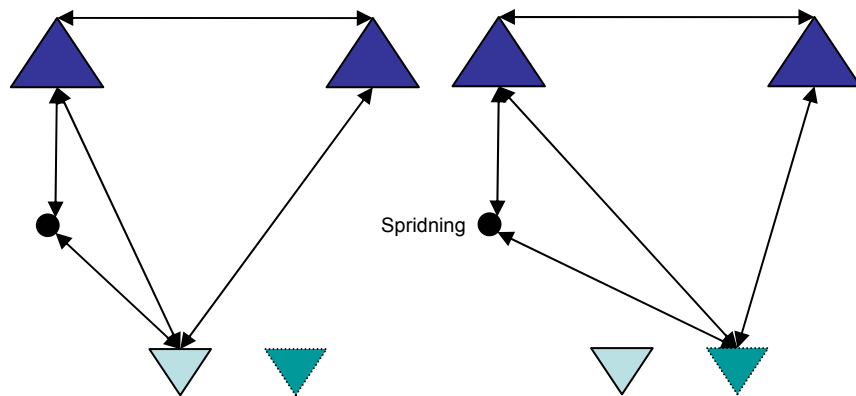
Figur 18. Reciprocitetssatsen: Om matningen till sändaren och mottagaren kastas om blir den mottagna signalen densamma trots närvaron av spridare och absorbenter.

För att kunna tillämpa reciprocitetssatsen definierar vi en målsökare där gångvägarna blir lika långa. Ett sådant "idealiskt monopolssystem" kan enkelt skapas genom lobväxling, om man till skillnad från de flesta befintliga system bara sänder från den antenn som sedan används som mottagare (Figur 19). Funktionen av ett sådant "idealiskt monopolssystem" skiljer sig inte i praktiken från andra typer, men det illustrerar tydligt principen för crosseye.



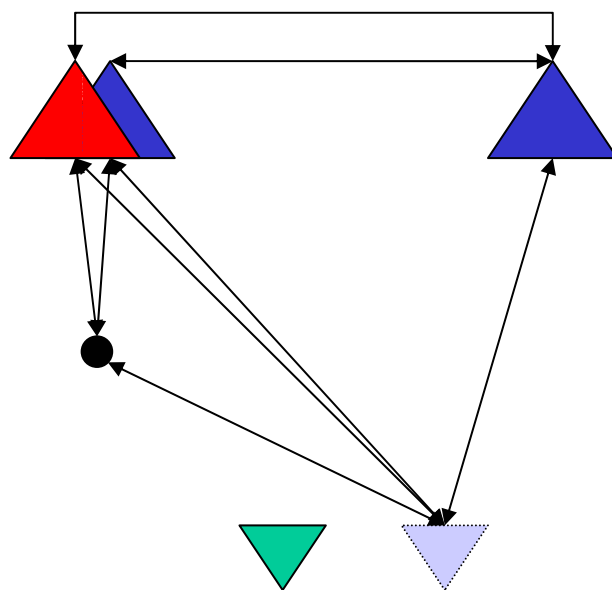
Figur 19. Ett idealiskt monopolssystem för analys av crosseye-principen: Genom lobväxling garanteras att utbredningsvägarna åt båda hållen är lika långa under mätningen.

Om en spridare påverkar radarvågans utbredning behöver detta inte påverka crosseye-systemets funktion, eftersom alla fasskillnader blir lika stora åt båda hållen i ett idealt reciprokt crosseye-system (Figur 20). Mellan målsökaren och crosseye-systemet garanteras denna omvändbarhet av reciprociteten.



Figur 20. Vid spridning utanför strålbanan garanterar reciprocitetssatsen att gångvägarna för radarvågor fortfarande är lika åt båda hållen för ett idealiskt monopulssystem och ett idealiskt reciprokt crosseye-system.

Detta villkor ger oss också möjlighet att analysera under vilka förhållanden crosseye fungerar och vilka begränsningar som bestämmer hur det skall konstrueras, i synnerhet valet av komponenter. Dessa frågor kommer att behandlas utförligare i ett senare arbete, men Figur 21 illustrerar hur analysen kan gå till.



Figur 21. Ett något icke-reciprokt crosseye-system påverkas av spridning utanför strålbanorna genom att motsatta vägar blir olika långa. I figuren illustreras detta genom att fascentrum för en antenn förskjuts något mellan sändning och mottagning.

Alla verkliga system och komponenter innehåller någon form av icke-reciprocitet. I Figur 21 illustreras detta i de fall fascentrum hos en antenn förskjuts mellan sändning och mottagning. Detta är bara ett exempel på icke-reciprocitet hos antenner, eftersom fascentrum i sig själv är en idealiserad kvantitet, men i detta fall bestämmer funktionen

hos ett crosseye-system utsatt för spridning. Som visas i Figur 21 kommer spridning från områden utanför strålbanan, till exempel en speglade vågyta att ge ett bidrag till fältet som inte är reciprokt i mottagaren. Det är lätt att ur geometrin uppskatta de lägen som gör fasskillnaden så stor att det påverkar funktionen. En annan fråga är hur stort bidraget måste vara för att påverka skenmålet. Detta beror i hög grad på hur nära de utsända signalerna är varandra i amplitud. Mycket talar för den lösning som valts av Elettronica, att nöja sig med en måttlig compensation mellan signalerna. Annars kan nämligen spridda signaler av den typ som visas i Figur 21 påverka den signal som mottas i målsökaren.

11. Slutsatser

Störning med crosseye-system kan baseras på allmänna principer även vid spridning från en komplicerad miljö, till exempel havsytan. En förutsättning är att crosseye-systemet är mycket nära reciprokt. Hur noga komponenterna måste väljas beror på typen av spridning och kan analyseras på det sätt som visas i denna rapport.

Det visar sig att många praktiska överväganden är viktiga för funktionen, bland annat

- måttligt avstånd mellan antennerna
- användning av digitala komponenter
- användning av elektriskt styrda gruppantennor

12. Erkännande

Ett hjärtligt tack till Anders Eneroth som bistått mig vid alla stadier av författandet av denna rapport. Vi vill gemensamt tacka Per Hyberg för hans inspirerande pionjärbete samt Conny Johansson, Claes Arvidsson och Sven Berglund för hjälp med det experimentella arbetet.

Utbyte av erfarenheter med Elettronica har varit till ovärderlig hjälp. Vi vill framför allt tacka Alfredo Bacchelli, Filippo Neri, Vittorio Rossi och Andrea Di Martino för deras sakkunniga bedömning av många frågor.

13. Referenser

- [1.] Alfredo Bacchelli: The contribution of cross-eye technique to the self-protection of tactical aircraft and helos (AOC Conference, Washington, 2001).
- [2.] LeRoy B. Van Brunt: Applied ECM (EW Engineering 1995).
- [3.] Anders Eneroth, Lars Falk, Claes Arvidsson, Conny Johansson: "Vinkelvilseledning mot monopulsradar, Lägesrapport", FOI rapport FOI-RH—0148 (november 2002).
- [4.] Anders Eneroth och Lars Falk: "Vinkelvilseledande störformer mot monopulsradar". FOI-RH--0212--SE (juni 2003).

- [5.] Lars Falk: Reciprocity in wave propagation. Invited paper. RadioVetenskap och Kommunikation 99. pp. 126 – 130, RVK-99, Karlskrona, Sweden, 14 – 16 June 1999. (FOA Reprints, FOA-B--00-00617-170--SE, December 2000).
- [6.] Lars Falk: Cross-eye jamming and the principle of reciprocity. 3rd International AOC Conference, Zürich, May 2000 (FOA Reprints, FOA-B--00-00616-170--SE, December 2000).
- [7.] Lars Falk: Physical basis for credibility of cross-eye for ship defense (AOC Conference, Las Vegas, 2000).
- [8.] Lars Falk.: "När tiden går baklänges", Annales Academiae regiae scientiarum Upsaliensis (Kungliga Vetenskapssamhällets i Uppsala årsbok 1999-2000) pp. 9-35 (2001). (FOI-S--0214-SE December 2001).
- [9.] Lars Falk: Cross-eye jamming (AOC Conference, Stockholm, May 2002).
- [10.] Lars Falk: "Reciprocity and Cross-Eye Jamming", Conference on Mathematical Modelling of Wave Phenomena, Växjö, 3 – 8 November 2002.
- [11.] Lars Falk: Cross-eye jamming in Complicated Environments (AOC Conference, Rome, May 2004).
- [12.] Lars Falk och Anders Eneroth: Redogörelse för besök på Virtualab och Elettronica S. p. A Rom 2002-04-04—08. FOI memo nr 02-1600 (juni 2002).
- [13.] Per Hyberg: Kompendium i Radarmotmedelsteknik FOA Rapport A 10052-1.1, december 1993.
- [14.] Filippo Neri: Introduction to Electronic Defense Systems (Artech House 1991).
- [15.] Filippo Neri: Experimental testing on cross-eye jamming (AOC Conference, Las Vegas, 2000).
- [16.] Filippo Neri: Cross-Eye and other Angle Jamming Techniques (EW Course, AOC 2003).
- [17.] Samuel M. Sherman: Monopulse Principles and Techniques (Artech House 1984).