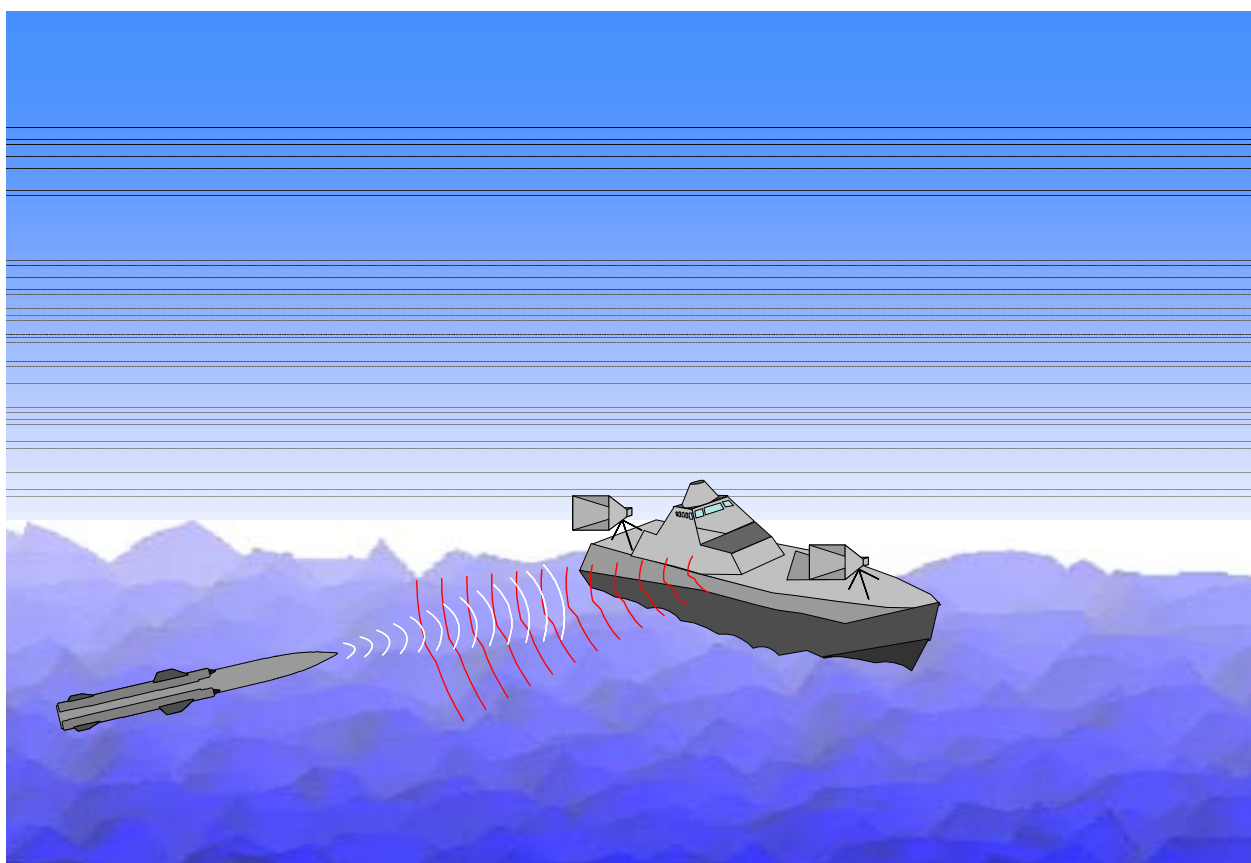


Beräkningar för vinkelstörning av robotar

Lars Falk



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Försvarsanalys
164 90 Stockholm

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

Beräkningar för vinkelstörning av robotar

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Försvarsanalys 164 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1653--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år November 2005	Projektnummer E 7019
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Lars Falk	Projektledare Sven Berglund	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Beräkningar för vinkelstörning av robotar		
Sammanfattning Crosseye-störning är en metod för att på elektronisk väg leda en robot förbi sitt mål. Två antenner ombord på ett fartyg eller flygplan skapar ett skenmål som leder radarmålsökaren vid sidan om målet. Skenmålet uppstår genom att två nästan lika starka kopior av den använda radarsignalen sänds tillbaka i motfas. Metoden är känsligt för små fel i amplitud och fas och kan därför påverkas av spridning från omgivande terräng, i synnerhet reflexer från vattenytor. Inom projektet har tidigare visats att inverkan av spridning kan elimineras om crosseye-systemet i alla delar är reciprokt. I denna rapport analyseras i kvantitativa termer hur noga dessa villkor måste vara uppfyllt för att crosseye störning ska fungera. Valet av konstruktion analyseras med tanke på att de valda parametrarna bör ge den minsta avböjning som är tillräcklig för att skydda plattformen. Denna konstruktion jämförs i sin tur med förslag som tidigare redovisas i litteraturen. Inverkan av spridning kan uppskattas genom att tillämpa reciprocitets-principen på en idealiserad monopulsantenn i en målsökare riktad mot ett crosseye-system. Det visar sig möjligt att konstruera ett crosseye-system som enbart utnyttjar halvledarförstärkare och antenner med måttlig antennvinst.		
Nyckelord Störning, robot, crosseye, målsökare, monopuls		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 38 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Försvarsanalys 164 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1653--SE	Report type User report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year November 2005	Project no. E 7019
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Lars Falk	Project manager Sven Berglund	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Calculations concerning angular jamming of missiles		
Abstract Crosseye jamming is a method intended to deflect a missile sufficiently to make it miss its target. Two antennas located on board a ship or aircraft create a false target located outside the real target. The false target is created by two copies of the radar signal which are re-emitted out of phase with slightly different amplitude. The method is sensitive to small errors in amplitude and phase and may be affected by scattering from the surrounding terrain, in particular reflections from water. It has previously been shown within the projekt that the effect of scattering can be eliminated if the crosseye system is reciprocal. This report provides a quantitative analysis of the conditions required to make crosseye jamming work in practice. The construction is analysed to select parameters that will give a deflection sufficient to protect a platform. The selected construction is compared with proposals previously described in the literature. The effect of scattering can be estimated by applying the principle of reciprocity to an ideal monopulse antenna employed in a target seeker directed towards a crosseye system. The calculated parameters prove that it is possible to construct a crosseye system using solid state amplifiers and antennas with limited gain.		
Keywords Jamming, missile, cross eye, target seeker, monopulse radar		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 38 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1.	INLEDNING.....	6
2.	RADARSÖKANDE ROBOTAR.....	6
2.1	FALKLANDSKRIGET	6
2.2	SKYDD MOT RADARSÖKANDE ROBOTAR.....	8
3.	SYFTE.....	9
4.	METOD.....	9
5.	RESULTAT	9
6.	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	10
7.	CROSSEYE-PRINCIPEN	11
8.	SPEGLING OCH SPRIDNING	11
9.	MONOPULSRADAR	13
9.1	INTERFERENS MELLAN TVÅ ANTENNER	15
9.2	NÄRFÄLT OCH FJÄRRFÄLT	16
10.	GEOMETRISK HÄRLEDNING.....	18
10.1	MONOPULSMÄTNING MOT ETT MÅL.....	18
10.2	TVÅ SIGNALER I FAS	19
10.3	TVÅ SIGNALER UR FAS.....	20
10.4	HÄRLEDNING AV MISSAVSTÅNDET	22
11.	PARAMETERVAL.....	26
11.1	AMPLITUD OCH FAS	26
11.2	SIGNALSTYRKA	27
12.	KONSTRUKTION AV CROSSEYE-SYSTEM	29
12.1	ANALOGA KOMPONENTER	30
12.2	SEPARATA MOTTAGARE OCH SÄNDARE	31
12.3	RECIPROCITETSSATSEN	32
13.	INVERKAN AV SPRIDNING	33
13.1	RECIPROCITET	33
13.2	KVANTITATIVA RESULTAT FÖR SPRIDNING.....	35
14.	SLUTSATSER.....	36
15.	ERKÄNNANDE	36
16.	REFERENSER.....	37

1. Inledning

Militära farkoster till sjöss och i luften är ständigt utsatta för hotet från målsökande robotar. Fartyg och flygplan är lätta att urskilja och utgör tydliga mål för en robot. Även markmål hotas som stridsvagnar och radarstationer av målsökare, men söktekniken blir annorlunda på grund av markklotter.

Robotangrepp kan genomföras snabbt och robotarna skjuts ofta i salvor. Försvaret bygger på att man i förväg intar rätt position och agerar enligt ett förutbestämt schema. Robotarnas acceleration gör det svårt att undkomma genom manövrer. I stället måste man inrikta sig på taktiska åtgärder och använda elektroniska metoder för att vilseleda roboten.

Dessa metoder bygger på målsökarens begränsningar. En av de mest avancerade är crosseye som studerats vid FOI under några år. Crosseye är en allmän metod som inte kan sättas ur spel med enkla medel och har potential för fortsatt utveckling.

2. Radarsökande robotar

Robothotet är inte nytt till sin karaktär. Tydliga paralleller kan dras med utvecklingen av torpeder som länge var det allvarligaste hotet mot fartyg. Torpederna var särskilt framgångsrika under de epoker där försvaret blivit eftersatt. En välkänd period är inledningen av kriget mellan Japan och USA 1941. Japanerna hade länge övat nattliga torpedanfall och sköt stora mängder torpeder mot de amerikanska fartygen som gick på en traditionell linje. Det dröjde mer än ett år innan amerikanerna lärde sig bemöta torpederna med ny taktik och använde radarn för att hålla fientliga fartyg på avstånd (Hughes 1986).

Den moderna taktiken mot robotangrepp är likartad. Taktiken går ut på att robotarna ska fyras av på så stora avstånd att motåtgärder kan sättas in i tid. Problemet är att moderna robotar har bättre målsökare än torpederna under andra världskriget. De förluster som drabbade britterna under Falklandskriget blev en väckarklocka för världens flottor. Det visade sig synnerligen svårt att försvara sig mot robotar utrustade med radarmålsökare (Woodward 1994).

Radarstyrda robotar har varit effektiva även i senare konflikter, t ex i Irak 1991 och 2003, men striden var för ensidiga för att tillåta några allmänna slutsatser. Under Falklandskriget saknade båda parter luftburna radarstationer och fick förlita sig på den varning som gavs av utrustningen ombord på fartyg och flygplan. Den visade sig ofta otillräcklig med tanke på att ett framgångsrikt försvar mot robotar måste bygga på samordnade åtgärder.

2.1 Falklandskriget

Försvar mot robotar bygger på att de har begränsad tid i luften. Det lönar sig alltså att försöka leda dem bort från målet. Det krävs en avsevärd synkronisering för att lyckas med detta. Insatserna misslyckades två gånger under Falklandskriget, där fem Exocet-robotar avfyrades. Två av dessa lyckades sänka brittiska fartyg, trots att robotarna sköts

på stort avstånd. Flygplanen såg sina mål på radarn enbart under ett kort lyft från låg flyghöjd, men robotarna gick vidare med egna radarmålsökare. De motåtgärder som sattes in var inte tillräckligt koordinerade för att få robotarna att missa. Två robotar sköts mot jagaren Sheffield. Efter flera falsklarm tidigare på dagen vägrade den ansvarige officeren att kasta remsor och interferens mellan satellitkommunikation och telekrigsåtgärder förhindrade andra insatser. Resultatet blev att jagaren Sheffield träffades av en robot och sjönk senare trots att roboten aldrig exploderade.

Det andra fallet är lika instruktivt. Två robotar låste sina målsökare på fartyget Ambuscade som lyckades locka bort robotarna genom att kasta remsor. När robotarna passerat remsmolnet lokaliserade de det största målet i sikte, transportfartyget Atlantic Conveyor, som träffades och sjönk. Det var en katastrof för invasionsstyrkan, eftersom Atlantic Conveyor hade viktig utrustning ombord. Ambuscade misslyckades med sin uppgift, medan Sheffield skyddade de större fartygen till priset av sig själv. Uppenbarligen saknades samordning mellan de olika åtgärderna (Woodward 1994).



Figur 1. Exempel på moderna radarmålsökare från den ryska firman Agat. Alla systemen utnyttjar flat plate-antenner med goda polarisations- och sidolobsegenskaper. (Flygutställningen i Moskva 2003. Foto Lars Falk)

2.2 Skydd mot radarsökande robotar

Hotet mot flygplan från radarsökande robotar är ännu svårare att hantera på grund av robotarnas snabbhet och frånvaron av klotter. Redan under Vietnamkriget visade sig radarstyrda luftvärnsrobotar effektiva mot flygplan. Det ledde till att skydd infördes i form av störsändare och avhakning i avstånd och hastighet genom elektronisk repetering av radarsignalen (Hyberg 1993, Neri 2003).

Stormakterna bygger numera upp skydd mot robotar genom att skapa zoner med begränsat tillträde för flygplan och fartyg. Denna metod är svår att tillämpa för länder med begränsade resurser och har dessutom vissa nackdelar. Flera vådaskjutningar av egna flygplan med radarsökande robotar har inträffat under senare år, då flygplan inte reagerat på igenkänningssignalerna från robotar och radarstationer.

Intresset för egenskydd har ökat i samband med att många länder förväntas uppträda utomlands. De traditionella metoderna för plattformsskydd bygger på tekniker utvecklade under det kalla kriget. Hoten var då likformiga och välkända och många störotekniker byggde på ofullkomligheter i robotens målsökare (Eneroth och Falk, 2003).

Sådana svagheter har blivit allt svårare att utnyttja i takt med att målsökarna blivit allt bättre. Orsaken är att produktionstekniken förbättrats. Tidigare nöjde man sig med enkla antenner av reflektortyp, men numera använder man flat plate-antennerna i målsökare (figur 1). Dessa antenner har rena diagram både i polarisation och sidlobes. Denna utveckling betingas inte av störhöjningen utan tillverkningen har blivit enklare och billigare på detta sätt. De nya antennerna gör det svårare att utnyttja brister i robotens målsökarantenn genom t ex korspolarisationstörning (Eneroth och Falk, 2003).

Moderna målsökare kan lätt bytas ut. Därmed har hotet mot plattformarna blivit mer variabelt än förut och det är en anledning till att intresset för robotskydd har ökat. Man vill gärna använda allmänna principer som inte kan motverkas med enkla åtgärder. Crosseye-störning är en sådan metod: två antenner ombord utnyttjas för att skapa en signal som lockar roboten bort från målet. Systemet bygger inte på någon defekt hos målsökaren utan på allmänna principer för hur en radar följer sitt mål.

Systemet skapar ett skenmål vid sidan om det verkliga målet genom att böja fasfronten i en process som kallas "crosseye" eller fasfrontsdistorsion. För att skenmålet ska bli trovärdigt återsänder systemet målsökarens egna radarsignaler. Det är inte nödvändigt att känna radarns konstruktion i detalj. Crosseye fungerar mot alla typer av följning.

Crosseye-tekniken föreslogs på 1950-talet i samband med att man studerade "glint" i komplicerade mål. Crosseye-tekniken är tekniskt avancerad och beskrevs länge som en fantasi. Tanken att ett skenmål skulle ligga utanför störantennerna och den plattformen de står på strider skenbart mot naturlagarna, men effekten kan åstadkommas inom en trång sektor. Svårigheten är att lägga detta smala område över robotens målsökare, om vilseledningen ska utföras mot alla slags robotar i godtyckligt terräng och väderlek.

3. Syfte

Denna rapport ingår i en serie arbeten om crosseye-principen (referenserna 3 -16). Tidigare har crosseye beskrivits i samband med försök utförda på FOI i Linköping. DE grundläggande principerna har granskats i flera rapporter och konferensbidrag (Falk 2004). Dessa arbeten visar att crosseye kan fungera även vid spridning i terräng och vid sjögång om konstruktionen är riktig.

Syftet med denna rapport är att beskriva hur ett crosseye-system ska konstrueras för att fungera under komplicerade yttre förhållanden. Beskrivningen ges i enkla termer och beskriver de krav som bör ställas på systemet. Tidigare har allmänna formler härletts. De förenklas i denna rapport och tillämpas på uppgiften att bestämma parametervärden som får crosseye-metoden att fungera.

4. Metod

I tidigare arbeten har begrepp som ”idealisk målsökare” och ”idealiskt reciprokt crosseye-system” införts för att analysera de praktiska begränsningarna på crosseye (Falk 2004b). Det rådde länge tvivel om att crosseye är en tillräckligt tillförlitlig metod för att användas i militära system. Konstruktionerna led också av att teorin och tekniken med analoga komponenterna var otillräckliga för uppgiften.

Utvecklingen vände när arbeten utförda i Italien och Sverige publicerades för fem år sedan. Crosseye hade hämmats av bristande tilltron, eftersom tekniken inte ansågs mogen för processen och flera forskningsprogram avbröts i början på 1990-talet. Det gavs nu teoretiska (Falk 2000) och praktiska (Neri 2000, Bacchelli 2001) bevis för att metoden kan vilseleda verkliga målsökare.

För att analysera crosseye-störning måste man skilja på de faktorer som bestämmer funktionen och sådana som beror på svårigheten att finna lämpliga komponenter. Crosseye kräver hög effekt och noggrannhet i fas. Det är särskilt viktigt att undersöka om spridning i terrängen inverkar på processen. Det krävs exakt balans mellan signalkomponenterna för att avhaka en robot, men samtidigt måste systemet kunna producera en signal som är tillräckligt stark för att locka till sig målsökaren.

I den tidiga litteraturen finns många förslag till konstruktioner av crosseye-system, men knappast någon av dem fungerar i praktiken (van Brunt 1995). I denna rapport illustreras analysen med några exempel som visar de svagheter dessa konstruktioner var behäftade med. Tilltron till crosseye minskade under 1990-talet, trots framgångar för den italienska firman Elettronica. Det var nödvändigt att återvända till allmänna principer för att garantera funktionen i alla typer av terräng och sjötillstånd och sedan komplettera dessa beräkningar med numeriska simuleringar.

5. Resultat

Det viktigaste resultatet av beräkningarna är att crosseye-störning kan genomföras om parametrarna väljs inom rätt område. Dessutom kan principen formuleras så att den blir lätt begriplig för konstruktörerna. Nedan ges några exempel på hur teorin för crosseye kan tillämpas i praktiken.

Den kvantitativa analysen visar att det är betydligt lättare att skydda små fartyg och helikoptrar än stora plattformar. Kvantitativa beräkningar visar hur noga ett crosseye-system måste vara konstruerat för att fungera mot olika målsökare och vilka krav man måste ställa på de komponenter som ingår i systemet.

Ett viktigt resultat är att spridning av radarvågor inte behöver påverka funktionen hos ett crosseye-system. Denna slutsats redovisades på AOC-konferensen i Rom (Falk 2004) och kompletteras här med kvantitativa resultat. Dessa beräkningar tycks också förklara de störningar som observerats vid tidigare försök på FOI.

De störningar som är svårast att bemästra uppstår när radarsignaler utbreder sig över en vattenyta. I rapporten ges några förslag till hur tester kan utformas när crosseye används mot sjörobotar. Analysen bygger på allmänna principer för elektromagnetiska vågor, i synnerhet reciprocitetssatsen. Denna sats används ofta inom antennteorin, men den tillämpning som föreslås här är mer avancerad.

6. Förslag till fortsatt arbete

Den största faran med crosseye är att systemet av misstag kan dra robotar mot plattformen. Systemet repeterar målsökarens radarsignaler och det är viktigt att principen beskrivs så klart och åskådligt som möjligt för att förutse alla tänkbara fel.

Missförstånd kan förebyggas om de grundläggande principerna är kända, men det taktiska förloppet måste också simuleras. Först då kan crosseye inta sin plats som en komponent bland andra försvarsåtgärder. Framgången för de system som konstruerats av Elettronica bygger i hög grad på simuleringar. Crosseye bör betraktas som en av flera metoder som kan sättas in mot en anfallande robot. En detaljerad analys kräver numeriska simuleringar baserade på en realistisk målsökarmodell.

Ur teoretisk synpunkt avgör lagen om strålgångens omvändbarhet funktionen. För att pröva ett crosseye-system måste man i praktiken kunna avgöra hur väl utrustningen uppfyller reciprocitetssatsen. Det är särskilt angeläget att konstruera en mätutrustning som innehåller ett styrbart icke-reciprokt element (t ex en ferrit), där man under försöken kan ändra graden av reciprocitet och mäta upp resultatet. På så sätt kan man undersöka hur spridning från terrängen bör påverka systemet och även kontrollera komponenternas funktion.

Elettronica har konstruerat två prototyper för crosseye-störning som överlämnats till den italienska marinen och flygvapnet. De har testats mot verkliga robotmålsökare vid försök i Medelhavet, där radarvågornas utbredning över havsvågorna har en viss betydelse. Marinen kommer snart att utföra försök i samband med att crosseye testas för större fartyg och det vore synnerligen angeläget att få till stånd ett samarbete mellan Sverige och Italien där dessa frågor kan belysas ur praktisk och teoretisk synvinkel.

Crosseye har särskilt god förmåga att skydda smygfartyg som Visby. Metoden gynnas nämligen av att målet har måttlig radarmålyta. Flera andra störmetoder bygger på varianter av crosseye och bör studeras närmare. Störning av semiaktiva målsökare har föreslagits och bör undersökas teoretiskt. Slutligen vore det av stort intresse att undersöka på vilket avstånd en målsökare med avancerad logik kan upptäcka att den är utsatt för crosseye-störning med hjälp av mätningar på signalen.

7. Crosseye-principen

Crosseye-störning är en metod för att skapa ett elektroniskt skenmål som uppträder vid sidan om ett verkligt mål. Antennerna befinner sig ombord på farkosten, men skenmålet ligger så långt utanför plattformen att den är skyddad från robotträff (Figur 2).



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

Skenmålet är trovärdigt därför att antennerna sänder tillbaka målsökarens egen signal. Det är också möjligt att lägga på modulationer och fluktuationer för att göra målet mer övertygande. Sådana processer är lätta att utföra med digitala komponenter som är en förutsättning för moderna crosseye-system. Radiofrekventa minnen (DRFM) har förbättrat förutsättningarna för crosseye så radikalt att utvecklingen i stort sett sönderfaller i perioderna före och efter 1990 (Falk 2004).

8. Spegling och spridning

Idén till crosseye uppkom under studier av monopulsradararnas funktion mot mål nära en vattenyta. Radarstrålen reflekteras nästan fullständigt vid strykande infall. Det kan ge upphov till ett mål som är lika starka som det verkliga målet och de båda målen interfererar antingen konstruktivt eller destruktivt med varandra beroende på avståndet.

Om flera mål uppträder tillsammans på samma avstånd och inom samma antennlob ger radarn felaktig indikation om läget (Sherman 1984). För att motverka spegling kan man byta frekvens, t ex i en hoppfrekvensradar som utför flera oberoende mätningar och jämför resultaten. Det är också möjligt att använda fler antenner, men metoden är dyr och knappast effektiv. Varje störande signal kräver i princip en antenn och metoden används vanligen bara för att eliminera störkällor i fixa riktningar.

Spegling är mest kännbart när den direkta och den reflekterade strålen har samma styrka och ligger i motfas. Signalerna utsläcker då varandra och målsökarens riktning fluktuerar snabbt. Denna effekt utnyttjas i crosseye genom att man skapar två ungefär

lika starka signaler som ligger i motfas nära roboten. Fasfronten förvrids och signalen försvagas så att ett skenmål uppstår utanför plattformen.

Ett sådant skenmål kan ersätta släpsmål och andra kostsamma "off board decoys". Forskningen om crosseye bedrevs länge i hemlighet i flera länder, men de flesta gav upp på grund av tekniska problem. Det har nu visats att crosseye trots allt fungerar i praktiken (Falk 2000, Neri 2000).

USA avbröt sitt crosseye-program "Have Exit" i början på 1990-talet och satsade på släpsmål för att få ett fungerande skydd. En anledning till de problemen med crosseye är att man tvingades använda analoga komponenter som saknar nödvändig precision. Det är svårt att konstruera praktiskt fungerande system och spåra felkällor under försöken. Svårigheterna ökade genom att man inte visste vilka praktiska förutsättningar som måste vara uppfyllda för att crosseye ska fungera under sjögång (Falk 2000).

Många försök har misslyckats på grund av svårigheterna att balansera amplitud och fas. Ett problem som ofta nämns är vibrationer hos antenner placerade i vingspetsarna på flygplan. Noggranna försök har visat att felen hade andra orsaker, men intrycket består att crosseye är en känslig metod.

Problemen kan inte beskrivas utan en fungerande teori. Det gäller särskilt effekten av vågutbredning. Spridning från skog och vatten kan inte beskrivas med en deterministisk modell och vågutbredningen är viktig för crosseye. Systemet måste kunna placera signalerna i motfas rätt över roboten för att inte signalen ska dra till sig roboten. Problemet löses bäst genom att kalibrera utrustningen i förväg och verifiera funktionen.

Dessa slutsatser bekräftades officiellt på AOC-konferens i Las Vegas hösten 2000 i ett svenskt och ett italienskt föredrag om crosseye vid försvar av fartyg (Falk, 2000; Neri, 2000). Elettronica visade här för första gången filmer från prov utförda av den italienska marinen. Senare har filmer också visats där en robotmålsökare hakas av vid anfall mot flygplan och helikopter (Bacchelli 2001, Neri 2003).

Resultaten bygger på modern signalbehandling och snabba datorer i kombination med moderna halvledarförstärkare och digitala radiofrekventa minnen (DRFM). Framför allt har simuleringar visat att crosseye fungerar i andra områden än den äldre litteraturen anger (Van Brunt 1995). Störningen måste utformas så att skenmålen blir optimala och passar in i det taktiska sammanhanget.

I äldre system förutsatte det att försvaret skulle fungera autonomt mot alla former av robothot. Det är ett orimligt krav som bromsade utvecklingen genom att de taktiska aspekterna försumrades. Det finns många skisser till crosseye-system i den öppna litteraturen, men ingen av dessa konstruktioner är fullgången (Van Brunt 1995). I längden har dessa bristfälliga förslag bara vållat misstro mot crosseye-principen, som kräver full kontroll för att vara effektiv. Några av dessa äldre system används som exempel i denna rapport för att visa hur viktigt det är att härleda rätt kriterier.

9. Monopulsradar

Målsökande robotar använder radarvågor eller ljus (främst IR) för att lokalisera sina mål. Radar fungerar i all slags väderlek. Det är det naturliga valet för robotar som bekämpar fartyg och flygplan, trots att radarn har begränsad vinkelupplösning jämfört med optiska system, eftersom våglängden är tusen gånger större än den optiska våglängden (några centimeter mot ca 0,01 mm för IR).

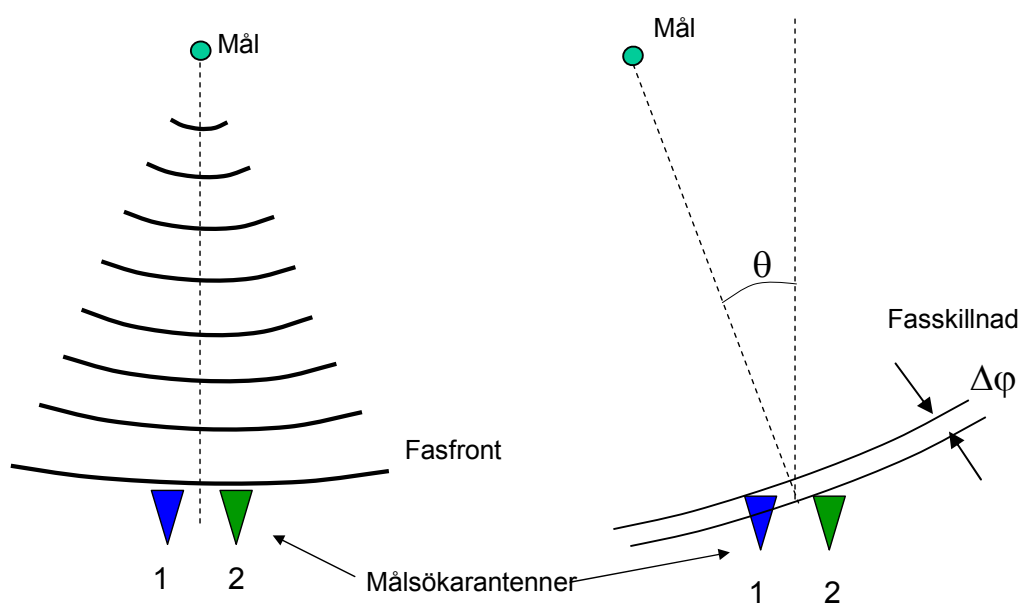
Det innebär att radarstyrning måste ske efter helt andra principer än för bildalstrade system. En radar använder de reflekterade vågorna för att mäta avstånd och riktning till målet. Den kan följa effektivt så länge målet är ensamt i loben. Det spelar ingen roll om målet fluktuerar genom interferens eller störning. En brussignal som genereras ombord gör bara att målsökaren fortsätter mot målet (Home On Jam, HOJ-mod).

Signalen utbreder sig sfäriskt från målet i fri rymd och målsökaren är konstruerad för att röra sig vinkelrätt mot vågfronten. Utformningen kan skifta men i princip används samma metod i alla målsökare. De effektivaste systemen använder monopuls genom att mäta signalen samtidigt med två mottagarantennerna (Figur 3). På så vis klarar systemet snabba variationer i signalstyrkan (Sherman 1984, Hyberg 1993).

Monopulsprincipen är synnerligen effektiv vid följning av enstaka mål. Den enda begränsningen är att upplösningen blir måttlig på grund av att antennens storlek är begränsad till några få dm genom robotens egen storlek. Lobens bredd blir flera grader, eftersom man inte vill använda korta våglängder på grund av begränsad räckvidd i regn.

Riktningen bestäms genom att man jämför de signaler som tas emot av antennerna. Om dessa är lika starka är den enda skillnaden att signalerna är förskjutna i tid. Om radarn är smalbandig kan tidsskillnaden konverteras direkt till en fasskillnad mellan antennerna (Figur 3). Det naturliga sättet att föreställa sig funktionen är alltså fasmonopuls. Det finns många andra system, t ex amplitudmonopuls, men alla mäter egentligen fasen, som är den kvantitet som innehåller information om vägen (Sherman 1984).

Om målet ligger snett framför roboten blir fasskillnaden proportionell mot riktningsskillnaden, så länge vinkeln är liten. Gränsen sätts av lobbredde; en målsökarantenn bör nämligen inte ha en alltför bred lob med tanke på klotter.



Figur 3. Principen för monopulsmätning: ett mål beläget rakt framför målsökaren ger signaler med samma fas i båda mottagarantennerna. Ett mål beläget snett framför målsökaren ger en fasskillnad som är proportionell mot vinkeln så länge den är liten.

Det är viktigt att målsökarens vinkelupplösning inte räcker till för att lösa upp målet. Orsaken är densamma som i flygplan: på grund av antennens begränsade diameter kan radarn inte skapa en bild av omgivningen. Den enda möjligheten att mäta in ett mål är att svepa med antennloben över målet och utföra flera mätningar.

Radarn i flygplan har vanligen en lob som är flera grader bred. Den kan bara skapa bilder genom att jämföra många fasriktiga mätningar av marken (syntetisk aperturradar, SAR). Metoden lämpar sig inte för målföljning, eftersom den kräver hög faskoherens och lång mättid.

En monopulsmålsökaren kan bestämma riktningen till enstaka mål. Noggrannheten ligger inom en tiondel av antennens lobbredd eller något bättre vid högt signal-till-brusförhållande. Den måttliga precisionen innebär ingen större olägenhet, eftersom målsökaren kan förfinas sina mätningar, medar roboten närmar sig målet.

Problemet är att målsökaren bara bör ha ett mål i loben. Ett monopulssystem kan i princip inte lösa upp mer än ett mål. Vid sammansatta mål utgår beräkningen fortfarande från att det bara finns ett mål i loben. Ett välkänt sätt att utnyttja detta är att låta flera flygplan uppträda i en formation som radarn uppfattar som ett enda glimtande mål (Hyberg 1993).

9.1 **Interferens mellan två antenner**

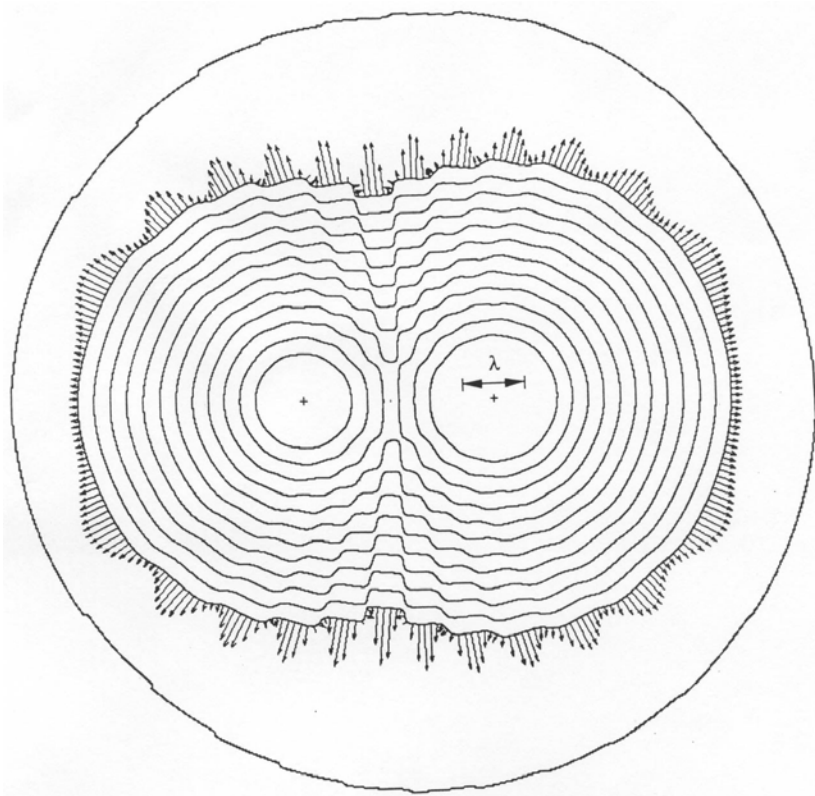
Ett crosseye-system består av två antenner placerad på måttligt avstånd från varandra. Avsikten är att de ska samverka så att fasfronten lokalt förvrids kring roboten och målsökaren ändrar riktning. Felpökningen kan uppskattas med grafiska metoder som beskrivs i denna rapport. Fördelen med en sådan härledning är att man kan bedöma effekten vid avvikelser från ideala förhållanden, t ex då radarvågorna sprids av höga vattenvågor.

Crosseye-principen bygger på att två antenner samverkar och skapar ett fält av ny typ. Figuren nedan visar principen i överdriven form. Två punktformiga radarreflektorer har placerats några våglängders avstånd från varandra. Även det radiella avståndet är litet för att illustrera fenomenet bättre. I verkligheten befinner sig antennerna ca 10 m från varandra och roboten omkring 1 km bort. Det innebär att principen för crosseye-störning kan uttryckas på följande sätt:

Ett crosseye-system är konstruerat för att befinna sig i målsökarens fjärrfält, medan baslinjen väljs så att målsökaren befinner sig i crosseye-systemets närfält.

Crosseye-störning förutsätter att målsökaren inte kan lösa upp antennerna, trots att de står långt från varandra och skapar ett fält som inte utbreder sig helt radiellt. Figuren visar att denna avvikelse från fjärrfältet sker inom några få smala sektorer. I andra riktningar strålar antennerna ut som en sfärisk våg som förväntat i fjärrfältet. Områdena med förvriden fasfront blir smalare i vinkel med ökande avstånd från källan, men växer i absoluta mått. Den svåra uppgiften är att förlägga denna del av fältet över roboten, så att den rör sig vinkelrätt mot en sned vågfront.

Den förvridna vågfronten är en del av närfältet som skapas av två punktkällor. Fältet är märkligt genom att fjärrfältet och närfältet bara skiljer sig inom några få områden. Man bör kanske hellre tala om Fraunhoferområdet (fjärrfältet) och Fresnelområdet (närfältet), eftersom det rör sig om allmänna fenomen. I Fresnelområdet inverkar avståndet till källan, medan Fraunhoferområdet bara beror av vinkeln. Så länge strålapproximationen gäller avbildas källan i Fresnelområdet, medan dess fouriertransform syns i Fraunhoferområdet (Landau och Lifshitz, 1975). För två punktkällor syns skillnaden främst i de områden där signalerna ligger i motfas.



Figur 4. Fasfronter för fältet från två punktkällor beräknade i symmetriplanet. Amplituderna skiljer sig med ca 5%. Fasfronterna blir sfäriska utom i några få smala områden som kan utnyttas för crosseye (Ain Sume, FOI Linköping).

9.2 Närfält och fjärrfält

Ovanstående bild ger en grov föreställning om hur fältet från en verklig utrustning ser ut. Där står antennerna tusen våglängder från varandra för typiska radarparametrar, t ex ett antennavstånd på $d=10$ m och med våglängd $\lambda=1$ cm. Värdena kan variera något, men vi kommer att använda dessa värden i de numeriska beräkningarna.

Gränsen mellan närfält och fjärrfält definieras ofta som det avstånd där skuggor inte längre kan bildas och fältet utbreder sig som en våg. En enkel uppskattning visar att målsökaren kan skilja crosseye-antennerna åt först när den befinner sig några hundra meter från plattformen, för antenndiametern blir sällan större än 1 meter. Lobbrednen för en radarmålsökare är flera grader liksom för en radar i ett flygplan.

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

Resultatet innebär att två crosseye-antennar placerade 10-20 meter från varandra kan lösas upp först när roboten är på mindre än 200 meters avstånd och det är för sent att ändra riktning. Den taktiska användningen av crosseye beror på denna effekt. Fasfrontsdistorsionen tolkas av målsökaren som ett mål i fel riktning och får roboten att missa med tillräckligt mycket.

En antenn med ändlig diameter D kan på stora avstånd inte längre upprätthålla en plan vågfront i en riktning. Fältet övergår till en sfärisk våg med varierande amplitud i olika riktningar. Övergången sker gradvis; den börjar på ett avstånd R som ges av kriteriet att vägskillnaden till antennens ytterkanter är mindre än en kvarts våglängd (Landau och Lifshitz 1973).

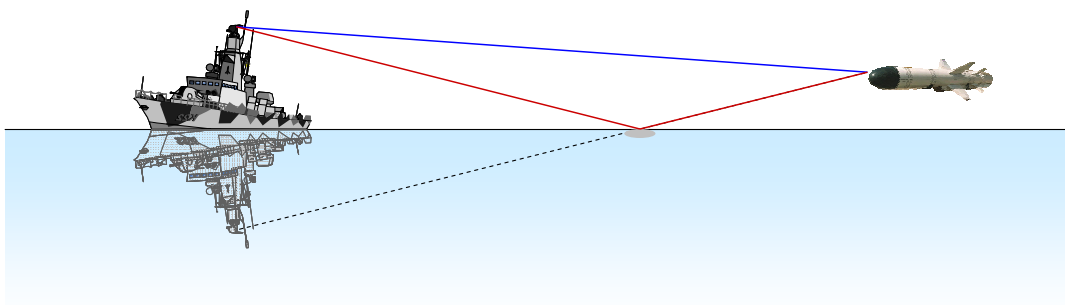
$$R = D^2 / 2\lambda$$

Det är lätt att se att målet ligger i fjärrfältet för målsökare för alla parametrar av intresse. Å andra sidan ligger roboten alltid i närfältet för crosseye-systemet på grund av det kvadratiske beroendet av D . Detta är förutsättningen för att crosseye ska fungera.

Dessa gränser är inte särskilt känsliga för avstånd och diametrar. Cross-eye kan därför betraktas som en allmän metod för alla realistiska robotparametrar. Å andra sidan krävs det hög precision för att den smala sektorn med förvriden fasfront ska falla precis över den anfallande roboten.

Den omständigheten att robotens målsökare inte kan lösa upp antennerna utnyttjas i crosseye för att skapa ett skenmål med två antenner. Crosseye-antennerna står så långt ifrån varandra att de skapar ett fält som ser ut att komma från ett enda skenmål beläget ett stycke utanför fartyget.

För tydlighets skull illustreras förloppet med fasmonopuls, men alla målsökarantennar ger i princip samma resultat. Monopulsprincipens svaghet är att den bara klarar av ett mål och det utnyttjas effektivt i crosseye. Om en robot anfaller ett fartyg med eldledningsradar kommer båda parter på grund av spegling att lida av problemet med två mål i motfas. Robotens radarmålsökare och eldledningsradarn ombord ser båda ett mål och dess spegelbild. Om dessa mål är lika starka och ligger inom loben ger målen upphov till en fluktuerande signal som systemet måste lära sig hantera. Det finns ingen självklar teknik för hur detta problem ska lösas utom att byta frekvens inom ett tillräckligt stort område (Sherman 1984).



Figur 5. Både målsökaren på en robot och eldledningsradarn ombord på ett fartyg har bekymmer med att en monopulsradar i princip bara kan bestämma riktningen till ett mål. Spegling i vattnet är ett problem som kan reduceras genom frekvenshopp till skillnad från crosseye som alltid åstadkommer signaler i motfas.

Det är fortfarande mycket omdiskuterat vad man kan göra när två mål uppträder i loben, eftersom tolkningen av fluktuerande mål är modellberoende. I princip kan man lösa upp flera mål, men det kräver god kunskap om deras egenskaper och lågt brus (Sherman 1984). Ett crosseye-systemet utnyttjar denna omständighet genom att låta två antenner repetera radarns signal i motfas för att åstadkomma en sned fasfront. Storleken av vinkelfelet kan härledas på ett åskådligt sätt som visas i nästa avsnitt.

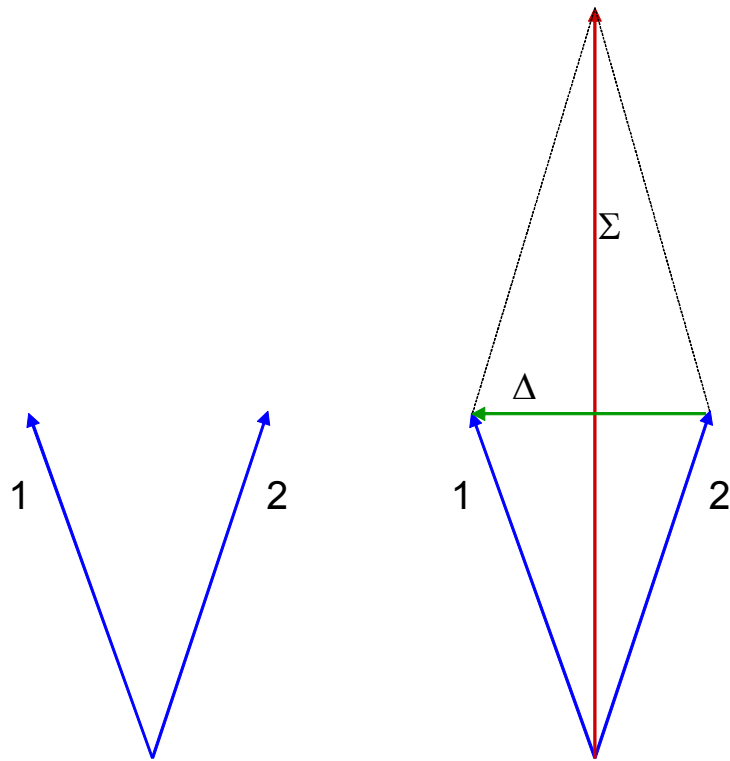
10. Geometrisk härledning

En monopulsmålsökare är synnerligen effektiv som målföljare. Det lönar sig inte att störa med brus från antenner ombord, eftersom målsökaren slår om till HOJ-mod (Home On Jam) och fortsätter mot plattformen. Denna förmåga att följa ett mål utnyttjar crosseye-systemet genom att skapa ett skenmål som monopulssystemet accepterar.

Målet bildas av två signaler som ligger ur fas och ger upphov till en felpekning. Den kan beräknas med formler för vinkelglitter enligt teorin för monopulsradar (Sherman 1984), men det är mer instruktivt att härleda formlerna ur en geometrisk betraktelse. Den beskriver samtidigt crosseye-principen genom att visa på skillnaden mellan signaler i och ur fas.

10.1 Monopulsmätning mot ett mål

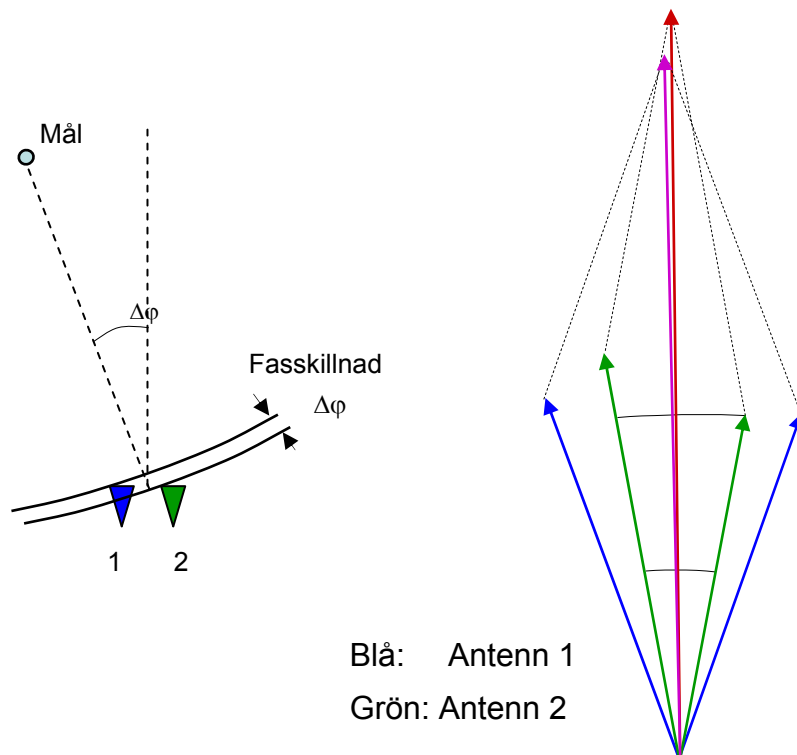
Monopulsprincipen är avsedd för ett mål. De signaler som mäts av två identiska antennerna 1 och 2 ger upplysning om signalens amplitud och fas. För fasmonopuls ger ett punktformat mål samma amplitud i båda antennerna. Riktningssinformationen kommer ur fasan, som för en smalbandig signal motsvarar tidsskillnaden för radarpulsen. I ett verkligt system anges summasignalen och skillnadssignalen enligt Figur 6. Systemet beräknar kvoten mellan skillnadssignalen och summasignalen som ger ett optimalt estimat av riktningen till målet (Sherman 1984).



Figur 6. Principen för monopulsmätning mot ett mål. De signaler som mäts av antenn 1 och 2 avbildas som vektorer, där pilarnas längd svarar mot amplitud och riktning mot fas. Ett punktformat mål ger samma amplitud i båda antennerna. Riktningssinformationen kommer från faser, men beräknas vanligen som kvoten mellan summasignalen Σ och skillnadssignalen Δ enligt figuren till höger.

10.2 Två signaler i fas

Crosseye-systemet utnyttjar det faktum att en målsökare som bygger på monopuls i princip utgår från att bara ett mål ligger i följeluckan. Genom att sända signaler från två antenner, som är förskjutna horisontellt i förhållande till varandra, kan man skapa en ny typ av skenmål. Båda antennerna repeterar den infallande radarsignalen. Resultatet beror på fasläget och amplituden mellan de båda signalerna. Om signalerna ligger i fas dras målsökare mot signalernas tyngdpunkt mellan antennerna och målsökaren kommer att riktas mot plattformen.

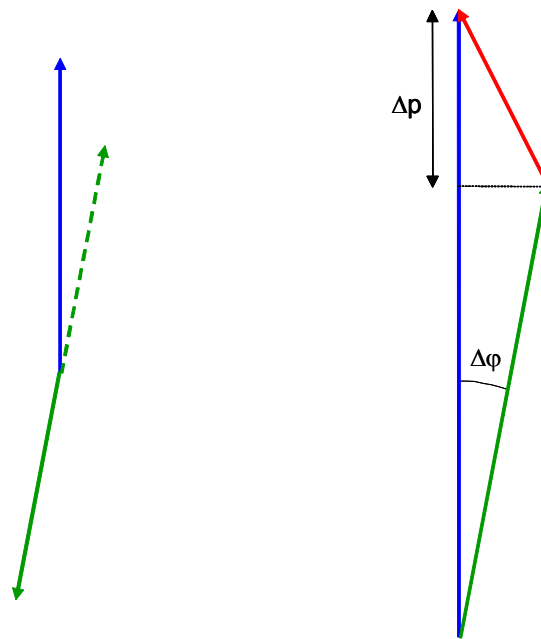


Figur 7. Två sändare nästan i fas ger tillsammans i monopulsmålsökaren ett mål med tydlig riktning nära antensystemets tyngdpunkt. Pilarnas längd motsvarar signalernas amplitud och pilarnas riktning deras faslägen.

Om signalerna är i fas mäter monopulssystemet bara en obetydlig skillnad i fas mellan de båda antennerna. Summasignalen tolkas som att målet ligger rakt fram. Figur 7 visar att målsökaren kommer att låsa på ett läge någonstans mellan crosseye-antennerna.

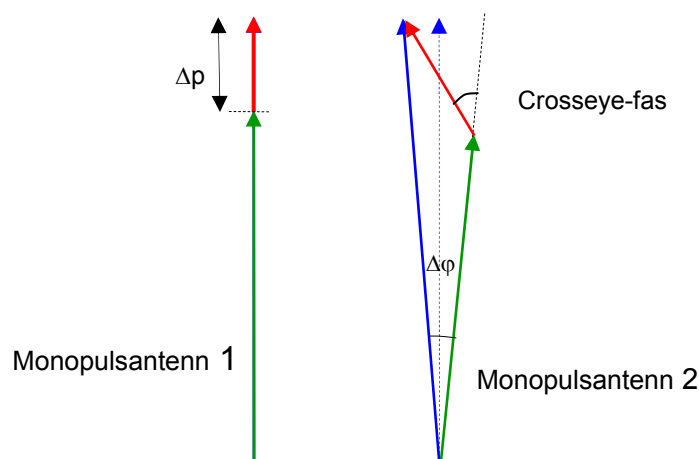
10.3 Två signaler ur fas

Genom att skapa signaler som ligger helt ur fas kan man åstadkomma ett crosseye-system (se figur 8). Signalerna från de båda cross-eye-antennerna är ungefär lika starka och signalerna tar nästan ut varandra. Den totala signalen blir svag men samtidigt ändras fasen snabbt enligt figuren. Den totala vektorn vrider sig snabbt och målet tycks skenbart ligga utanför antennerna.



Figur 8. Crosseye-fallet: Två ungefär lika starka signalkomponenter som ligger nästan exakt i motfas. Summasignalen (röd i figuren) får en liten amplitud och en fas som starkt beror på skillnaden i amplitud (Δp) och fas ($\Delta \varphi$).

Signalstyrkan beror på hur nära pilarna ligger varandra (fasskillnaden) och hur lika de är i längd (amplitudskillnaden). Dessa förhållanden kan med fördel studeras geometriskt. Om den ena antennen i monopulsmottagaren mäter två komponenter som ligger exakt i motfas blir pilarna parallella som i figur 9. Den andra mottagarantennen ser en liten fasskillnad som beror på att den ligger något närmare den ena crosseye-antennen och längre från den andra.



Figur 9. Monopulsmålsökaren mäter den fasskillnad som skapas av ett crosseye-system. Signalerna på monopulsantenn 1 antas i detta fall ligga exakt i motfas.

När summapilen vrider sig snabbare än de enskilda komponenterna tolkar målsökaren detta som att signalen kommer från ett mål beläget längre åt sidan. Om fasen ändrar sig mycket snabbt mellan antenn 1 och 2 innebär det nämligen att signalen från ett mål kommer in snett (figur 7).

Fasändringen beror på att fältet lokalt drabbas av en fasfrontsdistorsion i ett begränsat område med sned fasfront och minskad amplitud som visas i figur 4. Crosseye-systemet försöker åstadkomma ett liknande fält över roboten.

10.4 Härledning av missavståndet

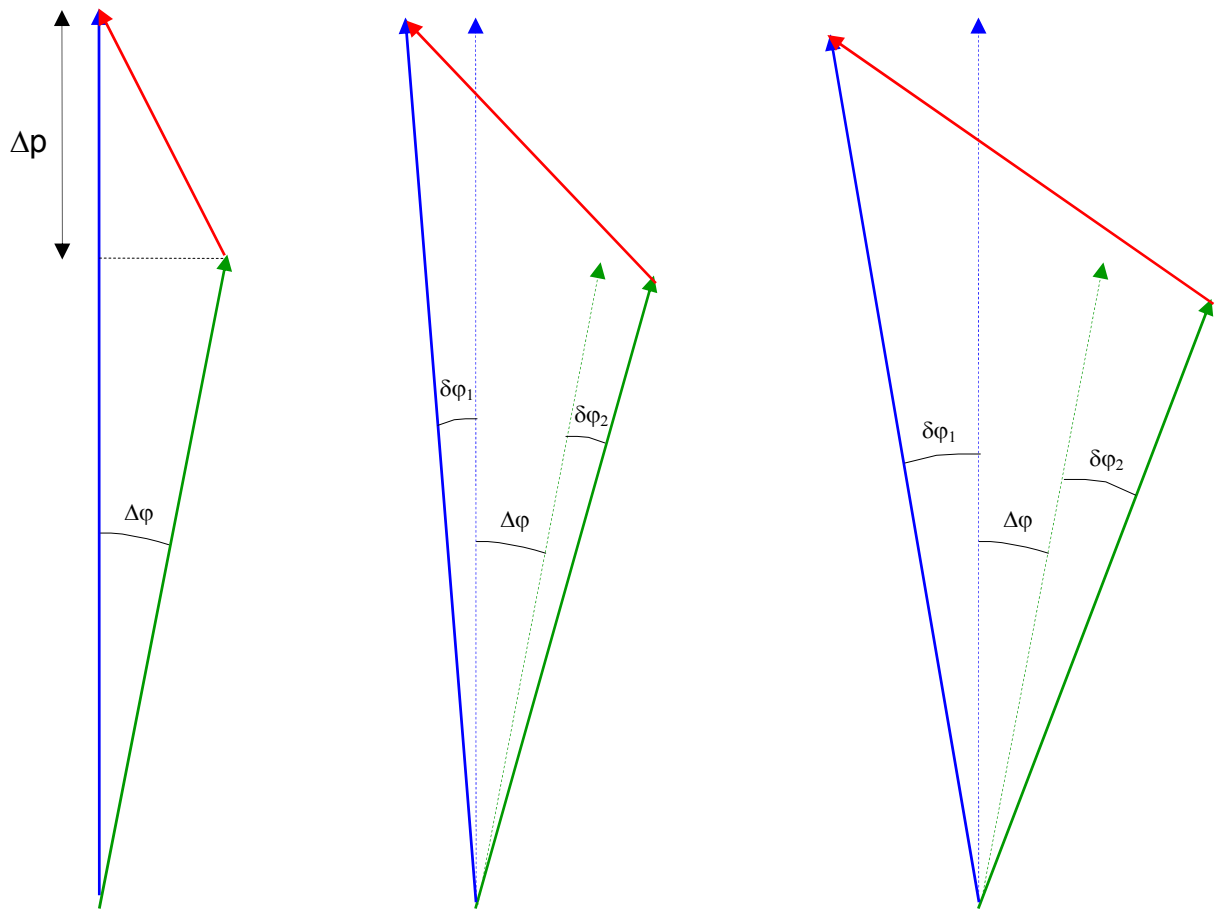
Figur 10 visar att fasskillnaden mellan de båda monopulsantennerna växer linjärt som funktion av avståndet, om vinklarna är små. Därefter minskar crosseye-effekten, men fasfrontsdistorsionen återkommer efter ett varv när fasskillnaden åter blir 180°. Det är i princip möjligt att successivt dra en robot alltmer åt sidan, men effekten beror på parametrar som lobernas bredd, robotens avstånd till målet, osv.

Så länge signalerna ligger i motfas har målsökaren ingen möjlighet att upptäcka vad som sker. Skenmålet uppträder i alla avseenden som ett monopulsmål. Om avståndet mellan antennerna i mottagaren ökar, så ökar fasskillnaden linjärt (figur 10).

Så länge faserna är små vrider sig också summapilen proportionellt mot avståndet mellan antennerna i målsökaren (figur 9). Monopulssystemet tolkar detta som att målet ligger vid sidan av antennsystemets mittpunkt. För att beräkna förskjutningen kan man notera att fasskillnaden mellan monopulsantennerna i figur 8 mäter avståndet mellan de båda crosseye-antennerna. Man kan visserligen inte läsa av avståndet, eftersom crosseye-antennerna ligger så tätt att de hamnar i samma lob, men den begränsningen beror på frekvensvalet. Som tidigare nämnt är antennloben omkring 2° och kan inte lösa upp crosseye-systemet.

Fasskillnaden i figur 8 motsvarar avståndet mellan crosseye-antennerna (D). Vinkeln mellan komponenterna till höger i figur 9 (långa pilar) motsvarar alltså en monopulsmätning av avståndet D mellan crosseye-antennerna. Den lilla summapilen vrider sig enligt figur 9 ungefär $1/\Delta p$ snabbare än de långa komponenterna, eftersom den är så mycket kortare. Det innebär att det maximala missavståndet för två signaler som ligger i motfas ges av den åskådliga formeln,

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



Figur 10. Fasskillnaden som skapas av crosseye-systemet ökar proportionellt mot avståndet mellan monopulsantennerna så länge vinklarna är små.

Formeln visar att crosseye-antennerna åstadkommer ett skenmål som ligger ett antal baslängder D utanför antennsystemet. Missavståndet är helt oberoende av avståndet till målsökaren. Det innebär att bör göra en taktisk bedömning av när skenmålet bör slås på och pröva den i simuleringar. Skenmålet skiljer sig från det verkliga målet först när robotens monopulsantenn kan mäta vinkelskillnaden mellan dem. Å andra sidan måste skenmålet synas tillräckligt tidigt för att vara trovärdigt och locka till sig målsökaren. Vanligen lägger man ut remsor eller brus över det verkliga målet för att dölja det under påhakningen och drar sedan radarn i avstånd (Range Gate Pull Off = RGPO).

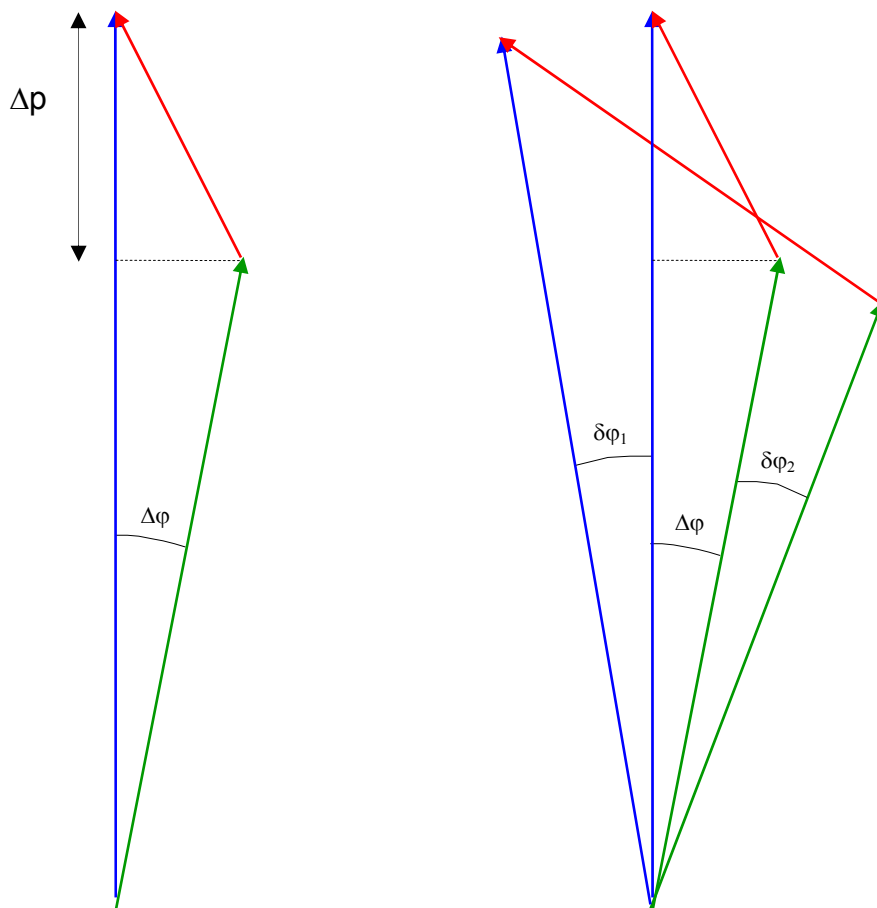
Uttrycket för missavståndet X överensstämmer med den formel Sherman och andra härlett för vinkelglitter med två mål i loben (Sherman 1984). Den fullständiga formeln innehåller också en möjlig fasskillnad mellan de båda signalerna. Även denna formel kan härledas ur en geometrisk betraktelse.

Om signalerna på antenn 1 inte ligger exakt i motfas kommer det att påverka summasignalen enligt figurerna. Vridningen minskar på ett sätt som framgår bäst om man bara betraktar hur den ena fasskillnaden påverkar summapilen. Figur 12 visar hur

missavståndet kan beräknas geometriskt som funktion av fasskillnad ($\Delta\varphi$) och amplitudskillnad (Δp), om bara den ena fasskillnaden är skild från noll.

Det är emellertid inte denna kvantitet vi är intresserad av. Radarsystemet använder kvoten mellan skillnadssignalen och summasignalen som ett optimalt estimat för att bestämma riktningen till målet, eftersom signalen också innehåller brus och fluktuationer. Felet kan då minskas till Cramér-Rao-gränsen (Sherman 1984).

Skillnadssignalen är avståndet mellan pilspetsarna i figuren, medan fasskillnaden β liksom förut är proportionell mot avståndet mellan crosseye-antennerna, D . Å andra sidan är summasignalen större på grund av fasskillnaden $\Delta\varphi$, och har inte längre längden Δp utan $(\Delta p^2 + \Delta\varphi^2)^{1/2}$.



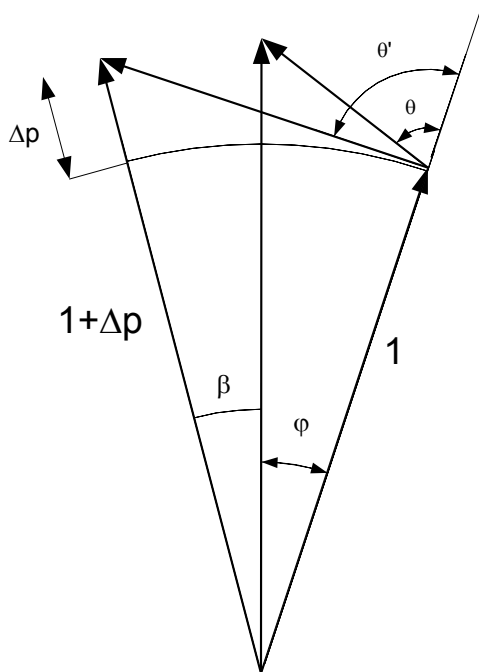
Figur 11. Jämförelse mellan crosseye-signalerna på antenn 1 och 2 i det fall då signalerna skiljer sig åt både i fas och amplitud på antenn 1 (till vänster). Vägskillnaderna från crosseye-antennerna till monopulsantennerna ger två geometriska fasskillnader ($\delta\varphi_1$ och $\delta\varphi_2$).

Ytterligare en faktor $1/(\Delta p^2 + \Delta \varphi^2)^{1/2}$ tillkommer medtanke på att man bara använder realdelen för att få en reell koefficient för styrning av roboten (Sherman 1984). Skillnadssignalens komponent som ligger vinkelrätt mot summasignalen bestäms enligt figuren av en projektfaktor $\Delta p/(\Delta p^2 + \Delta \varphi^2)^{1/2}$, så länge vinklarna är små.

Om man tar hänsyn till båda dessa korrektionsfaktorer och minns att fasskillnaden β fortfarande är proportionell mot avståndet mellan crosseye-antennerna, D , återfinner man Shermans formel för missavståndet. Det geometriska resonemanget är intressant, eftersom det återigen förklarar varför missavståndet enbart beror på avståndet mellan antennerna i ett crosseye-system.

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

Faktorn $D \cdot \cos \psi$ visar att avståndet mellan antennerna dessutom måste projiceras i robotens anfallsriktning om systemet skulle stå snett i förhållande till roboten.



Figur 12. Jämförelse mellan crosseye-signalerna på antenn 1 och 2 i det fall då signalerna skiljer sig åt både i fas och amplitud på antenn 1. Liksom förut svarar fasen β mot en mätning av avståndet D mellan crosseye-antennerna. Skenmållets läge beror på vinkeln mellan de båda korta skillnadspilarna eller deras skillnadssignal. För att förenkla den geometriska härledningen antar vi att den ena fasskillnaden till antenn 2, (antingen $\delta\varphi_1$ eller $\delta\varphi_2$) är noll.

Den geometriska proceduren visar hur känslig crosseye är för fas. Om fasskillnaden $\Delta\phi$ blir för stor kommer skillnadssignalen och summasignalen inte längre att ligga i fas som de ska göra för ett enda mål. Skillnadssignalen och summasignalen ligger då inte längre vinkelrätt mot varandra som i Figur 6. Det innebär att målsökaren har möjlighet att genomskåda skenmålet, ett förhållande som man enklast inser genom att studera figuren ovan.

Om fasskillnaden $\Delta\phi$ blir för stor kommer de båda summapilarna inte längre att vara lika långa. Radarmålsökaren kan lätt upptäcka detta, eftersom moderna målsökare har möjlighet att registrera båda signalerna separat. Målsökaren upptäcker att de båda signalerna som används i fasmonopuls inte som väntat är lika långa. Det kan vara svårt att tolka innebörden, eftersom signalernas styrka ofta varierar på grund av interferens, men man bör undvika denna möjlighet att avslöja vilseledningen med tanke på att signalstyrkan samtidigt går ner enligt formeln

Det krävs en detaljerad analys för att undersöka hur crosseye fungerar om signalerna inte ligger exakt i motfas, men det är klart att parametrarna måste väljas med omsorg som visas i följande avsnitt.

11. Parameterväl

11.1 Amplitud och fas

Den traditionella uppfattningen är att fasskillnaden och amplitudskillnaden bör ha extrema värden om crosseye ska fungera. Amplituderna antogs tidigare ligga mycket nära varandra, trots att det är svårt att åstadkomma i praktiken. Den geometriska analysen visar att det är onödigt. Det viktiga är att fälten ligger i motfas nära roboten, medan övriga villkor på fas och amplitud framgår av figurerna ovan och följande sammanställning (Falk 2004).

1. Amplitudskillnaden måste vara större än fasskillnaden (uttryckt i radianer) för att ge tillräcklig avböjning enligt formeln ovan.
2. Amplitudskillnaden och fasskillnaden måste vara små för att ge en rimligt stor felpkning.
3. Amplitudskillnaden får inte vara så liten att fluktuationer påverkar felpkningens storlek och riktning. Framför allt får skenmålet inte hoppa från sida till sida.

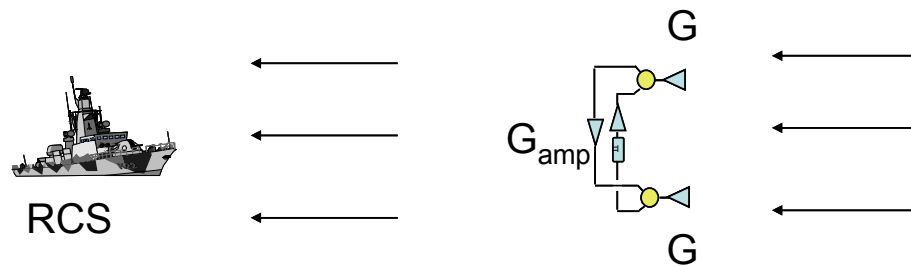
Det krävs noggrann planering för att uppfylla dessa krav i ett verkligt system. Den italienska firman Elettronica S.p.A. har använt simuleringar för att visa att felpkningen inte behöver vara extrem för att skydda en plattform mot robotar. Det kan räcka med måttliga värden, till exempel $\Delta p = 1/5$, för att ge ett tillräckligt missavstånd i praktiken,

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

Detta avstånd kan räcka för att skydda ett fartyg beroende på var antennerna står. Missanpassningen i fas (uttryckt i radianer) bör vara minde än Δp , det vill säga missanpassningen ska vara mindre än cirka 10° . Detta krav måste vara uppfyllt vid roboten och fluktuationerna i amplitud och fas måste vara mindre än dessa värden.

11.2 Signalstyrka

Det framgår av föregående avsnitt att summasignalen som registreras i målsökaren inte får vara för svag utan kunna måste hävda sig mot skrovekot. Tidigare beskrevs crosseye ofta 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 och det finns ingen anledning att minska signalen i onödan.



Figur 13. 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 13). För ett givet inflöde av radarstrålning jämför man den effekt som sänds tillbaka som radareko från en plattform med given radarmålyta (RCS) med vad crosseye-systemet kan åstadkomma i samma fall.

Den radareffekt som reflekteras som radareko från plattformen blir

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

Den effekt som sänds ut från crosseye-systemet i motsvarande fall 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 ligger i motfas och 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. Målet kan dessutom fluktuera, så för realistiska plattformar finner man en rätt nedslående siffra,

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

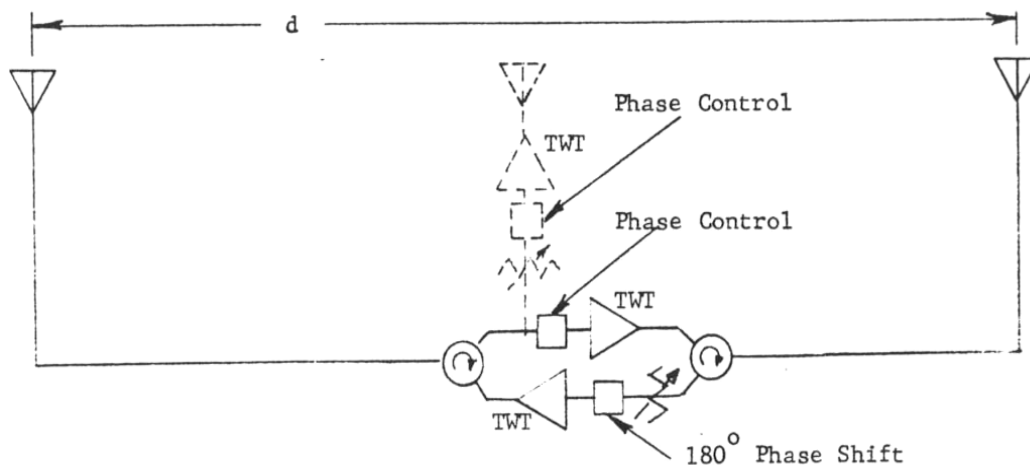
Formeln visar att ett crosseye-system bör ha hög antennvinst, G , och relativt stor förstärkning, G_{amp} , för att avlänka roboten. Det är till god hjälp om man väljer den nödvändiga felppekningen så noga att amplitudfaktorn Δp inte blir alltför liten.

Flygplan eller helikoptrar har typiska värden, $RCS = 10 \text{ m}^2$, som ger en total förstärkning omkring 80 dB

Ett större fartyg har ungefär $RCS = 1000 \text{ m}^2$, som kräver en förstärkning kring 100 dB.

Tidigare valde man gärna antenner med låg antennvinst, G , för att täcka en stor sektor. Finessen är att man kan möta flera robotar i en salva även om robotarna sänder på olika frekvenser. Följden blev helt orealistiska krav på förstärkarna och övriga komponenter. Den låga antennvinsten måste kompenseras med en enorm förstärkning, G_{amp} , för att uppväga den lilla amplitudfaktorn, Δp .

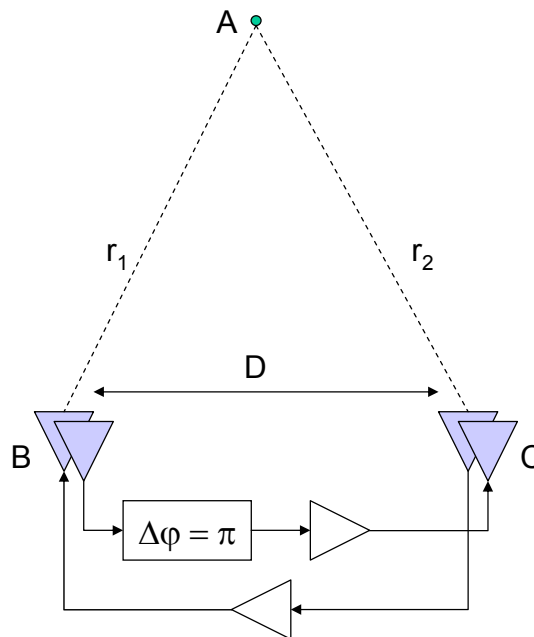
Man får stora problem så snart signalvägarna ska göras lika. Van Brunt visar en konstruktion med två cirkulatorer, som knappast kan ha tillräcklig isolering (van Brunt 1993). Finessen med denna konstruktion är att man använder samma antenner vid sändning och mottagning (figur 14).



Figur 14. Principen för ett crosseye-system med analoga komponenter (van Brunt 1993). Våglängden ABCA och ACBA skiljer sig med en halv våglängd som införs av en fasvridare. Svagheter i denna konstruktion är att cirkulatorerna inte kan ge tillräcklig isolering (Falk 2004)

12. Konstruktion av crosseye-system

FOI har ägnat stort intresse åt frågan hur ett crosseye-system ska konstrueras. Crosseye bygger på kompensation mellan två signaler. Det får inte införas några fasändringar i den ena signalen, t ex genom spridning från omgivningen, för då kommer roboten oundvikligen att dras mot plattformen.

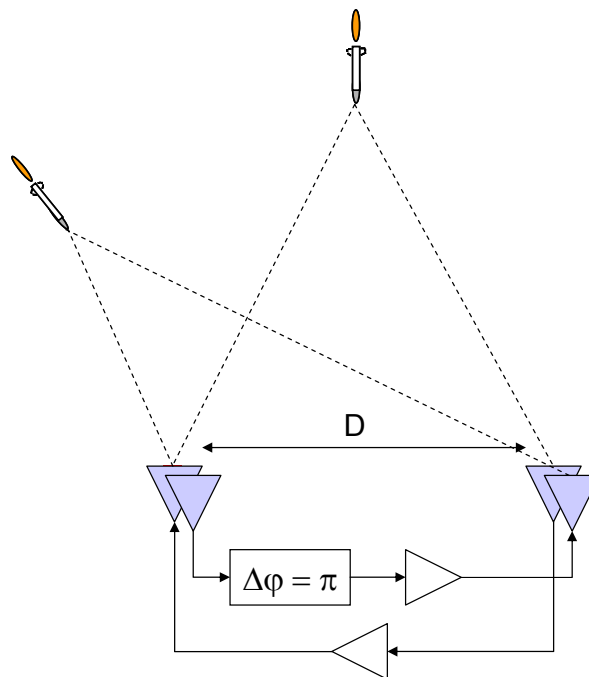


Figur 15. Principen för ett crosseye-system med analoga komponenter. Våglängden ABCA och ACBA skiljer sig halva våglängden som införs av en fasvridare. Sändning kan ske kontinuerligt till priset av att separata antenner används för sändning och mottagning.

Interferensen är synnerligen känslig för fas. För att signaler i motfas ska mötas nära roboten brukar crosseye-system med analoga komponenter utformas så att strålarna har lika långa vägar i alla avsnitt (Figur 15). Denna eleganta geometriska lösning utnyttjar det faktum att en väg är lika lång åt båda hållen. Enligt lagen om strålgångens omvändbarhet blir fasändringarna lika stora åt båda hållen, men det är inte uppenbart att samma resonemang gäller för radiovågor. Full omvändbarhet måste kunna garanteras också i ledningarna och antennerna. Det senare är svårt, eftersom man gärna vill använda samma antenner för sändning och mottagning. En rad förslag till lösningar finns publicerade, men många fungerar bevisligen inte, t ex van Brunts (van Brunt 1993).

12.1 Analoga komponenter

Det enklaste sättet att garantera signalens omvändbarhet är att låta en våg röra sig längs en enda ledning eller två lika långa. Man kan skapa ett crosseye-system genom att använda omvändbara (reciproka) komponenter arrangerade som nedan.



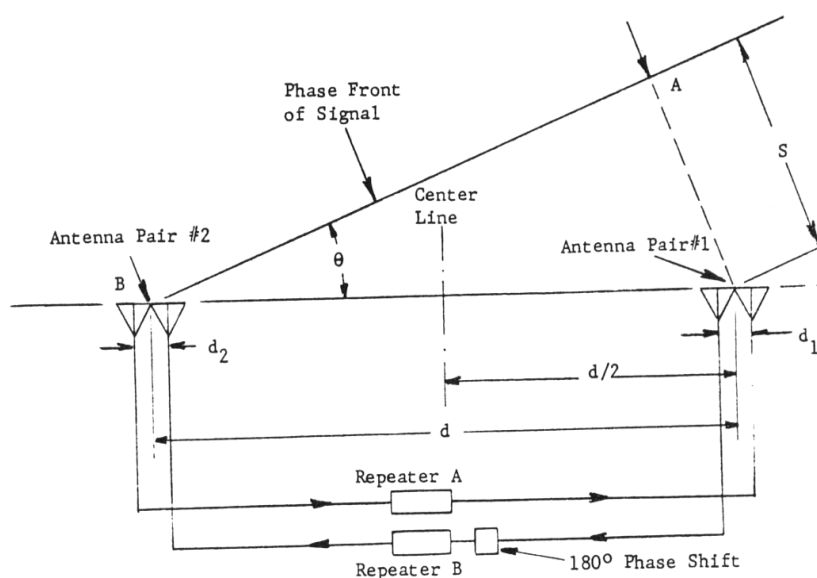
Figur 16. Ett analogt crosseye-system med goda förstärkare kan i princip möta ett anfall av flera robotar samtidigt.

Systemet kan möta robotar från godtycklig anfallsriktning genom att ta emot signalen i en antenn och sända ut den genom den andra (se Figur 16). Denna eleganta metod garanterar att fasskillnaden tas upp vid snett infall och kompenseras när den andra signalen löper samma väg åt andra hållet (se Figur 17). Den geometriska effekten garanterar att inga nya fasskillnader förs in, men en noggrannhet på några få grader i fas krävs enligt tidigare resonemang.

Ett crosseye-system byggt med analoga komponenter enligt denna princip klarar flera robotar samtidigt, om förstärkarna är tillräckligt bredbandiga och linjära. Ursprungligen tänkte man sig att ett sådant system med breda antennlobar som belyser alla inflygande robotar inom en bred sektor. Det innebär ett enormt slöseri med energi och förstärkarna och cirkulatorerna klarar knappast ett sådant krav.

12.2 Separata mottagare och sändare

Under årens lopp har många fantasifulla förslag kommit som utnyttjar den geometriska principen (van Brunt 1995). Sändar- och mottagarantennerna kan vara åtskilda, men de måste vara belägna så nära varandra att inte uppstår några betydande fasskillnader.



Figur 17. 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 nödvändiga isolation som krävs för att hindra en signal från att gå "baklänges" genom systemet. Vandringsvågrör (TWT) har prövats, men förstärkningen måste vara lika stor åt båda hållen. Det är ett besvärligt villkor när rören har amplitudberoende fasingång (Falk 2004).

En modern konstruktion kräver säker funktion och korta förberedelsetider, d v s ingen uppvärmning av rören. Det är bättre att använda halvledarkomponenter för att uppnå hög stabilitet och precision och samtidigt lagra radarsignalen i ett DRFM. Exakt samma signal kan därefter matas till sändarantennerna med korrektion för fasen.

Riktningen till målet måste definieras ytterst noga för att ge rätt fas. Kravet följer ur en enkel uppskattning för separata antenner. De fasskillnader som uppträder om sändare och mottagare är skilda med ett litet avstånd x ges approximativt av vägskillnaden som

beror på avståndet R till roboten. Fasskillnaden får inte vara mer än några grader. Det innebär att vägskillnaden högst får vara en hundraedels våglängd, $\lambda/100$.

Villkoret innebär att $x^2/R < \lambda/100$, vilket för realistiska robotavstånd leder till en förvånansvärt högt värde på det acceptabla avståndet mellan sändare och mottagare i fria rymden. Villkoret är att det inte får finnas några begränsningar i form av spridning från omgivande terräng.

$$x = 0.1 \cdot \sqrt{\lambda R} \approx 0.3m$$

De största problemen uppstår om man måste ta hänsyn till de vågor som sprids från närliggande delar av terrängen. Sådana signaler kommer att uppträda i samma vinkel och följelucka som den reflekterade signalen från målet och crosseye-signalen, eftersom vägskillnaden sällan blir stor. För avståndet ut till en spridningspunkt som ligger inom en lob på några grader finner man en radie på cirka 20 meter. Det innebär att spridda signaler kan komma från ett mycket stort område och i allmänhet helt ur fas.

Dessa beräkningar visar att många förslag som presenterats i den äldre litteratur skulle kunna fungera om de verkar i fri rymd eller spridningen är försumbar. Denna slutsats stämmer med de praktiska erfarenheterna från försök utförda av FOI. Försöken lyckades bara över vatten under lugna förhållanden och om systemet befann sig på viss höjd över marken (Eneroth et al. 2002).

12.3 Reciprocitetssatsen

Motsvarigheten till strålgångens omvändbarhet i vågteorin är reciprocitetssatsen. Med tanke på att radarmålsökare och crosseye-system måste fungera i skiftande väderlek och miljöer behövs det en allmän princip som garanterar funktionen. Reciprocitetssatsen garanterar att crosseye kan fungera även under komplicerade förhållanden (Falk 1999).

Analoga komponenter, av den typ som beskrivits ovan, är ofta reciproka eftersom de innehåller reciproka komponenter. Crosseye fungerar i sådana system, om det inte förs in några nya fasskillnader mellan de signaler som ska kompensera varandra, t ex genom separata sändar- och mottagarantennar. Effekten av crosseye beror på om signalerna tillförs samma fasskillnad (Falk 1999, 2002).

I stället för lagen om strålgångens omvändbarhet kan man använda reciprocitetssatsen för elektromagnetiska vågor som utgångspunkt (Falk 2001). Den garanterar att signaler som sänds ut och tas emot av två antenner alltid är lika om matningen kastas om. 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 kan formuleras som följer (Falk 1999).

1. Ekvationerna för elektromagnetiska vågor är linjära och invarianta under tidens omvändning;
2. Mediet är linjärt (superpositionsprincipen gäller);

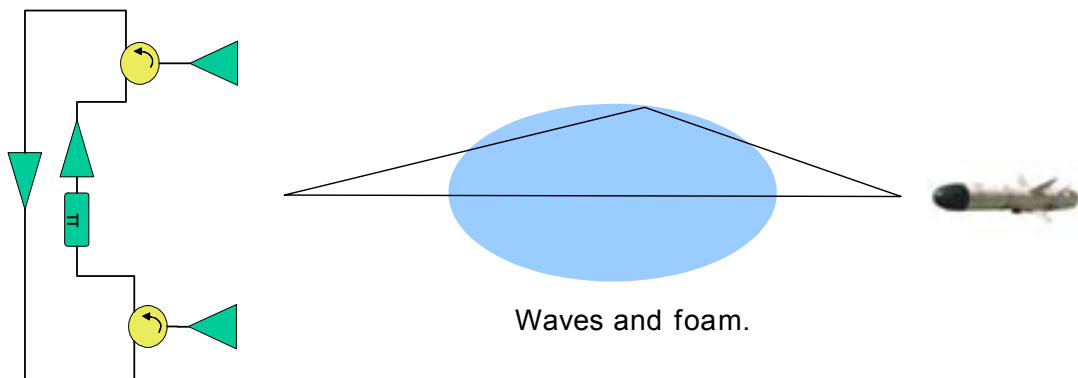
3. Energiförluster i mediet är linjära funktioner av fältet;
4. Läget är stationärt under vågutbredningen.

Det sista villkoret visar att crosseye inte duger för att vilseleda torpeder. Ljudvågornas utbredning är för långsam för att läget ska vara oförändrat under utbredning fram och tillbaka från torpedens målsökare. Radarvågor är en miljon gånger snabbare än ljudvågorna: en enkel uppskattning visar att inga ändringar i mediet hinner påverka radarvågornas utbredning i detta fall (Falk 1999).

13. Inverkan av spridning

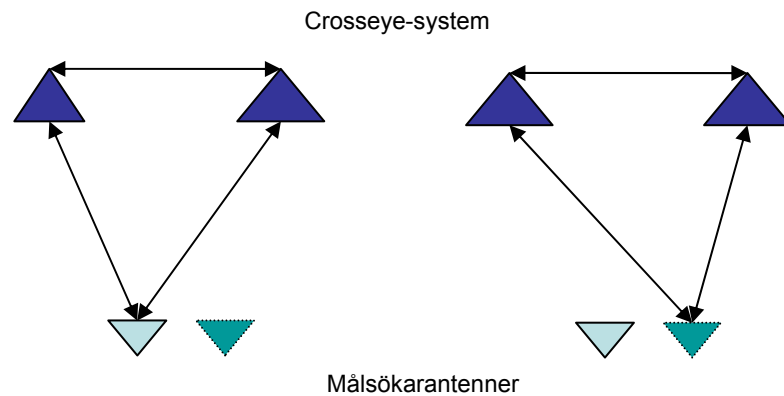
13.1 Reciprocitet

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 sprids radarsignalen från vattenvågor och skum, eftersom en sjörobot ofta anfaller på låg höjd.



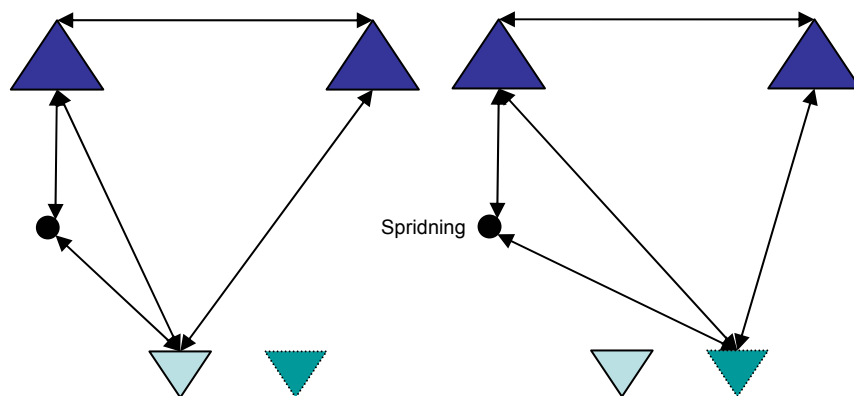
Figur 18. Spridning av radarvågor mot vattenvågor och skum kan påverka funktionen av ett crosseye-system.

För att kunna tillämpa reciprocitetssatsen definierar vi en målsökare där gångvägarna blir exakt lika långa. Ett sådant "idealiskt monopolssystem" kan skapas genom gammaldags lobväxling, om man också sänder genom den antenn som används som mottagare (Figur 19). Funktionen hos ett sådant "idealiskt monopolssystem" skiljer sig i praktiken inte från andra typer av monopol, men illustrerar principen för crosseye.



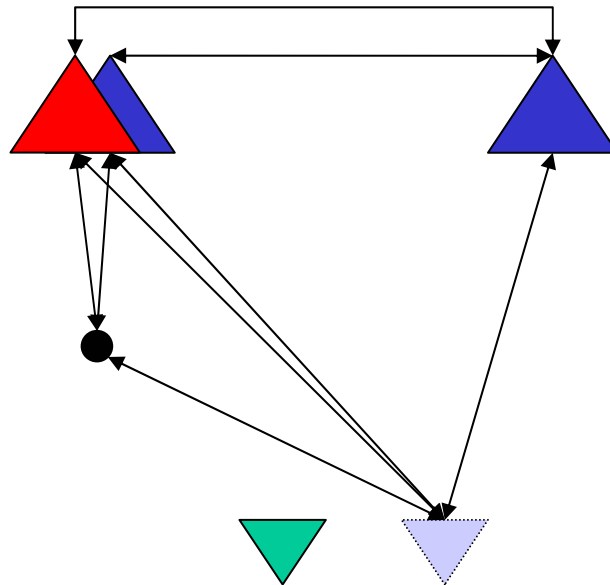
Figur 19. Ett idealiskt monopolssystem för analys av crosseye-principen. Genom lobväxling garanteras att utbredningsvägarna är lika långa åt båda hållen under mätningen.

Om en spridare påverkar radarvågens utbredning behöver detta inte påverka crosseye-systemets funktion, eftersom alla fasskillnader blir lika stora åt båda hållen i ett idealt reciprokt crosseye-system. Mellan målsökaren och crosseye-systemet garanteras omvändbarheten av reciprocitetssatsen.



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

Detta villkor ger också möjlighet att analysera under vilka förhållanden crosseye fungerar och vilka begränsningar som ligger på konstruktionen och valet av komponenter.



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

Alla verkliga system innehåller någon form av icke-reciprocitet. Den illustreras här av att fascentrum för en antenn är något förskjutet mellan sändning och mottagning. Fascentrum bestämmer funktionen hos ett crosseye-system som är utsatt för spridning. Om spridningen kommer från ett område utanför strålbana, till exempel en speglande vattenyta, ger den ett bidrag till fältet som inte är reciprokt i mottagaren. Det är lätt att se att mycket små förskjutningar, särskilt framåt eller bakåt, kan påverka fasrelationen. Frågan är hur stort bidraget från spridning måste vara för att påverka skenmålet.

13.2 Kvantitativa resultat för spridning

Konstruktionen av ett crosseye-system handlar i hög grad om hur man skall upprätthålla det extrema kravet att signalerna ska ligga i motfas nära roboten. För att uppskatta hur mycket energi som får spridas mot en vattenyta eller i terrängen när en robot anfaller mot mål på ytan förfar vi på följande sätt.

Den mängd energi som passerar från en punkt till en annan kan uppskattas ur effekttätheten och storleken på första Fresnel-zonen (Landau och Lifshitz 1973). För en radarstråle ligger den maximala radien för första Fresnel-zonen omkring mittpunkten mellan mål och mottagare. För en robot kan denna radie grovt uppskattas som

$$r = \sqrt{\lambda R}$$

Här är r radien för första Fresnel-zonen och λ är våglängden samt R avståndet mellan mål och mottagaren. För typiska värden finner vi att

$$r = \sqrt{0.01 \cdot 10000} = 10 \text{ m.}$$

Ytan av den första Fresnel-zonen kommer alltså att bli omkring 300 m². Man kan nu jämföra detta värde med en signal som går utanför huvudstrålen och sprids tillbaka mot en mottagarantenn. En sådan signal tävlar med crosseye-signalen som är försvagad med faktorn Δp^2 på grund av kompensation mellan två komponenter. Givet att $\Delta p \approx 0.2$ finner vi att en ren reflex från en yta på några få kvadratmeter, till exempel från en vattenvåg, skulle kunna vara stark nog att interferera med huvudsignalen.

14. Slutsatser

Crosseye-störning är en metod som är känslig för fel i amplitud och fas. Den påverkas av spridning från omgivande hinder, i synnerhet reflexer från vattenytor. Inverkan beror på konstruktion och val av parametrar. Konstruktion med analoga komponenter som tidigare redovisats i litteraturen är bristfällig, men det är möjligt att konstruera ett crosseye-system som utnyttjar halvledarförstärkare och antenner med måttlig antennvinst.

Inverkan av spridning kan minimeras genom att tillämpa reciprocitets-principen på alla avsnitt i systemet. Störning med crosseye-system kan lyckas även vid spridning i komplicerade miljöer, till exempel nära havsytan om crosseye-systemet är nära reciprokt. Hur noga komponenterna ska väljas beror på typen av spridning.

Många praktiska överväganden är viktiga för funktionen, bland annat

- måttligt avstånd mellan antennerna
- användning av halvledarkomponenter och digitala minnen
- användning av elektriskt styrda gruppantenner
- reglering av förstärkarna så att amplitudmättnings inte uppstår, eftersom lineariteten är viktig
- signalen måste snabbt kunna kopplas bort vid fel i komponenterna.

15. Erkännande

Ett varmt tack till Anders Eneroth som bistått mig vid alla stadier av författandet av denna rapport. Jag vill också tacka Per Hyberg för hans inspirerande pionjärarbete samt Claes Arvidsson och Sven Berglund för hjälp med det experimentella arbetet.

Utbyte av erfarenheter med Elettronica har varit till ovärderlig nytta. Möten med Alfredo Bacchelli, Filippo Neri, Vittorio Rossi och Andrea Di Martino har varit en ständig stimulans under arbetet.

16. 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: Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning (FOI-R--1250--SE, Juni 2004).
- [13.] 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).
- [14.] Falk, Lars: "Inverkan av vågutbredning på crosseye-störning", FOI-R--1250, juni 2004.
- [15.] Lars Falk, Claes Arvidsson, Sven Berglund, Anders Eneroth: Crosseye jamming of monopulse radar. RadioVetenskap och Kommunikation,

RVK 05, Linköping, Sweden, 14 – 16 June 2005, sid. 205-210 (FOI-S--1803--SE).

- [16.] Lars Falk, Claes Arvidsson, Sven Berglund, Anders Eneroth: "Simple Derivation of Crosseye Jamming Principles", MilTech 2 Conference, Stockholm 25-26 October 2005, pp.93-100. (FOI-S--1839--SE).
- [17.] Wayne P. Hughes: Fleet tactics: Theory and Practice. (Naval Institute Press, 1986).
- [18.] Per Hyberg: Kompendium i Radarmotmedelsteknik FOA Rapport A 10052-1.1, december 1993.
- [19.] L.D.Landau and L.M.Lifshitz, The Classical Theory of Fields, 4th ed. (Pergamon Press, London, 1975).
- [20.] Filippo Neri: Introduction to Electronic Defense Systems (Artech House 1991).
- [21.] Filippo Neri: Experimental testing on cross-eye jamming (AOC Conference, Las Vegas, 2000).
- [22.] Filippo Neri: Cross-Eye and other Angle Jamming Techniques (EW Course, AOC 2003).
- [23.] Samuel M. Sherman: Monopulse Principles and Techniques (Artech House 1984).
- [24.] Sandy Woodward: Ett hundra dagar. Striden om Falklandsöarna. (Marinlitteraturföreningen nr 77, 1994).

