

Telekrigföring

4

Signalspaning

Utrustning för att detektera radarsignaler är en nödvändighet inom elektronisk krigföring. Sådan utrustning ingår t ex i radarvarnare i ett flygplans motverkanssystem, målsökaren i signalsökande robotar, störkapslar samt hos olika typer av flyg-, sjö- och markbaserade signalspaningsförband. Signalspaningsutrustningens känslighet, storlek och komplexitet kan variera men principerna är de samma.

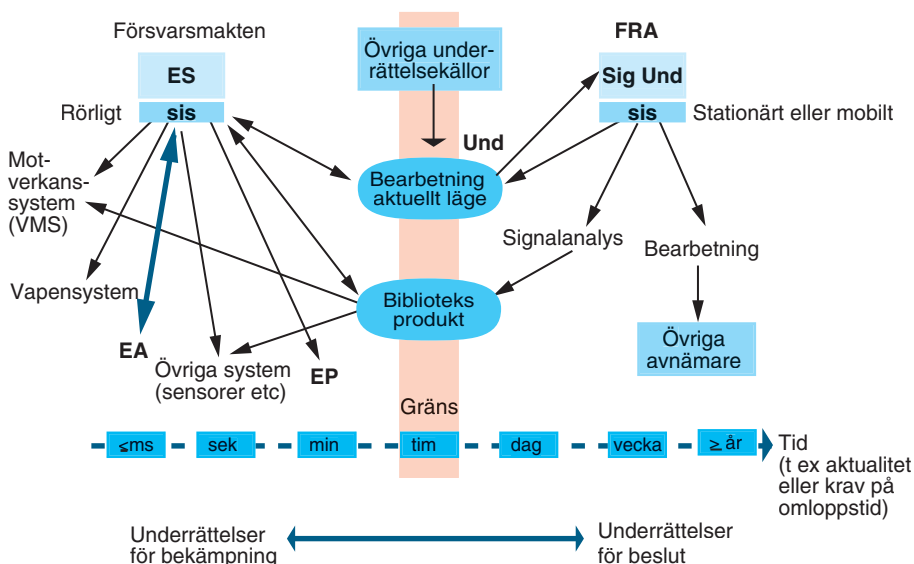


Bild 4:1. Skillnad mellan elektronisk stödverksamhet (ES) och signalunderrättelsetjänst (SigUnd).

Man skiljer mellan elektronisk stödverksamhet (ES) och signalunderrättelsetjänst (SigUnd). ES bedrivs av försvarsmakten och kan framförallt sägas vara inriktat mot åtgärder för bekämpning och skydd mot bekämpning. Signalunderrättelsetjänst bedrivs av Försvarets Radioanstalt (FRA) och består i att skaffa underrättelser för beslut samt inhämta tekniska underrättelser angående emittörars tekniska prestanda. ES och SigUnd skiljer sig åt vad avser syften och tidsförhållanden.

Elektronisk stödverksamhet

Elektronisk stödverksamhet är åtgärder för att stödja pågående verksamhet genom att upptäcka, identifiera och lokalisera elektromagnetiska källor för att ge underlag för elektronisk attack och elektronisk protektion. Verksamheten ger också omvärldsuppfattning i realtid inklusive identifiering och lägespresentation samt understöd av underrättelsetjänsten men omfattar inte SigUnd. Elektronisk stödverksamhet omfattar bl a

- signalspaning mot kommunikationsnät (KOMmunikationsSignalspaning, KOS) inklusive att fysiskt ansluta i dessa nät.
- signalspaning mot övriga typer av elektromagnetiska emitterar (TEknisk Signalspaning, TES).

Detta kapitel kommer i huvudsak vara inriktat mot TES mot radarstationer.

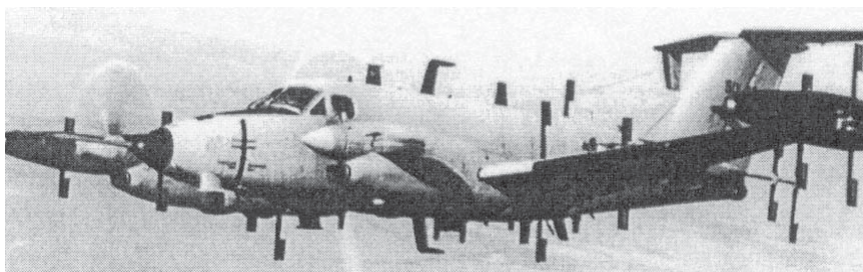


Bild 4:2. RC-12 Guardrail, USA. System för taktisk kommunikations- och radarsignalspaning,

Signalunderrättelsetjänst (SigUnd)

Signalunderrättelsetjänst är strategisk och operativ underättelseverksamhet som genom inhämtning via signalspaning syftar till att fastställa motståndarens verksamhet och tekniska prestanda. Signalunderrättelsetjänst tillhör funktionen underrättelsetjänst.

SigUnd ger information som har giltighet under längre tid än vad ES normalt ger.

En viktig uppgift för signalunderrättelsetjänsten är att stödja uppbyggnaden av de signalbibliotek (emitterbibliotek) som ingår i t ex ett flygplans radarvarnare eller störkapslar.

Det svenska begreppet SigUnd är jämförbart med det engelska begreppet SIGINT (Signal Intelligence).

Radarsignalspaning

Resterande del av kapitlet kommer att visa på vilken typ av information som signalspaning kan ge om ett förbands radarstationer.

Signalspaning med operativ/taktisk inriktning syftar bl a till att följa motståndarens rörelser och därmed stödja t ex den egna luftlägesbilden. Grunden är att olika signaler är kopplade till sina sändande plattformar. Har en viss signal uppfattats kan man ofta lägesbestämma målet och vet därmed vilken typ av flygplan eller fartyg man har att göra med. I sin enklaste form kan signalspaningen bestå av en radarvarnare. Denna mäter in de strålade delarna av motståndarens vapensystem och kan därmed lämna underlag för att bedöma dess prestanda samt kunna anpassa egna vapen, motmedel eller taktik för att vinna duellen.

Som utrustning för signalspaning brukar räknas dels egentliga spanande radio- och radarsignalspaningsmottagare vilka transporteras av särskilda signalspaningsflygplan, fartyg m m (Sig Und) dels system med uppgift att ge varning för ett aktuellt hot (t ex radarvarnare och laservarnare) (TES). De egentliga signalspaningssystemen har högre känslighet och kan fastställa fler parametrar än vad en radarvarnarutrustning klarar av. Ju mer avancerad signalspaningsutrustningen är desto fler parametrar kan den bestämma och desto högre blir noggrannheten.



Bild 4:3. Signalspaningsfartyget Orion.

Metodiken som signalspaningsutrustningarna använder, för att skapa ordning i detta skenbara kaos, är att sortera signalerna efter särskiljande parametrar. Pulserna beskrivs normalt med de så kallade primära pulsparametrarna (det krävs endast en puls för att bestämma dessa parametrar)

- ankomsttid
- pulslängd
- bärfrekvens

4. Telekrigföring

- amplitud
- infallsriktning.

Användbara för pulssortering är framförallt bärfrekvens, infallsriktning och pulslängd.

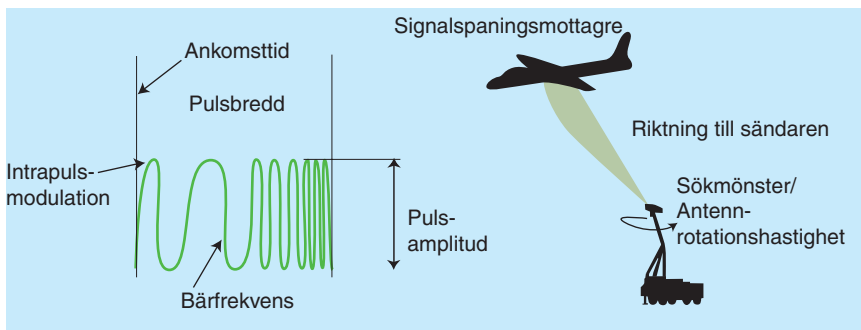


Bild 4:4. Exempel på parametrar som en signalutrustning kan bestämma.

Andra egenskaper hos en radarstation som signalspaning kan bestämma (kräver två eller betydligt fler pulser) är

- pulsrepetitionsfrekvens
- sökmod (t ex rundsökning, sektorsökning)
- vinkelföljningsmetod hos eldledningsradar (t ex monopuls, lobnutation)
- antenndiagram.

Den uppmätta signaldatan kan ge värdefull information om radarstationerna. Både hur de tekniskt fungerar men också hur de utnyttjas taktiskt. Exempel på slutsatser:

- typ av radar
- radarmod
- position
- störskyddsegenskaper
- avståndsupplösning
- vinkelupplösning.

Information från signalspaning

Här redovisas några exempel på vilken information som signalspaning kan ge om en radarstation.

Frekvens och frekvensväxlingsmöjligheter

Om signaldisciplinen hos personalen vid radarn är dålig kan signalspaningsutrustningen snabbt fastställa hur ofta radarn kan byta frekvens och mellan

vilka frekvenser den kan hoppa. Denna information kan utnyttjas för att styra en störsändare så att optimal störverkan uppnås.

Intrapulsmodulation (Pulskod)

Signalspaningen kan genom analys ta fram vilken pulskod som en pulskompressionsradar använder. Om störutrustningen kan störsända med signaler med rätt pulskod krävs det avsevärt mindre störeffekt.

Vinkelupplösning

Om signalspaningsutrustningen mäter hur signalstyrkan från en vanlig spaningsradar varierar med tiden så kan radarns antenndiagram och antennotationshastighet fastställas. Antenndiagrammet visar hur bred huvudlob radarn har. Huvudlobens bredd begränsar radarns vinkelupplösning, dvs hur nära varandra två mål måste flyga för att radarn ska uppfatta dem som ett enda mål.

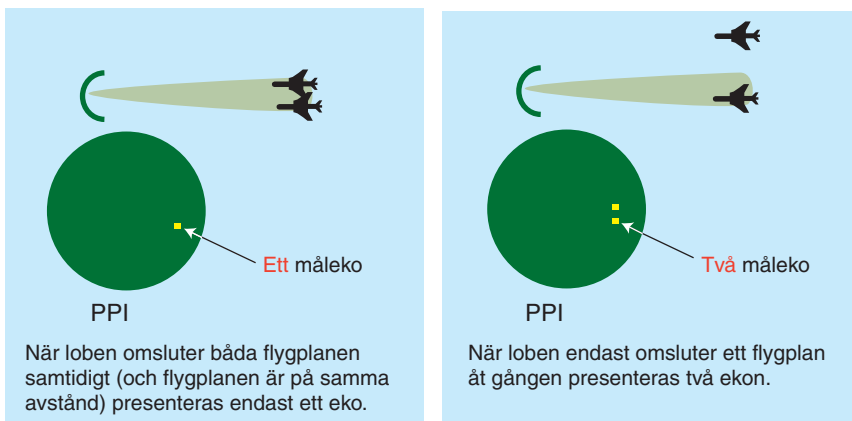


Bild 4:5. Genom att mäta huvudlobens bredd kan radarns vinkelupplösning bestämmas.

Störkänslighet i olika riktningar

Antenner är reciproka dvs de uppför sig likadant vid sändning som vid mottagning. Om radarn använder samma antenn vid sändning som vid mottagning ger antenndiagrammet viss kunskap om hur känslig radarn är för störning från olika riktningar. (Se kap 3.)

Avståndsområde

En signalspaningsutrustning kan relativt enkelt fastställa radarns PRF. Spaningsradar är oftast s k LPD-radar (Low PRF PulsDoppler) dessa radar utmärks av att de har entydig avståndsmätning. Det innebär att de inte sänder ut nästa puls förrän den förra hunnit färdas till mätområdets yttersta

gräns och tillbaka. Genom att mäta hur långt det är mellan LPD-radarns pulser kan man beräkna vilket avståndsområde radarn är inställd på. Många radarstationer har olika pulslängd beroende på vilket avståndsområde som används. I dessa fall räcker det med att bestämma pulslängden för att veta avståndsställningen. En motståndare vet då hur nära han kan flyga en viss radar före han måste starta sina störsändare (förutsatt att radarn inte byter mätområde).

Radarstationen som använder MPD (Medium PRF PulsDoppler) eller HPD (High PRF pulsDoppler) har så hög PRF att radarstationerna inte är entydiga i avstånd.

Mot dessa typer av radar kommer inte en enkel mätning av PRF:en att tala om vilket avståndsområde som radarn för tillfället utnyttjar. Exempel på radar som använder MPD eller HPD är moderna jakt- och attackflygplan samt UndE 23 (MPD i 100 km mod).

Avståndsupplösning

Med en radars avståndsupplösning menas hur nära varandra, i avståndsled, som två mål måste flyga för att radarn ska uppfatta dem som ett mål. För en vanlig pulsradar är avståndsupplösningen lika med halva pulslängden. Pulslängden är ibland enkel att bestämma för en signalspaningsutrustning. Hos en pulskompressionsradar bestäms inte avståndsupplösningen av pulsens längd. Man kan matematiskt visa att en radars avståndsupplösning bestäms av bandbredden på den utsända pulsen. Genom att mäta signalens bandbredd kan signalspaningsutrustningen fastställa radarns avståndsupplösning. Även hos en FMCW-radar (t ex PE 542) bestäms avståndsupplösningen av signalens bandbredd, man kan därför bestämma även dessa stationers avståndsupplösning genom signalens bandbredd.

Typ av radar och radarmod

Varje typ av radar har olika karakteristiska parametrar. Ju fler parametrar en signalspaningsutrustning kan mäta desto större möjligheter har den att bestämma vilken typ av radar det är. Enklare utrustningar nyttjar främst radarns frekvens och PRF för att fastställa vilken typ av radar det är som sänder.

Det är viktigt att bestämma vilken mod en radar för tillfället använder sig av. En eldledningsradar i spaningsmod utgör ett mindre hot än då den låst på flygplanet. Mängden moder är ofta stort hos en radar. Alla olika kombinationer av t ex pulslängd, PRF och pulskod bör egentligen finnas lagrade i hotbiblioteken för att avgöra om stationen för tillfället bör störas eller inte.

Man ska notera de svårigheter som uppstår eftersom en radarvarnare behöver en viss tid för att söka i signalbiblioteket och därefter koppla till åtgärdsbiblioteket. Detta innebär att antalet variabler i biblioteken måste begränsas till de mest troliga.

Lägesbestämning

Signalspaning kan möjliggöra för en motståndare att lägesbestämma luftvärnets radarstationer.

Lägesbestämning av radarstationer ger exempelvis möjligheter till

- omvärldsuppfattning
- invisning eller förvarning av luftvärnssystem
- underlag för när och i vilken riktning ett flygplan ska göra undanmanöver
- rikta in störsändare för att kunna minska störsändarens effektbehov s k power management
- invisning av signalsökande robotar
- möjligheter till insats med precisionsstyrda vapen eller indirekt eld.

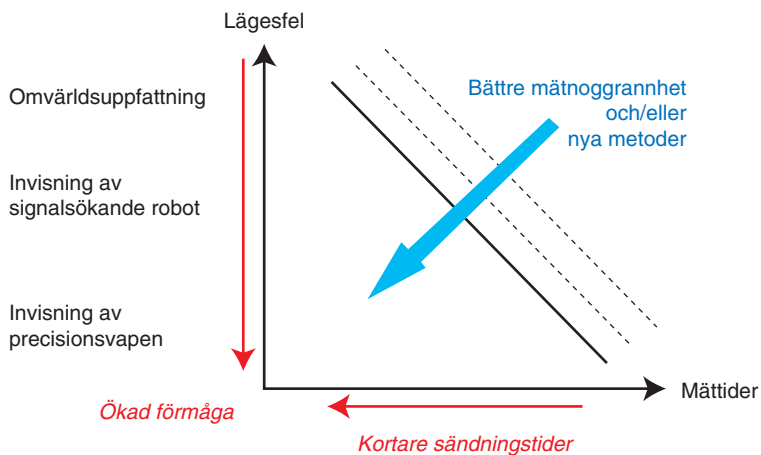


Bild 4:6. Då radarstationernas sändningstider minskas ställs krav på att lägesbestämningen sker snabbt och med hög precision för att precisionsvapen ska kunna utnyttjas för att slå ut sändarna. (FOI)

Under kriget i det forna Jugoslavien blev det uppenbart för de allierade att det var mycket svårt att med signalsökande robotar slå ut ett mobilt luftvärn som använde korta sändningstider med radarstationerna. I detta krig var de serbiska luftvärnsenheterna ett potentiellt hot under hela konflikten. Förbrukningen av signalsökande robotar var hög och alltför stor del av flygresurserna bands för SEAD-uppgifter. En slutsats av kriget var att flygstyrkorna i framtiden strävar efter att snabbt kunna lägesbestämma det fientliga luftförsvarets sändare med så hög precision att det kan slås ut med andra typer av precisionsvapen än signalsökande robotar. Om detta är möjligt utökas tidsintervallet där en attackinsats kan slå ut en radarstation från att vara begränsad av radarns sändningstid till att begränsas av radarns omgrupperingstid, vilken ofta är många storleksordningar längre.

Rikttningsbestämning och triangulering

En radar har inte möjlighet att manipulera infallsriktningen på sina signaler till skillnad mot andra parametrar t ex frekvens som kan variera från puls till puls.

Triangulering innebär att genom rikttningsmätningar från minst två platser bestämma en sändares position. Inom luftvärnet benämns metoden oftast krysspejling. Triangulering kan ske genom samverkan av två eller flera inmätare eller genom att signalspaningsplattformen själv flyger längs en pejlbas. Den senare metoden benämns egentriangulering.

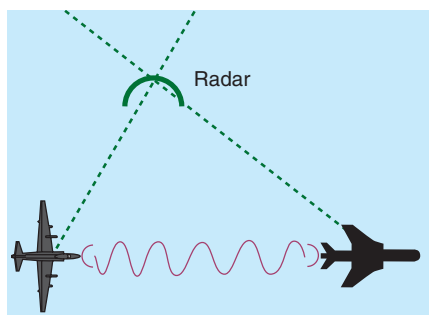


Bild 4:7. Triangulering från två olika flygplan. Data utbyts via en kommunikationslänk mellan flygplanen

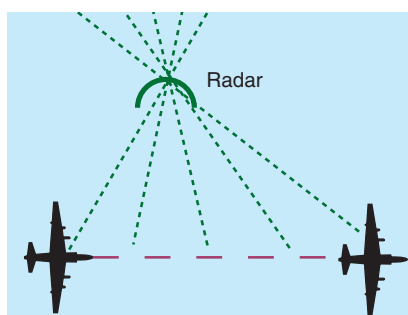


Bild 4:8. Eigentriangulering. Genom att flygplanet vid upprepade tillfällen bestämmer egen position och riktningen till sändaren kan dess position bestämmas.

Noggrannheten vid krysspejling bestäms av

- rikttningsmätningarnas antal och positioner, relativt varandra och emittern
- noggrannheten i rikttningsmätningarna
- förmågan att bestämma egen position (dvs signalspaningsutrustningens).

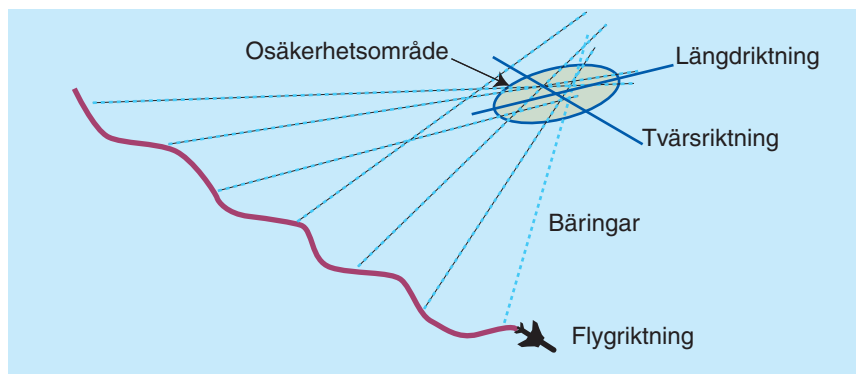


Bild 4:9. Vid all krysspejling fås ett osäkerhetsområde.

Den ideala kryssvinkeln ur noggrannhetssynpunkt är 90° . När vinkeln till emittern blir liten minskar lägesbestämningens noggrannhet i avståndsled. Detta är ett särskilt stort problem vid egentriangulering där det tar tid att flyga en sträcka som ger en bra pejlbas. Noggrannheten i riktningsmätningarna påverkas av signal/brusförhållandet och möjligheterna att medelvärdesbilda flera mätningar. Vilket i princip motsvarar en höjning av signal/brusförhållandet. Svårigheterna att korrekt bestämma positionen hos sändaren ökar normalt ju kortare sändningstid radarstationen utnyttjar.

Metoder att riktningsbestämma en sensor

För att bestämma riktingen till en sändare kan följande principer användas

- lobmaxpejling
- amplitudmonopuls
- interferometri.

Lobmaxpejling

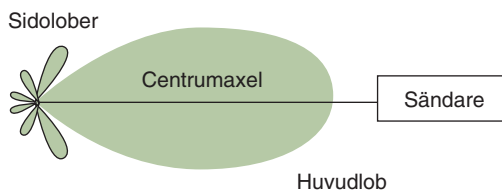


Bild 4:10. Lobmaxpejling. Riktingen till sändaren är den riktning där antennen mottar starkast signal.

Lobmaxpejling innebär att riktingen till sändaren fås genom att bestämma i vilken rikting signalspaningsmottagaren mottar högst effekt. Sändaren befinner sig då mitt i signalspaningsantennens huvudlob. Metoden kräver tillgång till en antenn med en rörlig lob med riktverkan. För att få godriktverkan hos en antenn krävs att antennen är stor i förhållande till våglängden (se kap 3). Lobmaxpejling är den metod som används av luftvärnets spaningsradar då de bestämmer riktingen till en störsändare. Inom radar-signalspaning förekommer lobmaxpejling på större flygplan med SigUnd-uppgifter och på fartyg medan metoden är ovanlig på små taktiska flygplan. Utvecklingen av elektroniskt styrda antenner kan dock i framtiden göra att metoden börjar användas även på mindre flygplan.

En nackdel med lobmaxpejling är att det krävs en avsökning av rummet och att detta innebär att det tar tid att förflytta antennloben. Systemet blir därför inte momentant varför det finns risk att signaler ej hinner upptäckas.

En fördel med riktantennen är att den ofta höga antennförstärkningen förbättrar systemets känslighet.

Amplitudmonopuls

Amplitudmonopuls är den vanligaste principen för riktningsbestämning i flygburna radarvarnare. Normalt används fyra antenner med de ca 90° breda huvudloberna centrerade i riktningarna $\pm 45^\circ$ och $\pm 135^\circ$ i vingplanet.

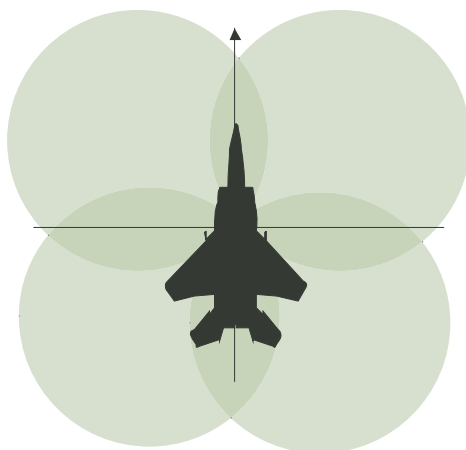


Bild 4:11. Amplitudmonopuls. Riktningen fås genom att jämföra signalstyrkan från de fyra antennerna.

Infallsriktningen fås vid amplitudmonopuls genom att inbördes jämföra de signaleffekter som mottagits i de fyra antennerna.

Med exponentiellt formade lober gäller ett linjärt förhållande mellan ankomstsvinkel i t ex grader och effektkvot i dB.

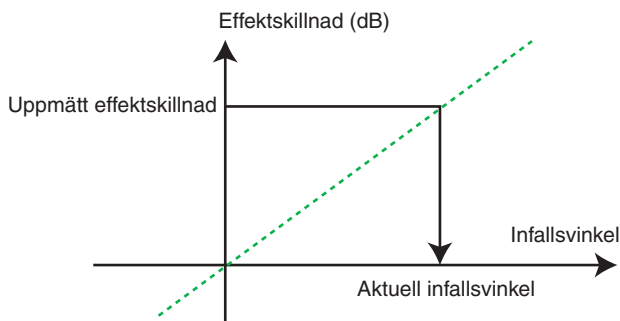


Bild 4:12. Vid amplitudmonopuls med "vanliga" (gauss) lobformer blir det ett linjärt samband mellan infallsvinkel och uppmätt effektskillnad (dB) eller effektkvot (ggr).

Den mottagna signaleffekten kan användas för att få en grov uppfattning av avståndet till sändaren, förutsatt att sändarens uteffekt är känd.

Riktningsnoggrannheten hos en radarvarnare med fyra antenner är ofta i storleksordningen 7° - 10° . Riktningsfelet orsakas bl a av

- bristande amplitudmatchning mellan antenner och mottagarkanaler
- avvikelser i lobform eller lobinriktning
- lågt signal/brusförhållande.

Interferometri

Vid interferometri bestäms riktningen till emittern genom att mäta den fasskillnad som uppstår mellan två antenner eftersom vägen har olika lång väg till antennerna.

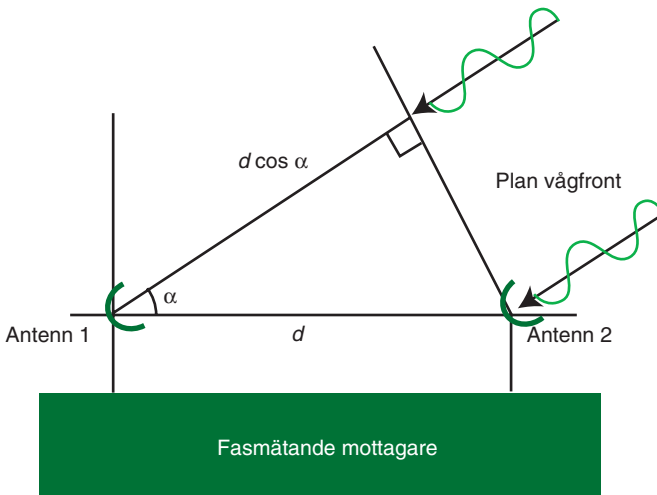


Bild 4:13. En interferometer kan bestämma infallsvinkeln till en emitter genom att utnyttja den resulterande fasskillnaden mellan två antenner är beroende av infallsriktningen. Fasskillnaden beror även av avståndet mellan antennerna och emitterns våglängd (frekvens). (FOI)

En infallande plan vågfront ger vid de två antennerna upphov till en fasskillnad ψ som beror av antennavståndet d , våglängden λ och infallsriktningen α .

$$\psi = 2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \cos \alpha \text{ [radianer]}$$

Med känt antennavstånd kan därför infallsriktningen lösas ut ur ekvationen om våglängden (eller frekvensen) och fasskillnaden kan bestämmas.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\psi \cdot \lambda}{2\pi \cdot d} \right)$$

Ett problem med interferometri är att om fasskillnaden är större än $-\pi$ (-180°) till $+\pi$ ($+180^\circ$) och alla multiplar av 2π så uppstår mångtydigheter.

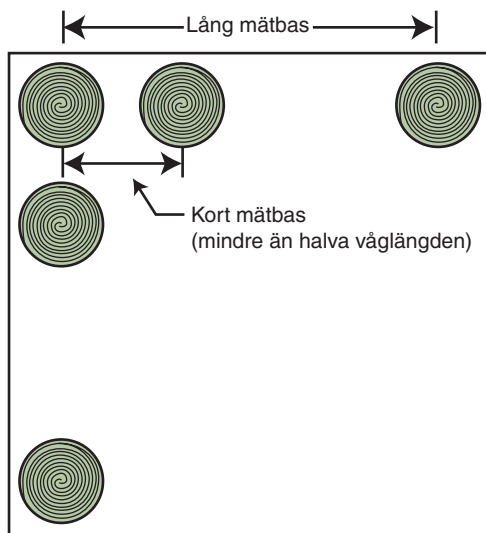


Bild 4:14. Fem stycken spiralantennor som utgör ett bredbandig interferometersystem för pejling i azimuth och elevation.

En lösning på problematiken med mångtydighet är att välja en mätbas som är kortare än en halv våglängd för den högsta aktuella frekvensen. Noggrannheten i riktningsbestämningen ökar dock ju längre mätbasen är. Lösningen på dessa båda problem är att utnyttja flera antenner som en linjär array med lämpliga avstånd mellan antennerna. Med en 100 våglängder lång mätbas kan man uppnå mätnoggrannheter på $1/100^\circ$ vid ett signal-brusförhållande på 20 dB.

Tvådimensionell riktningsmätning

- tvådimensionell riktningsmätning av marksensor
- TDOA- mätning av tidsskillnader
- DDOA- mätning av frekvensskillnader.

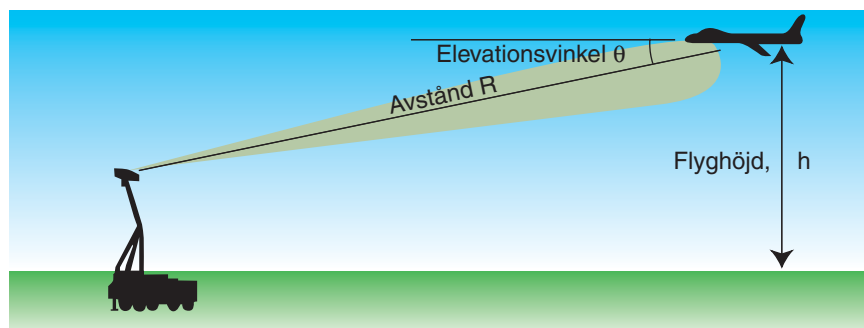


Bild 4:15. Genom att bestämma höjd- och sidvinkel till radarn och kännedom om flyghöjden kan radarns position bestämmas.

Om man kan bestämma både sidvinkeln och elevationsvinkeln till en markbaserad sensor och flyghöjden är känd så kan man momentant bestämma sensorns position. Radarstationens position är den punkt där den inmätta riktningen skär markplanet. Metoden benämns tvådimensionell riktningsmätning eller vertikal triangulering.

Om markytan inte är plan uppstår fellägen, men dess fel kan minskas genom att signalspaningssystemet utnyttjar en terrängdatabas.

Vid all triangulering ökar felet om mätbasen är kort. Vid vertikal-triangulering innebär det att osäkerheten i beräkningen av avståndet, R , till emittern ökar om flyghöjden, h , minskar. Med andra ord, ju högre flyghöjd desto bättre positionsbestämning.

Vertikal triangulering är en välbeprövad metod för att positionsbestämma markbaserade sändare. Det amerikanska Wild Weasel flygplanet F-4G var utrustat med signalspaningssystemet APR-47, som hade förmågan att i alla riktningar utföra en tvådimensionell riktningsmätning med i storleksordningen 1° noggrannhet. Systemet på F-4G var inte tillräckligt för att flygplanet skulle kunna utnyttja precisionsvapen, men tillräckligt bra för att kunna leverera signalsökande robotar i den mest effektiva moden (dvs då sensorns position är känd). Signalsökande robotar är i sig själv ett annat exempel på ett system som utnyttjar tvådimensionell riktningsmätning. I detta fall minskar vinkelfelet betydelse allt eftersom roboten närmar sig radarn.

TDOA- mätning av skillnad i ankomsttid

En signalspaningsutrustning kan till skillnad mot en radar inte mäta avståndet till en emitter med hjälp av signalens gångtid eftersom det är okänt när signalen lämnade sändaren. Med tillgång till två eller flera mottagare kan dock tidsskillnaden mellan det att signalen når de olika mottagarna bestämmas. Skillnaden i signalernas gångtid är lika med skillnaden i ankomsttid (TOA-Time Of Arrival). Metoden benämns TDOA-Time Difference Of Arrival.

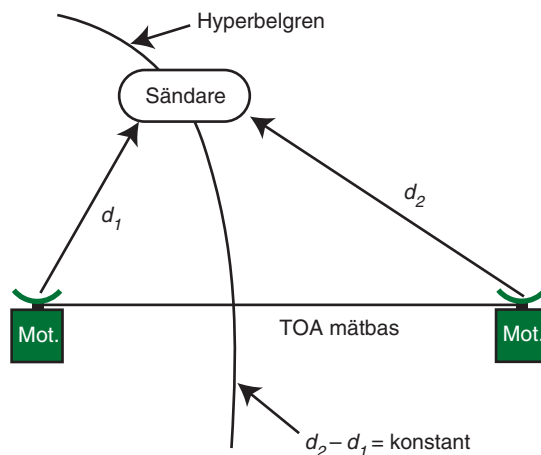


Bild 4:16. Hyperbelgrenen motsvarar ett avstånd där tidsskillnaden är konstant mellan det signalen når de båda mottagarna.

Tidsskillnaden mellan de två mottagarna motsvarar en skillnad i gångväg för signalen. Om man i en tvådimensionell värld ritat ut alla tänkbara sändarplatser (oändligt många) som motsvarar denna skillnad i gångtid så bildas en sk hyperbelgren. För att bestämma sändarens position momentant måste minst tre mottagare användas. Sändarens position befinner sig där hyperbelgrenarna skär varandra.

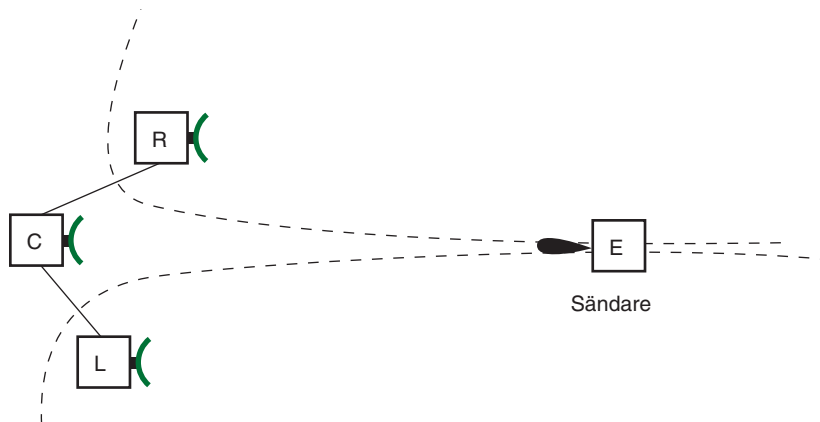


Bild 4:17. Tidsskillnaden mellan signalens ankomsttid till de tre mottagarna (R, C och L) ger upphov till hyperbelgrenar som skär varandra i sändarens position.

TDOA kräver som metod att tre inmätande mottagare "samtidigt" blir belysta av sändaren. Eftersom TDOA-mottagarna oftast inte blir belysta samtidigt av radarns huvudlob måste de ha tillräcklig känslighet för att kunna mäta i radarns sidolober.



Bild 4:18. Inhämtningsenheten C tar emot bredbandig information från sidoenheterna L och R samt bildar de två aktuella tidsdiffrenserna. Typiska avstånd mellan central och sidoenheter i ett markbaserat luftbevakningssystem är 15 km.

TDOA-system kan inte bestämma position hos en omodulerad CW-signal eftersom den inte kan tidsmärka någon speciell ankomsttid hos signalen.

Idag finns såväl luftburna som markbaserade operativa signalspanningssystem som utnyttjar TDOA. Riktningmätning baserad på TDOA mellan signaler mottagna av separerade antenner på ett flygplan ingår i systemkonceptet i det amerikanska PLAID (Precision Location And IDentification) numera benämnt ALR-69 Update (även DDOA och långbas interferometri utnyttjas i systemet). Ett exempel på ett markbaserat system för luftrumsövervakning är det tjeckiska signalspanningssystemet VERA-E (se kap 6, Passiva spanningsmetoder).

DDOA-mätning av dopplerskillnad

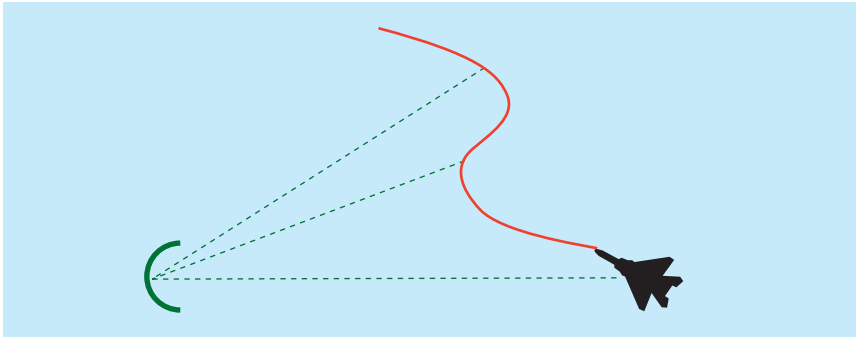


Bild 4:19. Doppler difference of arrival, DDOA

En modern metod med möjligheter till hög noggrannhet är DDOA-Doppler Difference of Arrival. Metoden kan användas av ett enskilt flygplan som gör frekvensmätningar längs sin flygbana eller flera flygplan som samverkar. Den senare varianten benämns FDOA-Frequency Difference of Arrival.

En förutsättning för att DDOA ska kunna användas är att emittern sänder med en stabil bärvågsfrekvens eller att den vid frekvenshopp återkommer till samma frekvens ett antal gånger så att frekvensändringar som beror på sis-antennens rörelser kan analyseras.

Principen för DDOA är att den frekvens som kan mottas av sis-systemet i en flygmaskin är summan av sändarens frekvens och den dopplerfrekvens som uppstår på grund av flygmaskinens rörelse.

$$f = f_{\text{sänd}} + f_{\text{doppler}}$$

Dopplerfrekvensen beror i sin tur på sändarens frekvens och sis-utrustningens radiella hastighet mot sändaren.

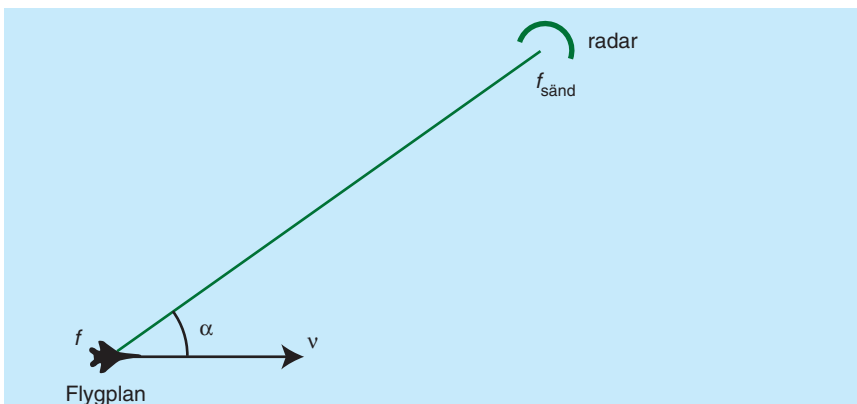


Bild 4:20. Den frekvens som sis-systemet mäter ges av radarns frekvens och mottagarantennen radiella hastighet mot emittern.

$f = f_{sänd} + f_{sänd} \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \alpha$ där c är ljushastigheten, v flygplanets hastighet och α vinkeln mellan flygplanets färdriktning och riktning till sändaren. Störst positiv respektive negativ dopplerfrekvens fås när rörelsen sker rakt mot respektive bort från sändaren. När emittenten finns tvärs rörelseriktningen är dopplerfrekvensen noll.

DDOA har i goda fall möjlighet att bestämma riktningen till en sändare med en noggrannhet på några streck.

Att kombinera flera lägesbestämningsmetoder

Lägesbestämningen kan förbättras avsevärt om flera olika metoder kombineras. Exempelvis kan en viss lägesnoggrannhet nås på kortare tid eller en högre slutlig lägesnoggrannhet uppnås jämfört med de enskilda metoderna. För att möta ett luftvärn som utnyttjar korta sändningstider så går utvecklingen mot att utnyttja flera inmätande flygplan eller UAV som utbyter signalspaningsdata med varandra i ett nätverk. En förbättrad noggrannhet beror dels på att antalet mätvärden ökar, dels på att en metod kan kompensera för en annans svaghet. Att metoderna kompletterar varandras svagheter är normalt sett det som ger den stora prestanda förbättringen.

TDOA och DDOA från flygplan kan kombineras med tids- och frekvensmätningar från markbaserade system. Noggrannheten och säkerheten i lägesbestämningarna ökar då eftersom sannolikheten ökar för att fler plattformar ser emittenten samtidigt.

För att ett system uppbyggt med många olika plattformar ska fungera krävs att de kan skicka mätdata mellan varandra och att de har en gemensam uppfattning om tiden (och därmed om frekvens).

Prestanda

Även vid lägesbestämning påverkas noggrannheten av signal/brusförhållandet. Ju högre signalbrusförhållande desto bättre noggrannhet kan uppnås. Signalspaning mot en emitter med hög utsänd effekt kan därför ofta ske med större precision än mot en radar med svag signal. Vidare gäller att en emitters sändningstid är avgörande för vilken noggrannhet som kan nås då endast en inmätande plattform utnyttjas.

Radarns vågform avgör vilka prestanda radarsignalspaningssystemets lägesbestämning kan uppnå. Vågformen bestämmer dessutom vilken lägesbestämningsmetod som är bäst lämpad för tillfället. En CW-signal kan t ex inte alls hanteras av TDOA men är idealisk för DDOA.

En besvärlig signalmiljö kan försvåra lägesbestämningen, dels genom att upptäckten försenas, dels genom att inmätningen av de parametrar som lägesbestämningen utnyttjar blir sämre på grund av bristande separation eller dynamik. Detta leder till att emittterna blandas ihop. I täta signal-

miljöer med många emitterar som ska lägesbestämmas kan beräkningskapaciteten vara otillräcklig för att hantera samtliga parallellt. Systemet bör därför ha en prioriteringsförmåga som gör att systemet inriktas mot de viktigaste signalerna.

Alla lägesbestämningsmetoder påverkas av vågutbredningen mellan emittern och sis-systemets antenner. Dels sker inverkan genom att utbredningsdämpningen är en av de faktorer som avgör vilket signal/brusförhållande som blir aktuellt vid sis-systemets inmätningar. Inverkan sker även genom att bl a reflektioner distorerar de inparametrar som de olika lägesbestämningsmetoderna använder, exempelvis infallsriktning och ankomst tid.

Den inmätande plattformen måste kunna lägesbestämma sin egen position med hög noggrannhet. Exempelvis är kraven i det amerikanska flygburna signalspaningssystemet AT3 (Advanced Tachtical Targeting Technology) att flygplanen kan bestämma sin egen position med 3 m noggrannhet och 0,03 m/s i hastighet. Noggrannheten påverkas även av flygplanets strukturstabilitet, skuggeffekter från plattformen och av andra system ombord på flygplanet. Slutligen måste alla plattformar ha en gemensam noggrann tidsreferens.

Kapaciteten i de kommunikationslänkar som utnyttjas mellan de inmätande flygplanen kan i många fall vara en begränsande faktor.

Med interferometri kan riktningsnoggrannheter i storleksordningen 1°, eller bättre, realiseras.

Ett enskilt flygplan som utnyttjar lämpliga kombinationer av DDOA, långbasinterferometri och riktningsmätning kan på i storleksordningen 10-20 sekunder lägesbestämma en radar med en noggrannhet som medger precisionsinsats. Om flera flygplan nätverkar sin data kan tiden minskas ytterligare. Ett exempel på ett system som utnyttjar samverkan mellan flera olika flygplan är det amerikanska försökssystemet AT3 som enligt uppgift strävar mot att inom 10 sekunder kunna lägesbestämma emitterar med en osäkerhet av 15-50 meter på ett avstånd upp till 150 nautiska mil.

Spaningsutrustningens räckvidd

En signalspaningsutrustning kan ofta upptäcka en radar långt utanför radarstationens maximala räckvidd. Orsaken till detta är att radarpulsen måste gå både fram och tillbaka till målet medan signalerna som når mottagaren i signalspaningsutrustningen bara har gått ”enkel väg”. Generellt kan man inte säga att signalspaningsutrustningen har den dubbla räckvidden jämfört med en radar. Det beror på att radarmottagaren är optimerad för just sina signaler, medan spaningsutrustningens mottagare tillverkas som en kompromiss mellan olika typer av radarsignaler och har därför en lägre känslighet. Radarns räckvidd är å andra sidan starkt beroende av målets radarmålarea.

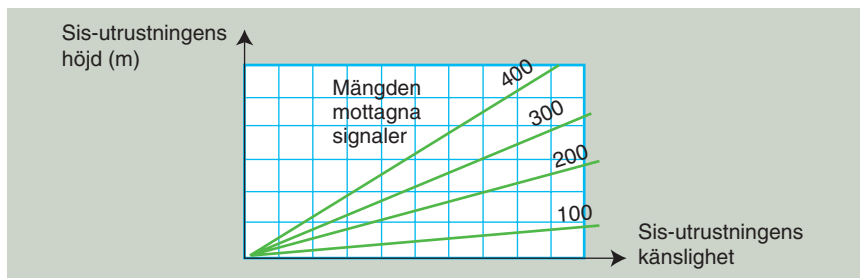


Bild 4:21. Sis-utrustningen känslighet. Mängden mottagna signaler beror bl a på flyghöjd och mottagarens känslighet.

En kvalificerad signalspaningsutrustning kan upptäcka en radarstations huvudlob på åtskilliga hundra kilometers avstånd. Radarvarnarna har däremot betydligt lägre känslighet. De klarar ofta av att upptäcka radarstationer minst 1-1,5 gånger på så långt avstånd som vad radarn själv når mot ett normalstort mål.

Pulssortering

Om stationerna är av olika typ t ex PS-70 och PS-90 kommer de flesta av parametrarna att skilja sig åt. Dock kan de komma att använda samma bärfrekvens.

Om det finns två stationer av samma typ, t ex två PS-90, kommer de kunna ha alla parametrar utom position gemensamt (vid en viss tidpunkt kan de ha samma riktning). I detta fall blir det därför något svårare för signalspaningsutrustningen att para ihop rätt puls med rätt radar så att en korrekt lägesbestämning kan göras, vilket är ett villkor för att fastställa vem som utgör störst hot.

Om man antar att signalspaningsutrustningen utgörs av målsökaren i en signalsökande attackrobot (SSARB) så kommer den på motsvarande vis få svårare att styra mot en viss radar ju fler signaler som samtidigt uppträder i etern. Detta gäller särskilt om det finns många stationer som uppvisar samma sändparametrar. För att minska detta problem är vissa signalsökande robotar utrustade med en mod där roboten vid avfyring fått inprogrammerat ungefärliga koordinater på målet. På så vis får den lättare att diskriminera ovidkommande signaler.

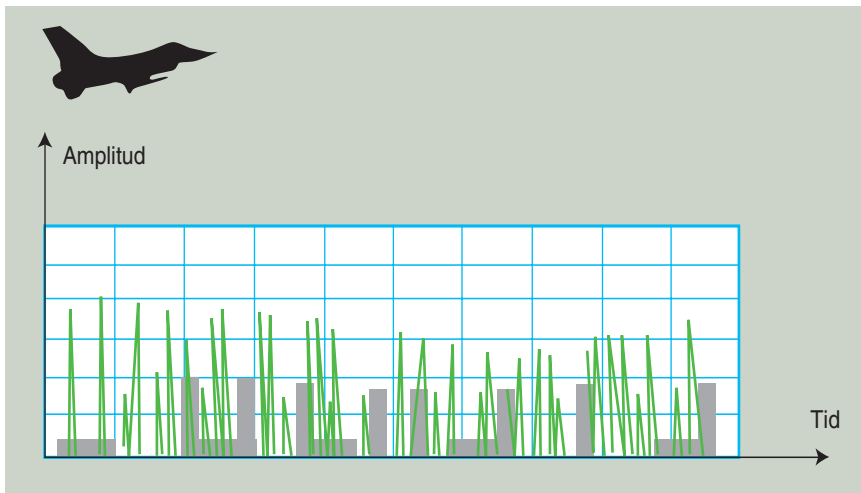


Bild 4:22. Signalmiljö. Signalspaningsutrustningen måste varje sekund bland hundratusentals pulser kunna sortera fram vilka signaler som kan härröra från ett hotande vapensystem. Uppgiften kompliceras av att radarstationerna ofta byter frekvens och använder sig av staggered PRF.

Slutsatser för luftvärnet

Luftvärnet bör i det längsta försvara för en motståndares signalspaning t ex genom att använda radarstationerna restriktivt samt omgruppera ofta. När beslutet att sända väl är fattat, försvaras motståndarens möjligheter till signalspaning och efterföljande insats av SSARB eller telestörning om många stationer med likartade parametrar sänder samtidigt och under kort tid. Nackdelen med många stationer som sänder är att man riskerar att avslöja hela förbandets gruppering. Signalspaning kan medge att ett förband lägesbestäms med sådan noggrannhet att det kan angripas med olika former av precisionsvapen t ex GPS-styrda splitterbomber eller kryssningsrobotar.

Hur svårt en signalspaningsutrustning eller SSARB har att skilja ut en viss radarstations parametrar i en svår signalmiljö är något som tillverkaren håller strängt hemligt. Moderna signalspaningssystem har dock hög förmåga att samtidigt kunna klassificera och positionsbestämma ett stort antal radarstationer.

Signalsökande robotar

Signalsökande robot (SSRB) är ett samlingsnamn för alla typer av robotar försedda med en passiv radarmålsökare avsedd att bekämpa i huvudsak radarstationer. Beroende på var målet uppträder indelas robotarna i

- signalsökande attackrobotar (SSARB) mot mål på marken eller vattnet.
- signalsökande jaktrobotar (SSJRB) mot flygburna radarstationer.

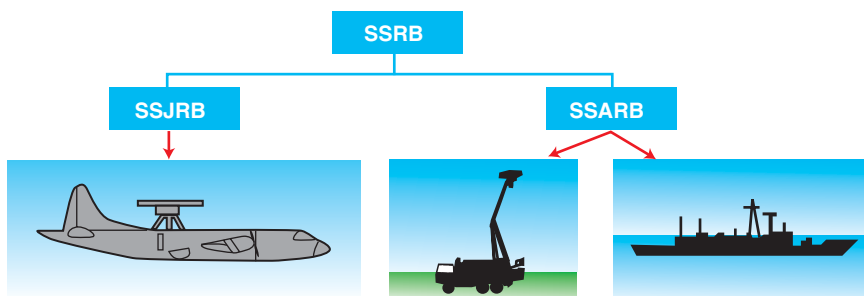


Bild 4:23. Signalsökande robotar.

De första försöken med signalsökande robotar gjordes redan under andra världskriget. Den stora satsningen på luftbevaknings- och luftvärnssystem som Sovjetunionen genomförde på 1950- och 1960-talen blev påtaglig för USA under kriget i Sydostasien. Under Vietnamkriget disponerade nordvietnameserna en stor mängd sovjetiska luftvärnssystem vilka inledningsvis orsakade amerikanerna oacceptabelt höga förluster. För att möta detta hot startades en satsning på signalsökande attackrobotar i USA och senare också i andra länder. Den första operativa amerikanska SSARB, Shrike, avfyrares i Vietnam 1966. Shrike bestod av radarjaktroboten AIM-7 Sparrow utrustad med en passiv målsökare mot de aktuella radarfrekvenserna.

Historiskt har signalsökande robotar varit inriktad mot bekämpning av radarstationer i STRIL och olika luftvärnssystem. Under de senaste 10-15 åren har flygburna spaningsradarstationer tagits fram i både forna Sovjetunionen och i USA. Dessa plattformar har mycket stor betydelse för moderna luftförsvarssystem. Ett ökat intresse har därför riktats mot metoder för bekämpning av dessa plattformar. Man arbetar därför med att ta fram signalsökande robotar för bekämpning av flygande radarstationer. En variant av AS 17 Krypton sägs kunna användas mot flygplan typ AWACS. Dessa robotar benämns signalsökande jaktrobotar, SSJRB. Lovande försök har även gjorts att bekämpa t ex jaktflygplan med SSJRB. Det finns även exempel på fartygsbaserat luftvärnssystem (RAM) med signalsökande luftvärnsrobotar avsedd att främst bekämpa sjömålsrobot.

SSARB används numera tillsammans med störsändare av olika typer för att trycka ner luftförsvaret (Suppression of Enemy Air Defense, SEAD). Som exempel kan nämnas Gulfkriget och Kosovokonflikten där attack-

anfallen skyddades av flygplan utrustade med störsändare och signalsökande attackrobotar.

Målsökaren

Den viktigaste komponenten i en signalsökande robot är målsökaren. Målsökarens uppgift är att klassificera och lägesbestämma radarstationen, eventuellt i samverkan med flygplanets signalspaningsutrustning. Målsökaren arbetar i stort sett på samma sätt som signalspaningsutrustningar dvs jämför de mottagna signalerna med ett hotbibliotek. Lägesbestämning sker m h a elevation- och sidvinkelinformation från målsökaren. För att klassificera en radar används PRF, pulslängd, antenntrotationshastighet och bärfrekvens.

Man har tidigare haft problem med att göra målsökaren tillräckligt bredbandig för att täcka flera olika radarband. Äldre SSARB har därför haft flera utbytbara målsökarhuvuden beroende på vilket radarband som ska bevakas. Moderna robotar har tillräckligt bredbandiga målsökare för att täcka ett stort antal radarband med ett enda målsökarhuvud. Nackdelen med en bredbandig målsökare är att känsligheten blir lägre.

När en radar sänder uppstår reflexer i marken, från hustak m m. För att roboten inte ska styra mot reflexerna nyttjar målsökaren s k pulsfrenstdiskriminering. Det innebär att den följer den puls som först når målsökaren, vilket är den puls som gått raka vägen från radarn till roboten utan att ha reflekterats.

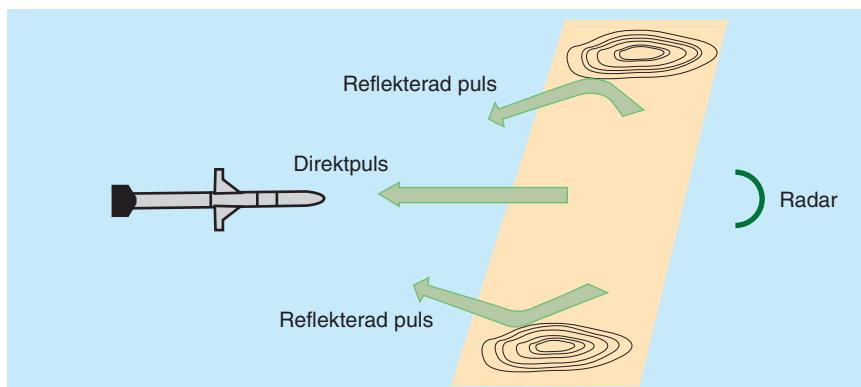


Bild 4:24. Pulsfrenstdiskriminering.

För att kunna bestämma radarns position bl a för att avgöra om en radar befinner sig inom bekämpningsbart område, mäter målsökaren eller flygplanets signalspaningsutrustning den vinkelförändring som uppstår i förhållande till roboten/flygplanets färdriktning. Metoden kan liknas vid krysspejling. Ju bättre en radars läge kunnat fastställas före roboten avfyras desto större blir normalt sett träffsannolikheten.

Målföljning och mållåsning kan ske på radarns huvudlobssignal. Under denna fas stötts styrningen av ett tröghetsnavigeringssystem (TN-system). Tröghetsnavigeringen kompenserar den glesa uppdateringen mellan de tillfällena då radarns huvudlob belyser roboten. Detta ger även ett visst skydd mot skensändare och tillfällig avstängning av målradar.

Det finns dock olika uppfattningar huruvida roboten inledningsvis kan låsa på radarns huvudlobssignal eller om den måste använda de svagare sidoloberna som finns kontinuerligt. Man tycks dock vara överens om att roboten i slutfasen av banan måste ha en kontinuerlig signal att styra mot och att sidoloberna därför måste användas. Detta beror på att roboten annars skulle få alltför få tillfällen att uppdatera målets läge.

Om radarn växlar frekvens slumpmässigt, inom ett stort frekvensområde, så kommer målsökarens räckvidd att minska. När mottagaren ska spana över ett bredare frekvensområde kommer känsligheten per frekvens att minska.

Robotens förmåga att med precision styra mot radarn beror bl a på målsökarens antenn. Ju större antenn, vid en viss given våglängd, desto bättre riktningsnoggrannhet. Detta medför att ju längre våglängd radarn arbetar med desto större antenn måste en SSARB ha för att få samma riktningsnoggrannhet. Av naturliga skäl kan roboten inte innehålla en alltför stor antenn. Det är därför svårt att konstruera en SSARB mot radarstationer som arbetar på mycket långa våglängder (>30 cm). Radarstationer på VHF/UHF-banden är svåra att styra mot då målsökantennens storlek blir mindre än våglängden varvid antennens riktverkan blir dålig. Dessutom utnyttjar ofta dessa radarstationer markreflektion för att få bättre egna antennegenskaper vilket ytterligare försvårar för målsökaren.

Banfas

Efter avfyring inträder robotens banfas. Roboten flyger högt, ofta över radarns huvudlob, för att få bästa signal från radarn sett över tiden. Att den flyger ovanför radarns huvudlob innebär att radarn kommer att få svårt att upptäcka roboten. Hög höjd innebär dock att roboten kan få problem med signalanalysen genom att den möts av signaler från ett stort antal olika radarstationer.

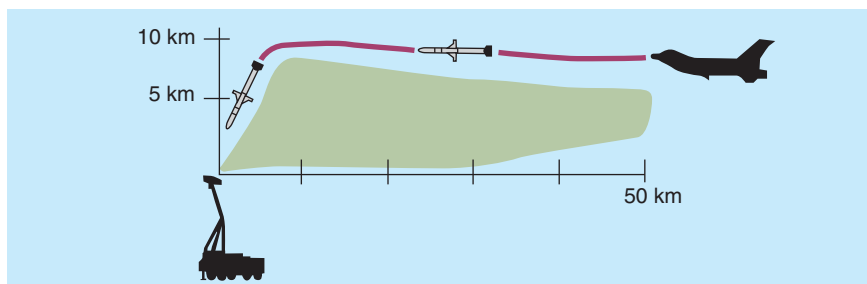


Bild 4:25. Anfällsprofil för SSARB. En SSARB anflyger ovanför radarns höjdtäckning och nyttjar energin som läcker utanför antenndiagrammet.

Sluffas/dykning

När roboten kommer närmare radarn ska den från hög höjd, i brant vinkel, 40° – 60° , dyka mot radarn i den ”döda kon” där många spaningsradarstationer är blinda.

Att man vill att roboten ska dyka brant mot målet beror på att

- möjligheterna att upptäcka roboten är små om den anfaller ovanför huvudloben från hög höjd
- man får mindre problem med markekon
- en felvinkel hos roboten vid stor dykvinkel bara ger upphov till ett litet bomavstånd.

Under slutfasen måste precisionen i styrningen ökas. Det krävs därför en allt tätare uppdatering av målläget. Av denna anledning kan bara radarns sidolober användas för målstyrning. En kritisk tidpunkt inträffar då roboten ska växla mellan anflygning och dykning. Roboten ”vet” när det är dags att övergå från planflykt till dykfas genom att mäta hur snabbt elevationsvinkeln till radarstationen förändras. Försvinner målsignalen i detta läge riskerar roboten att passera den sista möjliga punkten för dykning och kommer då troligen att missa grovt.

Vissa moderna målsökare kan i banfasen följa flera mål vilka prioriteras i en bestämd ordning. Tappas signalen från den mest prioriterade radarn väljer roboten nästa radar på prioriteringslistan.

Om den engelska roboten ALARM tappas radarsignalen stiger den till ca 15 km höjd varvid en fallskärm utlöses. Om en radar börjar sända släpper den fallskärmen och dyker mot målet som en styrd glidbomb. Eftersom raketmotorn inte används i detta läge finns en begränsning i hur långt roboten kan styra i sidled. Ju längre roboten hunnit sjunka när den låser på en radar desto mindre sträcka kan den förflytta sig i sidled.

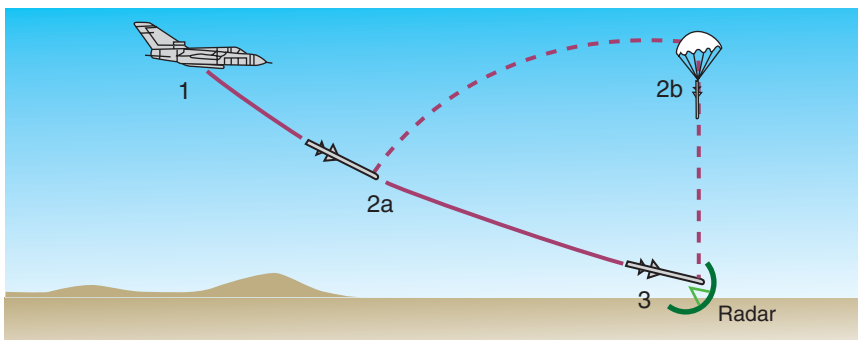


Bild 4:26. Attackroboten ALARM. Roboten avfyras (1). Om radarn sänder kontinuerligt anfaller roboten direkt mot radarn (2a–3). Om radarn stängs av då roboten befinner sig vid 2a stiger den och en fallskärm fälls ut (2b). Om radarn startar att sända släpper roboten fallskärmen och faller mot radarn som en styrd bomb (3).

Stridsdel

Stridsdelen i en SSARB väger ca 50–200 kg och utgörs av sprängämne samt en mängd tungmetallkulor för att förbättra splitterverkan. Stridsdelen utlöses av ett zonrör vilket får roboten att explodera 10–15 meter över marken. Avståndet kan dock varieras om så bedöms lämpligt.

Användningsprinciper

SSARB används enligt fyra olika taktiska principer.

1. Planerat anfall (*prebriefed mode, stand-off*) mot radarstationer med känt läge och kända data. Roboten prepareras vanligtvis på marken före uppdraget. Vissa robotar kan programmeras i luften med data som överförs från attackflygplanet eller signalspaningsutrustning på ett annat flygplan (bl a F-4G hade denna möjlighet). När flygplanet anländer till målområdet jämförs inprogrammerade data med de radarsignaler som når robotens målsökare. Då signalerna överensstämmer, avfyras roboten. Vissa typer av moderna robotar behöver inte ha låst på målet vid avfyring utan kan låsa på målet efter avfyring.
2. Röjning av korridor (*target of opportunity*). Genom att bekämpa luftvärnet längs en korridor ska efterföljande flygplan ohotat kunna genomföra ett attackuppdrag eller en luftlandsättning. Vid denna mod ska de signalsökande robotarna anfälla främst mobila spanings- och eldledningsradarstationer ur luftvärnet. Målens lägen är oftast inte kända före uppdraget startar. För att röja en korridor nyttjar NATO flygplan med speciell signalspaningsutrustning s k luftvärnsjägare ("Wild Weasels").
3. Egenskydd mot luftvärn (*self protection mode*). Den signalsökande roboten används för egenskydd när en eldledningsradar låst på flygplanet. Robotens målsökare och hotbibliotek klassificerar hotet och rekommenderar piloten lämplig tidpunkt för avfyring. Alternativt kan avfyring ske automatiskt.

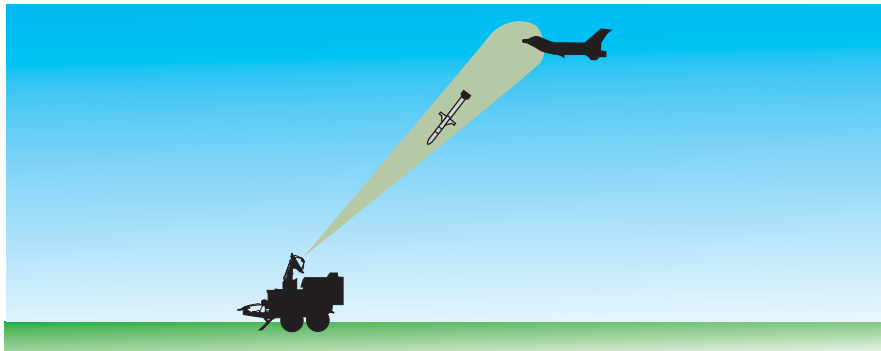


Bild 4:27. Egenskydd mot luftvärn. SSARB avfyras då eldledningsradar låst på flygplanet.

4. Nedhållning av luftvärnet (*loiter mode*). Denna användningsprincip syftar till att under en längre tid tysta radarstationerna inom ett område för att ge understöd till ett attackanfall eller en luftlandsättning. Den första roboten som kunde användas i denna mod var den engelska ALARM vilken med hjälp av en fallskärm under 5–10 minuter kan befinna sig över målområdet. Under de senaste åren har det utvecklats obemannade farkoster s k UAV som är utrustade med signalspaningsutrustning och stridsdel. Dessa UAV kan under flera timmar cirkla över ett målområde. Om en radar börjar sända anfaller UAV och om stationen slutar sända återgår farkosten till sin patrullbana.

Exempel på signalsökande robotar

HARM (High-speed Anti-Radiation Missile)

AGM-88 HARM tillverkas av Raytheon Missile Systems och är operativ sedan 1983. HARM är den signalsökande robot som har använts mest i modern tid. 1000-tals HARM har avfyrats av USAF och 100-tals av allierade flygvapen bl a Tyskland och Italien vid olika konflikter.

AGM-88 kan skjutas i ett antal moder bl a

- planerat anfall (*prebrief mode*). Kännedom om målläget före start. HARM skjuts för att nå målet då man beräknar att attackstyrkan upptäcks av målet. Status på målet kan vara okänt vid skott (låsning efter fällning), vilket dock ökar risken för att roboten missar målet.
- target of opportunity. Målsökaren på HARM-roboten är primär sensor. Målets status är känt vid skott (låsning före fällning). Riktning till målet är känt men avstånd till målet är okänt, vilket ger en risk att målet ligger utanför HARM porté.
- målläge via annan källa. Målet inmätt och identifierat av samverkande enhet utrustad med målinmätningssystem (HTS-kapsel eller ELS). Målinformation överförs via Link 16 eller IDM (Improved Data Modem). Målstatus kan vara okänt vid skott, vilket ger en risk för att målet är släckt när vapeninstas görs varvid roboten missar.
- målläge via egna sensorer. Målläge och identitet via HTS eller ELS. Målets status fullt känt vid vapeninstas. Bästa mod för högsta sannolikhet för träff i målet.
- självförsvarsmod. HARM skjuts på information från motmedelssystemet som uppfattat direkta hot mot förtaget.

HARM kan skjutas helt utan målinformation mot ett område och där spana med egen sensor efter hotsignaler. Roboten låser på första bästa hotsignal. Denna mod kallas inofficiellt för Mad Dog.

HARM modifieras nu med GPS och TN-system för att ge högre precision.

Tabell 4:1. Data för AGM-88 HARM.

Längd	4,17 m	
Diameter	25,4 cm	
Spännvidd	1,13 m	
Stridsdelsvikt	66 kg	21 kg sprängmedel
Verkansdel	45 kg	Förfragmenterade volframkuber
Vikt	361 kg	
Målsökare	Passiv radar	Bredbandsmålsökare
Motor	Raketmotor	Fast bränsle
Fart	M 2,9	
Räckvidd	25-80 km	Beroende på fällhöjd

ALARM (Air-Launched Anti-Radar Missile)

ALARM är en brittisk passiv radarmålsökande attackrobot som tillverkas av Matra BAE Dynamics. Roboten programmeras före start med kända hotsignaler hos radarstationerna i målområdet men kan även före skott uppdateras med senaste information. Roboten kan skjutas på olika sätt beroende på situationen, direkt eller indirekt anfall. Om målets radar är tänd anfaller roboten direkt. Om radarn stängs av flyger roboten fram till målområdet på hög höjd och fäller ut en fallskärm, för att sedan sakta dala nedåt. Börjar radarn sända lösgörs fallskärmen och roboten dyker (med hjälp av gravitationen) ned mot antennen. Om radaroperatören återigen stänger av radarn går ALARM mot det senaste läget den har i sökarminnet. ALARM kom i operativ tjänst 1991 under Gulfkriget.

Tabell 4:2. Data för ALARM.

Längd	4,3 m
Diameter	0,22 m
Spännvidd	0,72 m
Vikt	265 kg
Verkansdel	Förfragmenterad
Målsökare	Passiv radar och TN
Motor	Raketmotor
Räckvidd	45 km

Exempel på SSARB-taktik

Signalsökande robotar har främst nyttjats av USA, Storbritannien samt Israel. De exempel på nyttjande av SSARB som finns i den öppna litteraturen härstammar från dessa länder.

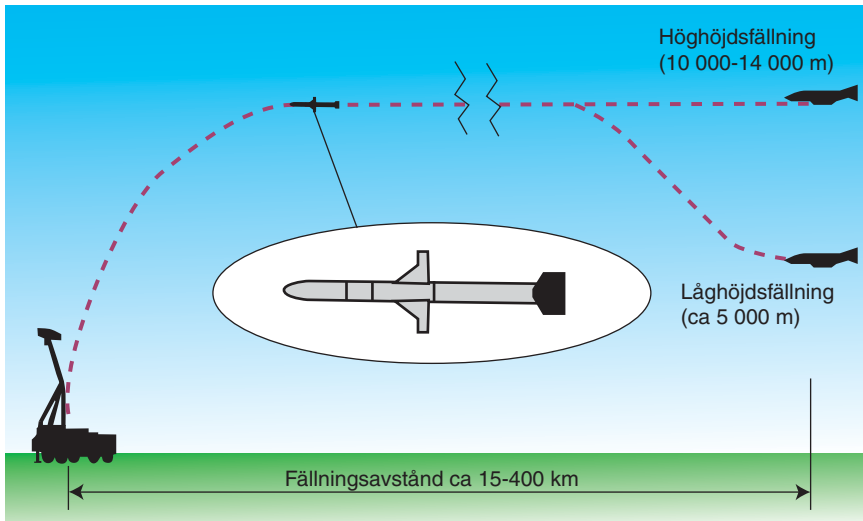


Bild 4:28. Typiska anfallsprofiler för SSARB.

Det hitintills största nyttjandet av signalsökande robotar skedde under Gulfkriget, varvid minst 2000 robotar avfyrades.

Exempel 4:1

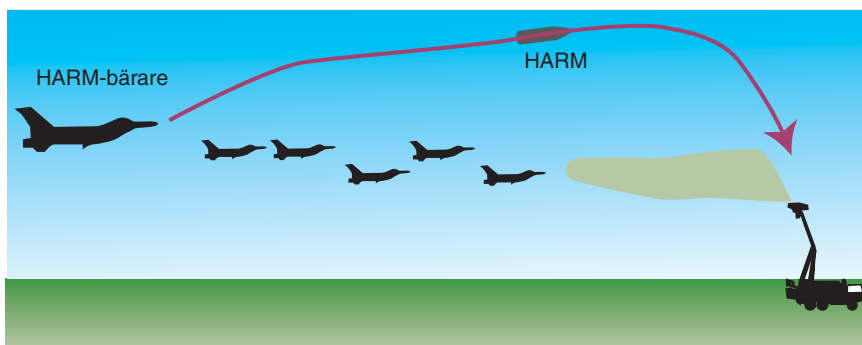


Skenmål används dels för att rikta luftvärnets uppmärksamhet åt fel håll och dels för att få luftvärnet att starta sina radarstationer.

Luftvärnsjägarna röjer en korridor för den efterföljande attackstyrkan och mäter med sina signalspaningsutrustningar var radarstationerna befinner sig och anfaller dessa med SSARB eller något annat lämpligt vapen.

Attackflygplan med HARM-robotar flyger bakom huvudstyrkan och har till syfte att slå ut radarstationer som kan ha överlevt luftvärnsjägarna. De avfyrrar sina signalsökande robotar så att dessa når målområdet strax

4. Telekrigföring



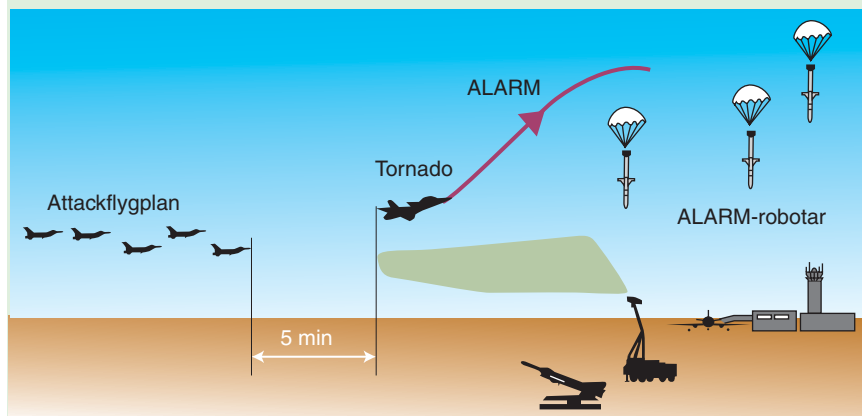
före attackflygplanen. Ju kortare tiden kan göras mellan det att roboten anfaller till dess attacken anländer desto svårare blir det för luftvärnet att kunna verka.

Exempel 4:2

Förlopp

Tornadoflygplan skjuter ALARM mot målområdet ca fem minuter före attackflygplanen når målet.

Om någon radar sänder anfaller ALARM direkt. Om radarstationerna är avstängda, stiger roboten till ca 15 km höjd varefter en fallskärm utvecklas, roboten dalar därefter sakta mot marken under ca fem minuters tid. Om en radar börjar sända släpper ALARM sin fallskärm och faller mot radarn som en styrd bomb.



När attackflygplanen efter några minuter anländer till målområdet, skyddas de av de robotar som fortfarande befinner sig i sina fallskärmar.

Med ALARM uppstår inget tidsmässigt "glapp" mellan det att de signalsökande robotarna anfaller radarstationerna och det att attackanfallet anländer. Ett sådant glapp skulle luftvärnet kunna använda för att starta radarstationerna. ALARM kan utgöra ett hot mot radarstationerna under betydligt längre tid än övriga typer av signalsökande robotar.

De som nyttjar signalsökande robotar strävar efter att minimera tiden mellan det att roboten når målområdet och att attackflygplanen anländer. Man kan jämföra detta med infanteriets strävan att minimera tiden mellan stormeldens upphörande och stormningen.

Det är svårt att fastställa när hotet från SSARB är över och när anfallsfasen inleds vilket ökar risken att komma i efterhand. Situationen kan ytterligare kompliceras om skenmål används.

Robottyper

För de olika användningsprinciperna har det utvecklats särskilda typer av robotar. De tidigaste robotarna var bara konstruerade för direktanfall och/eller röjning av korridor. De modernare robotarna klarar flera olika moder.

Ryska system

Inom det forna Sovjetunionen utvecklades inledningsvis främst tunga robotar med räckvidd upptill 300 km, vilka var avsedda för direktanfall mot främst fasta STRIL-radaranläggningar. Exempel på dessa robotar är AS-4B Kitchen, AS-5B Kelt och AS-6B Kingfish.

Senare utvecklades den medeltunga AS-11 Kilter med medellång till lång räckvidd. Den lättare AS-12 Kegler ska främst bekämpa eldlednings- och belyningsradar av CW-typ t ex belyningsradarn i Hawk-systemet. Rysslands senaste SSARB är AS-17 Krypton vilken är avsedd för användning mot spanings- och eldledningsradar av puls- och CW-typ, både till lands och på fartyg.

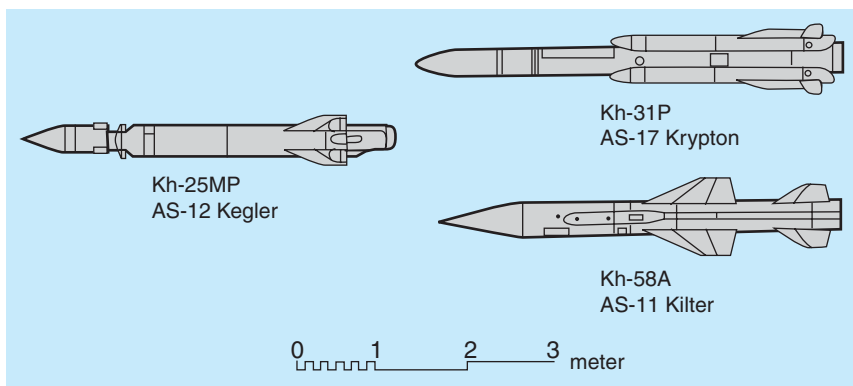


Bild 4:32. Olika robotar för bekämpning av radar.

AS-11 Kilter

Roboten Kilter bygger på idéer från den brittisk/franska signalsökande roboten Martel, även om Kilter blev både större och tyngre. Roboten är särskilt avsedd att användas mot Patriot och Hawk.

4. Telekrigföring

Roboten kan bäras av SU-24M Fencer-D och användes tillsammans med målutpekings/signalspaningsutrustningen "Fantasmagoria" vilken monterades i en pod (typ av kapsel) under flygplanet. SU-24 kan bära fyra robotar. Kilter togs i operativt bruk 1982 och kan bäras av alla standard SU-24 Fencer D. Robotens räckvidd är 26 km från låghöjd och 120 km från 10 000 m höjd samt 160 km om den avfyras från 15 000 m höjd. Genom sin långa räckvidd kan den användas mot Improved Hawk och Patriot utanför dessa systems räckvidd. Roboten gör efter avfyring en upptagning så att den kan anfälla målet i brant vinkel uppifrån, för att använda Patriotsystemets eldledningsradarns "döda kon". En modifierad variant, Kh-58U, har en utökad räckvidd (max 250 km).

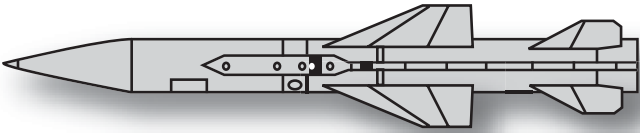
NATO benämning	Tillverkare	Operativ från	Huvudsakliga mål	Plattformer	Längd (m)
AS-11 Kilter	MKB Raduga	1982	Nike Hercules HAWK mod. HAWK Patriot	Su-24M MiG-25BM SU-17M4	4.80
Kh-58A 					
Spännvidd (cm)	Vikt (kg)/ Stridsdel	Räckvidd (km)	Fart (m/s)	Avfyrningshöjd (m)	
117	650/150	160	900	100-25,000	

Bild 4:33. Kilter, rysk signalsökande robot.

Denna robot har även en förbättrad målsökare som tillåter att roboten låser på radarsignalen efter det att den avfyrats. Inledningsvis nyttjades MiG-25BM Foxbat F som vapenplattform. Roboten kan även bäras av SU-24 och SU-22 Fitter.

AS-17 Krypton

Under 1980-talets början införde USA den signalsökande roboten HARM. I Sovjetunionen insåg man då att hög hastighet var en viktig parameter för att roboten skulle vara verksam mot radarstationerna. Genom att minska tiden från avfyring till träff så ges luftvärnet mindre tid till att hinna reagera. En snabb robot är också svårare att skjuta ner, vilket Patriot kunde göra med äldre generationers signalsökande robotar. Därför påbörjades utveckling av två varianter av en långräckviddig robot med hög hastighet, Kh-

31A (sjömålsrobot) och Kh-31 P, signalsökande robot. Roboten fick NATO-beteckningen AS-17 Krypton.

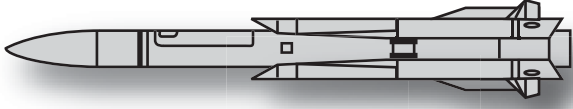
NATO benämning	Tillverkare	Operativ från	Huvudsakliga mål	Plattformer	Längd (m)
AS-17 Krypton	OKB Zvezda	1991	mod. HAWK Patriot	Su-24M	4.70
Kh-31P 					
Spännvidd (cm)	Vikt (kg)/ Stridsdel	Räckvidd (km)	Fart (m/s)	Avfyrningshöjd (m)	
112,5	600/90	110	1050	100-15,000	

Bild 4:34. Krypton, rysk signalsökande robot.

Krypton har en startmotor och fyra ramjetmotorer, vilka ger roboten en hastighet på max 3,6 Mach (ca 1000 m/s). Roboten väger ca 600 kg. Den har samma målsökare och stridsdel som AS-11 Kilter, men ett bättre navigeringssystem vilket enligt vissa öppna källor, gör att medelfelläget är 5–7 m mot en sändande radar. Dess maximala räckvidd är 110 km, något kortare än Kilter, men avsevärt längre än HARM. Krypton var operativ 1991 och användes då med SU-24M. Den använder samma målutpekningssystem "Fantasmagoria" som Kilter. En SU-24 kan bära upp till fyra robotar. I mitten av 1990-talet utvecklades och testades en förbättrad version Kh-31PD. Dess räckvidd hade ökats till 150 km medan övriga prestanda var oförändrade.

Övriga system och utveckling av SSARB

I väst har det inte utvecklats några tunga signalsökande robotar utan använder i huvudsak mindre robotar med räckvidder under 60 km.

En kontinuerlig uppdatering sker av de befintliga signalsökande robotarna. Som exempel kan nämnas att Luftwaffes befintliga HARM-robotar uppgraderades med ny mjukvara under 2000–2002. Ett samarbetsprojekt mellan USA, Tyskland och Italien avser att utrusta robotarna med nytt precisionsnavigeringssystem under år 2003. Systemet kommer att bestå av tröghetsnavigering (Inertial Measurement Unit, IMU) och en GPS-mottagare för att öka träffsannolikheten samt minska risken för skador vid

4. Telekrigföring

sidan av målet och på egna styrkor. Man kommer även kunna ange för roboten inom vilka geografiska zoner den får eller inte får angripa ett mål för att minska risken att roboten angriper egna radarstationer. Dessa zoner kan göras så små som noggrannheten i GPS-systemet medger (dvs ett fåtal meter).



Bild 4:35. HARM

USA har utvecklat en SSARB, Sidearm, med kort räckvidd till egenskydd av attackflygplan och attackhelikoptrar. Roboten är en utveckling av jaktroboten Sidewinder. I en framtid kan man anta att flertalet attackflygplan kommer att kunna bära med sig någon form av SSARB mot eldledningsradar.

Sidewinder används även i det fartygsbaserade luftvärnsrobotsystemet RAM (Rolling Air Frame) i USA och Tyskland. Systemet är främst avsett för att bekämpa sjömålsrobotar. Roboten är i detta system utrustat med både en passiv radarmålsökare och en IR-målsökare och nyttjar inledningsvis den passiva radarmålsökaren och i slutfasen IR-målsökaren.

Obemannad beväpnad farkost – UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle)

För att under en längre tid förhindra motståndaren att använda sina radarstationer och helt eliminera glappet mellan SSARB insats och attackanfall så utvecklas nu signalsökande robotar som kan befinna sig lång tid över målområdet. I bl a Sydafrika, Israel och USA utvecklar man därför UCAV. Detta är en UAV som i sig själv utgör en SSARB. Den allmänna uppfattningen är att UCAV har kommit för att stanna och kommer att spela en betydande roll i framtidens SEAD inte minst genom sin förmåga att eliminera risken för egna förluster.

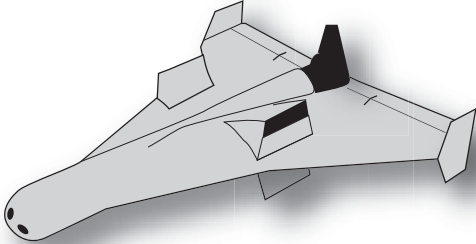
NATO benämning	Tillverkare	Operativ från	Huvudsakliga mål	Plattformer	Längd (m)
LARK	Sydafrika				
					
Aktionstid (h)	Vikt (kg)/ Stridsdel	Räckvidd (km)	Fart (km/h)	Målsökare (GHz)	
2	22/splitter	400	120 - 200	2 - 18	

Bild 4:36. Signalsökande UAV, LARK, Sydafrika.

En av de första UACV var den sydafrikanska LARK. En motsvarighet till LARK är den israeliska HARPY. HARPY startar från en ramp på en lastbil och flyger under flera timmar i patrullbana över mätområdet. HARPY kan sättas in enskilt eller gruppvis. Roboten drivs av en kolvmotor med propeller och har en räckvidd på 400 km. Målsökaren är en passiv radarmålsökare. Efter målfångning dyker HARPY mot målet i en vertikal bana. Om radarn sluta sända före HARPY nått en förutbestämd beslutshöjd, avbryts patrulleringen tills radarn börjar sända igen.

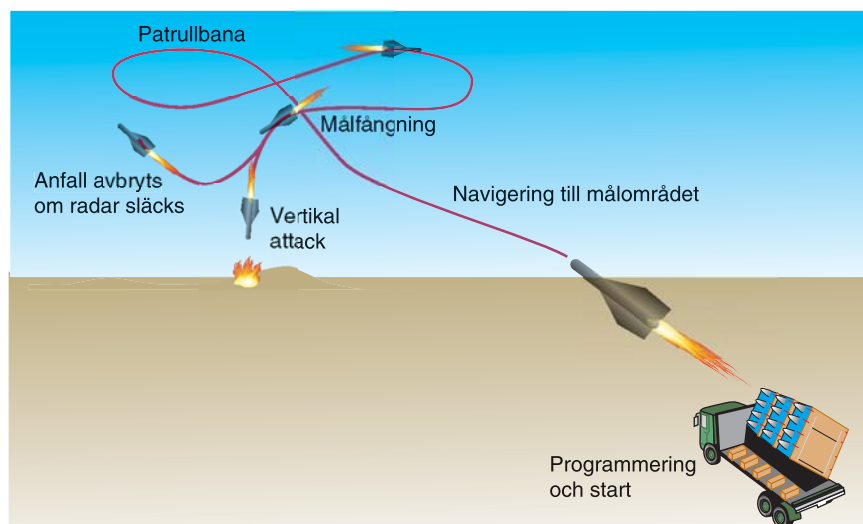


Bild 4:37. HARPY – taktiskt utnyttjande.

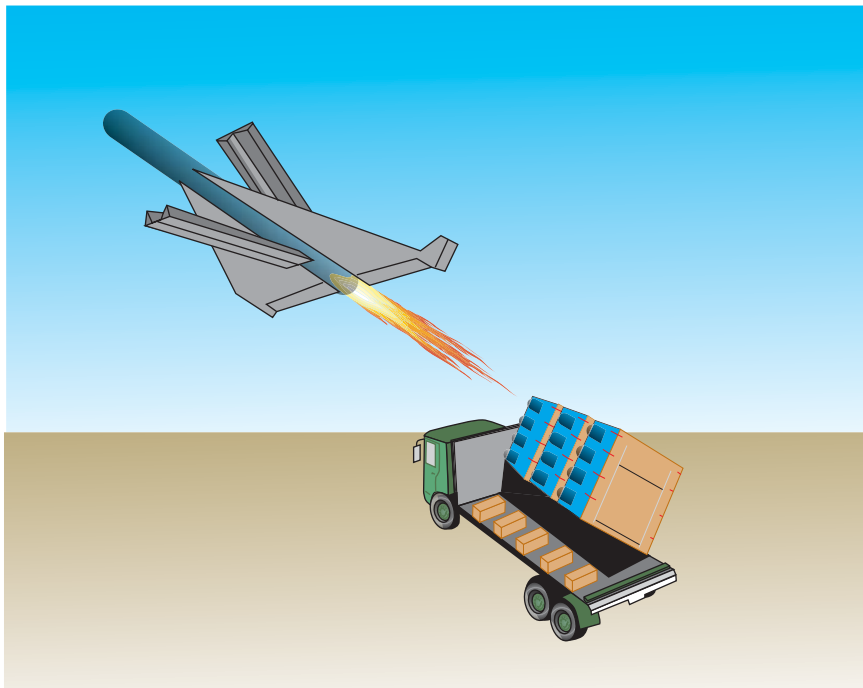


Bild 4:38. HARPY avfyras från containerfordon.

HARPY förvaras och transporteras i ett containerfordon som även används som avskjutningsramp. Ett batteri består av en markkontroll och tre skjutenheter med vardera 18 HARPY.

Tabell: 4:3. Data för HARPY.

Längd	2,3 m
Spännvidd	2,0 m
Stridsdelsvikt	32 kg
Startvikt	135 kg
Målsökare	Passiv radar
Motor	2-cyl, 2-takt, propeller
Motorstyrka	28 hk
Maxfart	250 km/h
Flyghöjd	3000 m
Räckvidd	> 500 km
Patrulltid	2 h, 400 km från start

Multipla målsökare

För att öka träffsannolikheten och minska påverkan av intermittent sändning kommer robotarna i framtiden att utrustas med ytterligare en målsökare, t ex en passiv IR-målsökare, vilken under slutfasen kan styra roboten mot målet.

Ett exempel på ett sådant system är det tyska utvecklingsprojektet Armiger. Armiger är en tysk signalsökande robot avsedd att ersätta AGM-88 HARM. Armiger ska även kunna användas mot flygplan typ AWACS samt mot avskjutningsramper för taktiska ballistiska robotar. Den är försedd med en bildalstrande IR-målsökare som ett komplement till den bredbandiga passiva radarmålsökaren (0,1–18 GHz). IR-målsökaren arbetar inom våglängdsområdet 8–12 mm. Två fördelar med IR-målsökaren är att vinkelnoggrannheten är betydligt bättre än för ett radarsystem. Det planeras även för en aktiv millimetervågmålsökare (94 GHz). Träffnoggrannheten bedöms vara 1–2 m jämfört med 10 m för HARM. Armiger ska utrustas med en datalänk som medger uppdatering i banan och gör att roboten kan sända en målbild (IR) strax före träff för att underlätta resultatvärderingen.

Roboten är försedd med en ramjetmotor som ger den hög fart (mach 2-3) och lång räckvidd (upp till 200 km).

Produktionen inleds tidigast 2010.

Tabell 4:4. Data för Armiger.

Längd	4,0 m
Diameter	0,20 m
Stridsdel	20 kg
Vikt	220 kg
Motor	Raketbooster/ramjet
Fart	M 2-3
Navigering	GPS/TN
Räckvidd	100-200 km
Målsökare	Passiv radar/IR

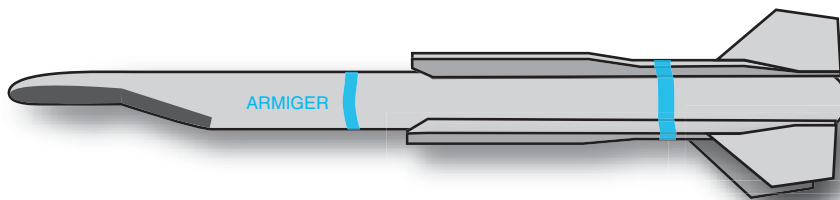


Bild 4:39 . Armiger

Varnar- och motverkanssystem

Allmänt

Tidigare var flygplanen utrustade med flera olika motverkanssystem som arbetade oberoende av varandra, t ex ett som skötte elektronisk störning, ett annat hade hand om rems- och fackelfällning. De olika systemen utbytte lite eller ingen information emellan. Detta innebar att flygplanet t ex kunde ha flera likartade signalspaningsutrustningar. Man försöker numera att koppla samman flygplanets alla motmedelsutrustningar, radarvarnare, robotskottvarnare m m till ett kombinerat system, ett varnar- och motverkanssystem (VMS). VMS utvärderar de olika varnarsignalerna, presenterar hoten för piloten och sätter eventuellt automatiskt in motåtgärder. Syftet med att integrera de olika utrustningarna till ett system är att öka den totala motverkans effekten.

En störutrustning måste innehålla någon mottagarfunktion, annars sker störningen med stor sannolikhet mot fel frekvens och vid fel tillfälle. Ett okontrollerat nyttjande av telestörning kan motverka sitt syfte. Istället för att dölja flygföretaget kan det komma att avslöja det samt störa egen utrustning.

Mottagarfunktionen detekterar, mäter in och analyserar radarsignaler och utgörs i vissa fall av flygplanets radarvarnare, i andra fall är den inbyggd i störutrustningen. Utrustningen fastställer olika data för radarsignalen. Ju mer avancerad spaningsutrustning desto fler parametrar kan fastställas. Ju bättre radarsignalerna kan analyseras desto större blir möjligheterna för störsändaren att kunna alstra en effektiv störform.

Varnarutrustningens prestanda är ofta den begränsande faktorn i ett motverkanssystem. Om en radarvarnare t ex inte klarar av att detektera och mäta in signalerna från t ex en PS-91 så kommer inte heller störningen att kopplas på vid rätt tillfälle. Störverkan kan då bli låg eller utebli helt.

Spanings- och attackflygplan tvingas ofta av utrymmesskäl att använda störutrustningar som monteras utanpå flygplansskrovet i form av störkapslar.

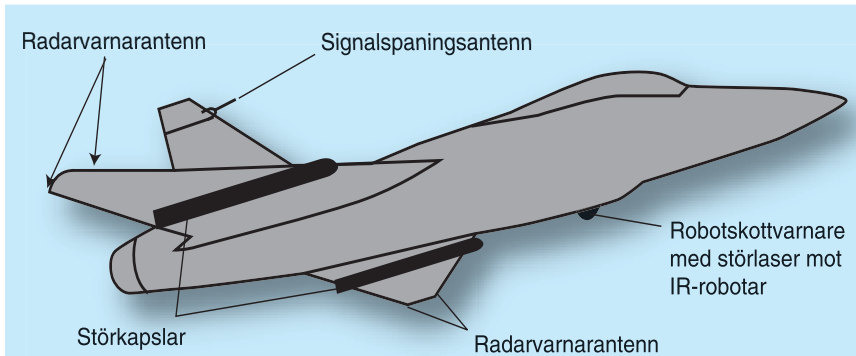


Bild 4:40. Exempel på placering av utrustningen i ett varnar- och motverkanssystem.

Under senare år har det dock blivit vanligt att avancerade motverkanssystem integreras i flygplanskroppen redan vid konstruktionen av flygplanet. Vissa uppgifter gör gällande att kostnaderna för telekrigsutrustningen på ett modernt flygplan kan uppgå till 20–30 % av flygplanets totala kostnad i s k stealth flygplan ändå mer.

I jakt- och attackflygplan är störutrustningarna främst avsedda för egen-skydd mot motståndarens jaktradar eller mot eldledningsradar i lvakan- och lvrobotsystem. Dessa störutrustningar är ofta helt automatiserade, varvid systemen själva svarar för signaldetektering, identifiering, störprioritering, val av störformer och tidpunkt för störinsats. Piloten har vanligen möjligheter att överrida automatiken när han bedömer att detta ger bättre resultat.

Specialbyggda flygplan för störning t ex medstörare eller bakgrundsstörare har ofta en eller flera operatörer med uppgift att övervaka automa-tiken och vara beredda att själva manuellt välja den mest optimala stör-formen.

Systemuppbyggnad

Vid konstruktion av ett motverkanssystem försöker konstruktörerna upp-fylla flera ibland motsägelsefulla krav som

- stor bandbredd
- hög uteffekt
- hög verkningsgrad
- stor fas-, frekvens- och amplitudstabilitet
- låg vikt och volym.

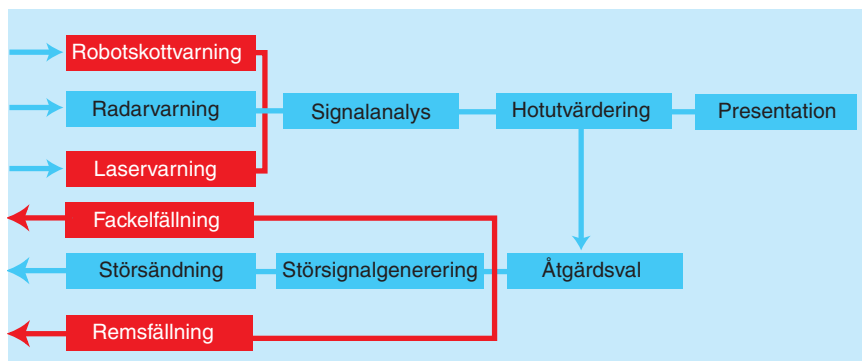


Bild 4:41. Funktioner inom ett modernt varnare- och motverkanssystem.
Blått – grundkomponenter, rött – tilläggskomponenter.

Varnare och motverkanssystemet består vanligtvis av fyra huvuddelar.

1. Radarvarning inklusive signalanalys.
2. Hotutvärdering och åtgärdsval.
3. Störsändning inklusive störsignalgenerering.
4. Presentation.

I moderna system ingår vanligen även

- robotskottvarnare
- laservarnare
- remsfällare
- fackelfällare
- släpat aktivt skenmål.

Robotskottvarnare

Under de senaste decenniernas krig har passiva IR-robotar orsakat stor del av förluster av såväl flygplan som helikoptrar eftersom dessa inte lika tydligt ger en förvarning såsom aktiva radarsystem gör. Andra hot är de laserledstråle styrda robotsystemen. Det har därför blivit viktigt att utveckla utrustning som varnar piloten och eventuellt automatiskt utlöser olika former av motåtgärder som t ex fackel- och remsfällning då en robot närmar sig. Tre funktionsprinciper är vanliga för robotskottsvarnare.

- radar
- IR-sensor
- UV-sensor.

Ibland utnyttjas flera funktionsprinciper samtidigt. Varningen kan baseras på indirekta eller direkta observationer.

Exempel på *indirekta observationer* kan vara att radarvarnaren rapporterar att motståndarens radar har gått över i den speciella mod som används för eldledning av en robot eller att planets laservarnare anger att planet är belyst av en laserledstråle.

Man eftersträvar att använda *direkt observation* eftersom det anger att en faktisk robot, är på väg mot flygplanet. Robotskottvarnarna fungerar antingen med hjälp av en pulsdopplerradar eller genom någon form av IR- eller UV-system, vilka känner den upphettning som luften ger upphov till på robotens nos eller strålningen från robotmotorn.

Vissa robotskottvarnare nyttjar en dopplerradar för att upptäcka den annalkande roboten. Fördelarna är allväderskapacitet, lång räckvidd och möjlighet att mäta avståndet till roboten. Nackdelen är att radarn kan pejlas och riskerar därmed att avslöja flygföretaget.

UV- och IR-systemen har fördelen av att vara passiva och avslöjar därmed inte flygplanet genom några röjande signaler. Ytterligare fördel är att de har god vinkelnoggrannhet och används därför i vissa VMS-system för att rikta in en störlaser mot IR-roboten som vilseleder eller förstör dess IR-målsökare. Nackdelen med IR-systemen är att det kan uppstå en hel del falsklarm. För UV-systemen krävs att raketmotorn fortfarande brinner för att målen ska kunna detekteras. Ofta kombineras UV- och IR-varnare för att dra nytta av de båda sensortypernas fördelar.

Ett generellt problem med robotvarnarna är att de måste täcka ett stort vinkelområde, ofta hela sfären runt flygplanet, och att roboten har liten signatur. För att minska falsklarmen och höja systemets känslighet kan radarvarnaren användas för att rikta in IR-detektorerna i den riktning som bedöms hotfullast. En generell nackdel med både UV- och IR-system är att de inte ger avståndsinformation. För att ändå få en grov uppfattning om avståndet används signalstyrkan. Utvecklingen tycks gå mot fler passiva robotskottvarnare.

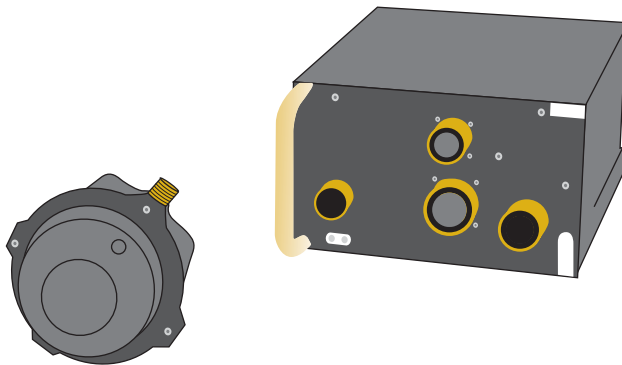


Bild 4:42. Robotskottvarnare.

Robotskottvarnare AN/AAR-54 är ett modernt exempel på en robotskottvarnare. Systemet kan själv initiera fackelfällning eller låta en dator ombord på flygplanet starta motåtgärder.

Systemets UV-sensor uppfattar explosionen som uppstår när en robotmotor tänds och avvaktar för att se om en avlång raketflamma träder fram ur krutmolnet. Detta diskriminerar mynningsflammar vid kanoneld. Systemet har, enligt tillverkaren, väldigt kort reaktionstid, ca 0,1 sekunder.

De modernaste VMS-systemen har idag både robotskottvarnare och laservarnare.

Laservarnare

Under senare tid har det blivit allt vanligare att flygplan, helikopter och stridsfordon utrustas med laservarnare för att ge varning mot laseravståndsmätare och vapensystem som styrs av laser. Piloten får en varning om att denne är belyst med laser och ger en vinkelinvisning på 2° – 90° beroende på utförande av laservarnare. Laseravståndsmätare t ex till LvKv upptäcks med stor sannolikhet. Mera avancerade laservarnare krävs för att ge varning mot robotsystem som styrs med laserledstråle, t ex RBS 70 och 90. Orsaken är att dessa system har låg lasereffekt.

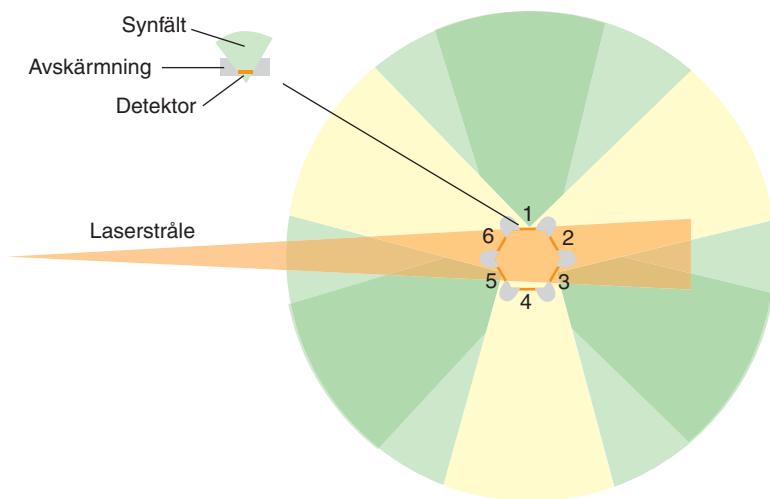


Bild 4:43. Princip för enkel laservarnare för 90° sektorinvisning (uppe till vänster). Genom att som här kombinera sex laservarnare kan hela varvet täckas in med vinkelinvisning på 30° . Laservarnarna monteras ofta åtskilda för att få bättre vinkeltäckning.

Radarvarnare

Radarvarnare nyttjades redan under andra världskriget. Bl a använde tyskarna en radarvarnare, Metox, på sina ubåtar. Denna var konstruerad

för att detektera radarstationer som använde 1,5 meters våglängd. När engelsmännen senare konstruerade magnetronen, vilken möjliggjorde våglängder på ca 10 cm, drabbades tyskarna av stora ubåtsförluster, eftersom de inte längre fick någon varning för ett annalkande flygplan. Från och med 1960-talet utrustades de flesta jakt- och attackflygplan med olika former av radarvarnare.

Radarvarnaren är numera endast en del av flygplanets totala varnarutrustning. Radarvarnaren kan sägas arbeta i stegen

- signalspaning
- hotutvärdering och signalanalys
- hotpresentation.

Signalspaning

Radarvarnarens känslighet – en kompromiss

Begreppet signalmiljö brukar användas för att illustrera mängden signaler i etern. Utvecklingen går mot att signalmiljön blir allt tätare. Denna utveckling gäller såväl militära som civila signaler. Mängden signaler en radarvarnare tar emot beror bl a på mottagarens känslighet och flygplanets höjd.

Exempel 4:3

Antag att ett flygplan befinner sig på 500 meters höjd. Avståndet (d km)

till radarhorisonten blir enligt formeln $d = 4,1\sqrt{h}$ (där h = antennhöjden i m) ca 90 km. Antag vidare att det inom denna radie finns 10 radarstationer vars signaler når flygplanets varnarutrustning. Om respektive radarstation sänder 5000 pulser per sekund kommer flygplanet att nås av $10 \cdot 5000 = 50000$ pulser under varje sekund.

I en tät signalmiljö kan det idag röra sig om 1-10 miljoner pulser per sekund.

Signalspaningsutrustningen måste på mycket kort tid hinna analysera vilka signaler som kommer från olika typer av radarstationer.

Flertalet av de signaler som når ett flygplans radarvarnare kommer från radarstationer som befinner sig så långt bort att de inte har någon möjlighet att upptäcka flygplanet. Radarvarnaren måste därför kunna skilja på signaler som befinner sig tillräckligt nära för att utgöra ett hot och sådana signaler från stationer som befinner sig för långt bort. Annars kommer hela tiden larm från radarvarnaren, vilket kan leda till att piloten inte kommer att ta de verkliga hoten på allvar.

När det gäller en eldledningsradar t ex PE-23 eller PE-542 är det relativt enkelt att fastställa om de låst på flygplanet eller befinner sig under

spaningsfas eftersom en eldledningsradar vid låsning kontinuerligt belyser målet. Men hur ska radarvarnaren kunna avgöra om en spaningsradar t ex PS-70 eller PS-91 upptäckt flygplanet och därmed utgör ett hot?

En äldre, enkel men mindre lämplig metod att få en uppfattning om avståndet till radarn och därmed om den kan utgöra ett hot, är att sänka radarvarnarens känslighet så att bara mycket kraftiga signaler detekteras och kan ge larm. Detta innebär också att mängden signaler som kan analyseras sjunker vilket minskar kraven på systemets datakapacitet. Problemet med denna metod är att det inte är säkert att en svag signal kommer från en radar som befinner sig långt borta. Exempelvis har PS-91 betydligt mindre uteffekt än PS-90. Man kan jämföra med hur svårt det är att på natten avgöra om det är ett svagt ljus nära eller ett starkt ljus långt borta. Moderna system försöker istället genom olika former av rikttningsbestämning avgöra radarstationernas position. Denna metod är mer resurskrävande men leder till en avsevärt förbättrad hotanalys och omvärldsuppfattning.

Hotutvärdering och signalanalys

För att kontinuerligt veta vilka hot, som är viktigast att kunna påverka, genomförs signalanalys och hotutvärdering. Hotutvärderingen sker på likartat vis oavsett om det gäller flygplanets radarvarnare, en störkapsel eller ett VMS-system. I signalbiblioteket finns data lagrat för olika typer av radarstationer. Bearbetning och analys av nya typer av signaler sker delvis manuellt före de lagras i systemets signalbibliotek. I Sverige sker detta genom FMTKSE (FörsvarsMaktens TeleKrigsStöd Enhet).

Styrdatorn nyttjar signalbiblioteket för att kontrollera vilka radarstationer som stämmer med insamlade data. Datorn fastställer därefter vilken radar-typ det är som sänder.

För att bestämma typ av radar och vilken mod radarn befinner sig i mäter radarvarnaren varje inkommande puls (bl a ankomstriktnings, bär-frekvens, pulslängd, pulsamplitud och ankomsttid) och skapar en digital beskrivning en s k pulskdeskriptor (Pulse Description Word – PDW). Radarvarnarens pulssortering ordnar sedan dessa PDW i grupper där varje grupp idealt består av PDW från en och samma radar. Varje sådan emitter får en beskrivning och med denna går man sedan in i ett signalbibliotek (emitterbibliotek) och identifierar radarn.

För att få en uppfattning om en radar befinner sig tillräckligt nära för att utgöra ett hot görs upprepade rikttningsbestämningar för att fastställa radarstationernas lägen, därefter jämförs signalernas parametrar med signalbiblioteket. På så vis kan man hotklassificera radarn, genom att man vet var stationen befinner sig, vilken typ av system det är och vilken mod den befinner sig i. Radarvarnaren har nu underlag för en hotbedömning som t ex kan vara avgörande för en störinsats.

Principen för att identifiera en radar

Generellt måste man i förväg veta vilka hot som kan förekomma och vilka moder radarstationerna kan använda. Denna information ska finnas lagrad i radarvarnaren. Identifieringen sker efter följande principer:

- De enklaste analyserna sker först. Det är vanligtvis de som endast kräver en bredbandig mottagare och går att utföra på någon enstaka puls.
- Mer tids- och resurskrävande analyser sker efter hand.
- Analysen avbryts så snart tillräckligt med data samlats in för att bestämma typ av station.

Som exempel på hur en radarvarnare arbetar ska vi se hur den arbetar för att särskilja några olika typer av pulsradar.

De parametrar som i detta exempel krävs för att särskilja stationerna är

- frekvens
- pulslängd
- PRF
- antennens avsökningsmönster.

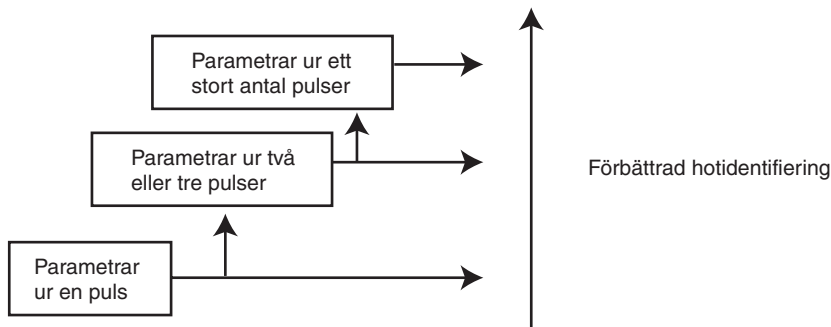


Bild 4:44. Hotutvärderingen börjar med de parametrar som går snabbast att utvärdera.

Radarvarnare kommer att börja med att försöka bestämma hotet genom de parametrar den kan läsa ut ur en enskild puls (frekvens och pulslängd). Om hotet kan identifieras av bara dessa två parametrar så kommer utrustningens dator avbryta sitt arbete och rapportera hotets identitet (bild 4:44).

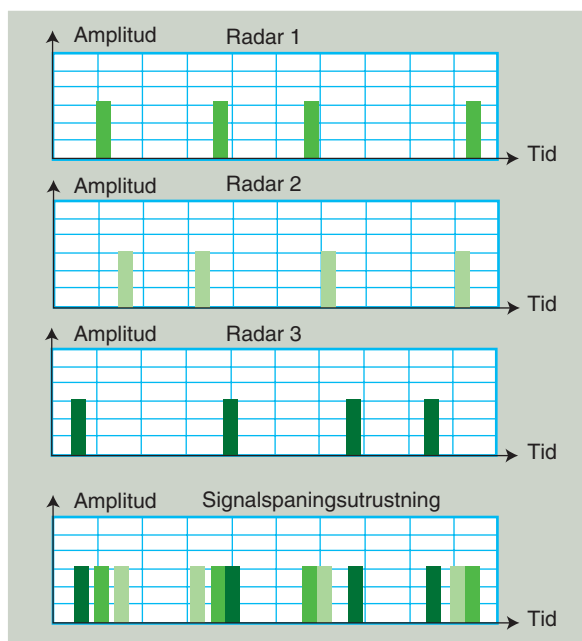


Bild 4:45. Svårigheterna att analysera signalerna ökar då radarstationerna använder staggered PRF eftersom ordningen mellan signalerna kommer att variera.

I nästa steg analyserar radarvarnaren pulsrepetitionsfrekvensen, detta kräver i teorin bara två pulser och är den näst enklaste analysen. Det kan dock bli komplikationer om det finns flera samtidiga radarsignaler eller om radarn använder staggered PRF. Detta kan leda till att det tar längre tid att analysera PRF än vad som teoretiskt vore möjligt.

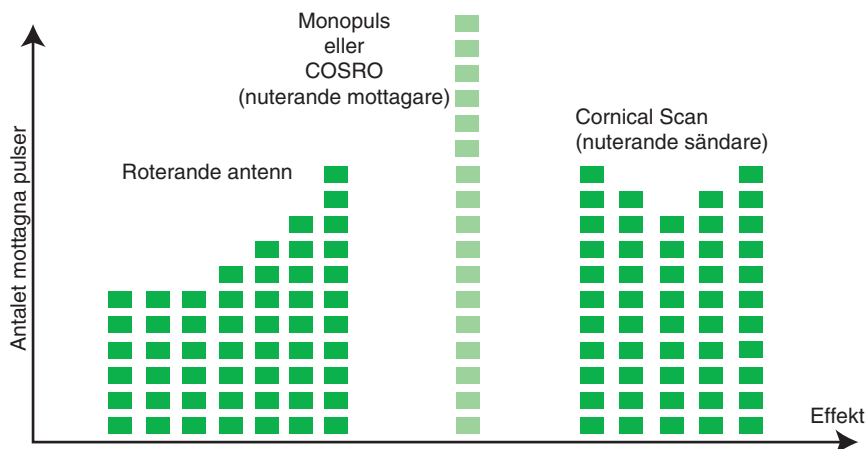


Bild 4:46. Den i radarvarnaren mottagna signaleffekten varierar beroende på radarns sökmod och vinkelföljningssystem. (Adamy)

Om analysen av PRF ger tillräcklig information för att identifiera radarn avbryts analysen här.

I det sista steget analyseras antennens sökmönster och antenndiagrammet. Detta innebär en analys av hur signalens amplitud varierar under ett stort antal pulser. Under analysens gång kommer man dessutom att motta signaler från många radarstationer, detta innebär att varnaren inte får blanda samman de olika signalerna. Denna analys är svårast och tar längst tid. Tiden det tar att avgöra antennens sökmönster är ofta av samma storleksordning som vad som överhuvudtaget kan anses vara acceptabel tid för radarvarnaren att bestämma hotets identitet innan det kan vara försent att vidta motåtgärder.

Hotpresentation

Om hotvärderingen ingår i flygplanets radarvarningssystem ges piloten information från datorn om vilken typ av radar som belyser flygplanet. Varningen till piloten kan ske genom lampor, olika former av ljudsignaler eller syntetiskt tal, som anger t ex typ av radar, radarmod och riktning.

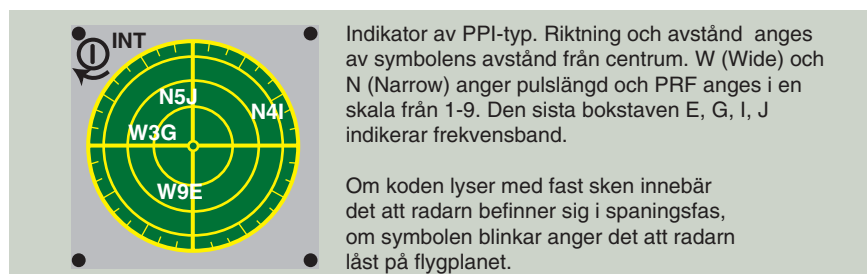


Bild 4:47. Hotpresentation hos radarvarnare AN/ALR-606(VE).

Exempel på presentationsutrustning

Äldre varnarutrustningar använde ofta ett antal lampor som angav riktningen till hotet, andra lampor visade typ av hotradar. Utrustningen hade ofta en form av akustiskt larm som angav att en eldledningsradar var låst på eget flygplan. I vissa utrustningar presenterades hotet i pilotens hörlurar genom att radarns PRF gjorts hörbar. När t ex eldledningsradarn till SA-2 låst på flygplanet hördes då en rasslande signal med ca 2 – 5 kHz frekvens (radarns PRF). Systemets spaningsradar hördes som ett ”knäpp” varje gång antennloben svepte förbi flygplanet.

Modernare varnarutrustningar kan använda syntetiskt tal som t ex anger ”SA-6, spaning riktning 11”. Ett annat modernare sätt att ange riktningen till hotet snabbt är att systemet nyttjar 3D-ljud (”surround” - ljud) i pilotens hörlurar. Piloten kommer då att instinktivt att titta i riktning mot hotet.

AN/ALR-606 (bild 4:47) är ett exempel på ett vanligt sätt att grafiskt visa riktning, avstånd och typ av hot.

4. Telekrigföring

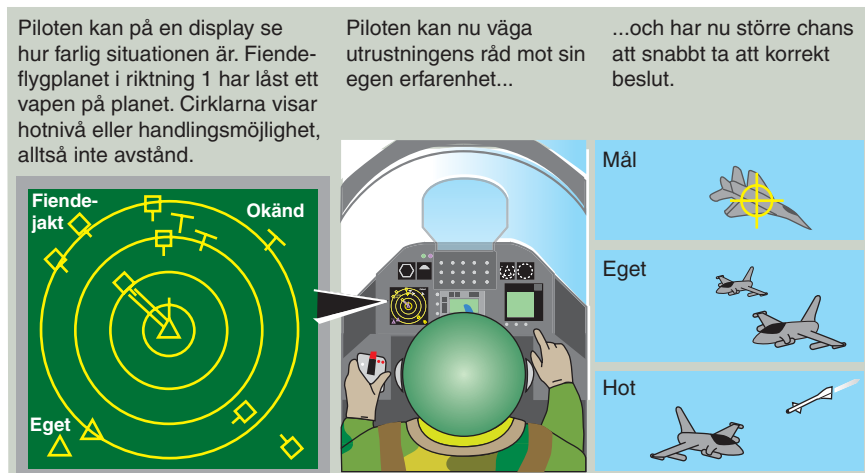


Bild 4:48. Modern hotpresentation.

Att ett system befinner sig nära ett flygplan behöver inte innebära att det utgör det största hotet. I bild 4:48 visas ett exempel på en modern utrustning som presenterar riktning, typ och hotnivå. Ju närmare centrum en symbol befinner sig desto större hot utgör det aktuella systemet (oavsett det geografiska avståndet). Fördelen är att piloten alltid vet att koncentrera sig på rätt hot.

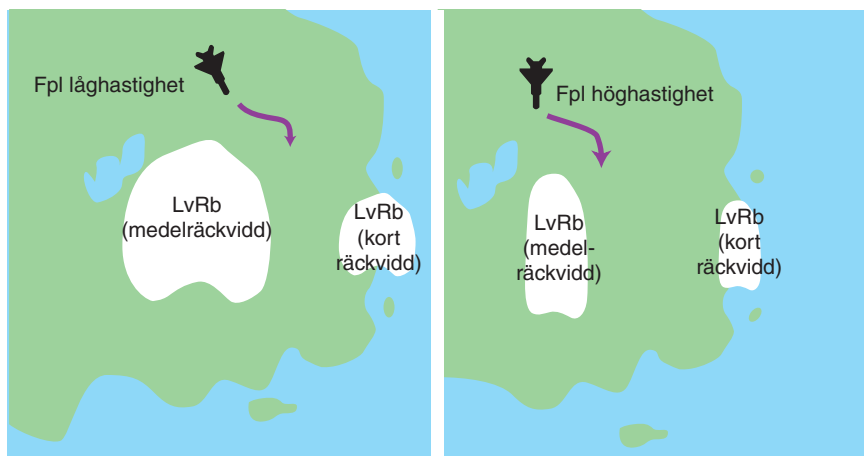


Bild 4:49. Varnar- och motmedelssystemet ritar på pilotens kartpresentation ut hotområden. Områdenas storlek avgörs av t ex typ av lvsystem samt flygplanets höjd och hastighet. Piloten kan sedan undvika dessa områden.

I nyare system används också flygplanets kartpresentation för att visa var hoten finns geografiskt. På kartan presenteras de luftvärnshot som är kända redan från företagsplaneringen. Under färden ritas sedan de hot ut som

mäts in av VMS-systemet. I vissa system kan även hotinformation överföras på länk från annat flygplan eller från stridsledning på marken. Då hotområdena ritas ut, tar utrustningen hänsyn till kända prestanda hos luftvärnssystemet, t ex räckvidd och höjdtäckning. Beroende på flygplanets hastighet och kurs förändras hotområdenas utseende. Ju fortare flygplanet flyger desto mindre blir de farliga områdena. Systemet rekommenderar i vissa fall en flygväg som gör att flygplanet befinner sig i mask i förhållande till luftvärnssystemet. För att åskådliggöra hur piloten ska styra finns 3D-modeller där optimal färdväg ritas på headup-displayen som en tredimensionell ”tub”. Piloten ska försöka hålla flygplanet inom ”tuben”, flygplanet är då utom räckhåll för luftvärnssystemet. Luftvärnets verkansområde ritas på motsvarande vis som halvsfärer ”ostkuper”.

För att systemet ska fungera är det av yttersta vikt att hotbiblioteken är precisa och aktuella.

Åtgärdsval

Efter hotutvärderingen vet styrdatoren vilken eller vilka av radarstationerna som utgör det största hotet. Utrustningen ska efter hotutvärdering ange en lämplig motåtgärd exempelvis

- maskerande störsändning (brus osv)
- vilseledande störning (avhakning osv)
- remsor
- facklor
- störlaser mot IR-robotar och optiska sikten
- undanmanöver.

Datoren styr slutligen motverkansutrustningen till att alstra den mest optimala störformen mot den aktuella radarstationen eller hjälper flygföraren att göra undanmanöver t ex genom att ge styrrekommendationer hur flygplanet ska läggas i nolldopplarsväng.

Motverkansutrustning

När hotet väl har identifierats och en åtgärd är vald ska störutrustningen vidta motåtgärder. Flygplanen är numera oftast utrustade med rems- och fackelfällare samt elektronisk störutrustning. Tidigare var störutrustning en form av ”extra skydd” som togs med vid särskilda typer av uppdrag. Numera är det snarast regel att ta med störutrustning.

Motverkansutrustningen har traditionellt varit monterat i kapslar (s k podar) som hängts på flygplanets vapenbalkar. Exempel på svenska motmedelskapslar är

- Adrian S - övningsstörkapsel S-band

4. Telekrigföring

- U 95 – störkapsel X-band
- Kapsel KB – rems- och fackelfällningskapsel.

En kapsel kan ofta bara störa ett radarband åt gången. Fördelen med störkapselmonterade system är att man har viss möjlighet att variera utrustningen med hänsyn till uppdrag (och eventuellt lämna den hemma). Nackdelarna med kapslar är att de stjälar plats för vapenlasten. En kapsel upptar en vapenbalk. Företaget SAAB har fått stora framgångar med sin remsfällare BOL som är inbyggd inuti vapenbalkarna och därmed inte stjälar någon plats för vapenlasten. BOL är såld till både Nato och Sverige (för JAS 39).

Flygplanen får numera ofta en viss grundstörutrustning inbyggd i flygplanskroppen. För mer avancerade uppdrag kan kvalificerade kapslar medföras.

Eldledningsradar och radarmålsökare av monopolstyp är svåra att störa. Flygplanen utrustas därför med släpande störsändare. Störsändaren släpas i en vajer 100-200 m bakom flygplanet.

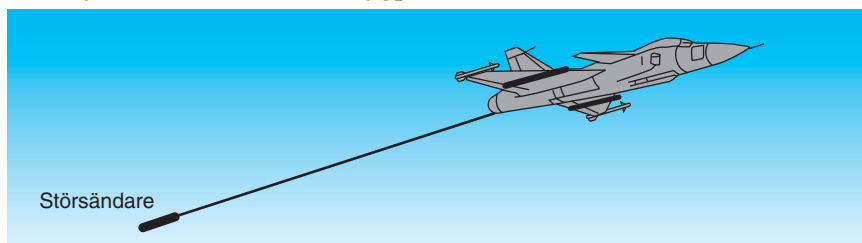


Bild 4:50. Släpad störsändare.

Den släpande störsändaren kommer att alstra en kraftigare signal än flygplanets eko. En eldledningsradar eller en målsökare kommer därför att välja störsändaren istället för flygplanet. En robot i home on jam-mod styr mot den kraftigaste störsignalen, att då ha störsändaren 100 m bakom flygplanet istället för under vingarna ökar möjligheterna för piloten att överleva. Notera att robotens zoner troligen inte kommer att utlösas eftersom skenmålet har alltför liten fysisk area! Ett flygplan har ofta med sig två till tre släpande skenmål i reserv, dessa förvaras oftast i behållare på en störkapsel. Efter uppdraget släpps det släpande skenmålet eftersom flygplanet normalt saknar vinschanordning för att kunna bärga det.

Ett annat revolutionerande motmedel är laserstörsändare mot IR-robotar, s k DIRCM (Directed InfraRed Counter Measures). En robotskottvarnare riktar in systemets störlaser mot IR-roboten. Lasern förblindar eller vilseleder robotens målsökare så att roboten missar målet. Hitintills har denna utrustning främst varit placerad på helikopter och transportflyg.

Framtidens radarantennor kommer att vara uppbyggda av hundratals sändar- och mottagarelement. Utvecklingen pågår för att omväxlande och

mer eller mindre samtidigt kunna utnyttja nosantennen som radar, signal-spaningsutrustning och störsändare. Genom nosantennens stora antennförstärkning kommer detta innebära att störverkan kan öka betydligt.

Den stora revolutionen på radarmotmedelsområdet är att störutrustningen utrustas med så kallade digitala radiofrekventa minnen (DRFM). DRFM gör det möjligt att skapa exakta kopior av radarsignalen. Det gör det enklare än förut att genomföra olika typer av vilseledande störning samt skapa effektivt smabandigt brus även mot pulskompressionsradar.

Antenner

Ett VMS-system är utrustat med en stor mängd antenner för att ha god omvärldsuppfattning i så många riktningar som möjligt och för att kunna störa i olika riktningar. Normalt sett används inte samma antenner för mottagning som sändning. En viktig egenskap är att försöka få antennerna så bredbandiga som möjligt.

Till mottagarantenn används ofta planspiralantennerna på grund av deras förmåga att arbeta över stora frekvensområden samt begränsade storlek och låga vikt. Typiskt täcker planspiralantennen 2-18 GHz. Om två planspiralantennerna används tillsammans för att riktningsbestämma med interferometri blir riktningsbestämningen entydig inom maximalt 1 oktav (oktav = dubbla frekvensen t.ex. 1-2 eller 4-8 osv). Genom att utnyttja antenner på olika avstånd kan entydig riktningsbestämning ske inom hela det önskade området.

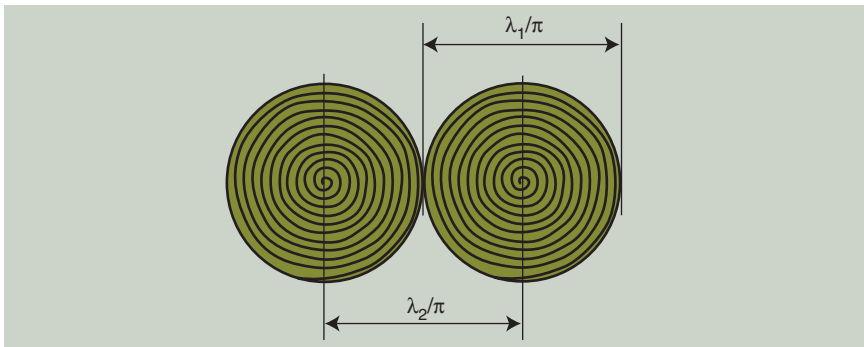


Bild 4:51. Planspiralantennerna. Den lägsta användbara frekvensen bestäms av ytterdiametern. Den högsta frekvensen för entydig riktningsbestämning med interferometri bestäms av avståndet mellan antennernas centrum. λ_1 = våglängden vid den lägsta frekvensen. λ_2 = våglängden vid den högsta frekvensen.

Som störsändarantennerna används t.ex. hornantennerna eller koniska spiralantennerna. Mycket arbete har lagts ner på att skapa elektroniskt styrda antenner som snabbt riktar störningen i önskad riktning. Dessa system har hitintills oftast visat sig komplexa och dyra. Den tekniska utvecklingen kommer dock att göra elektroniskt styrda störantennerna mer vanliga.

4. Telekrigföring

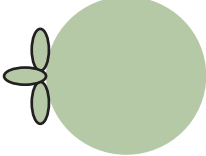
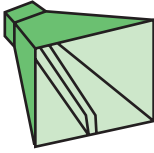
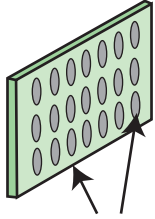
Antenntyp	Antenndiagram Az = Azimut El = Elevation	Tekniska data
Planspiral 	Az och El 	Polarisation: Cirkulär Lobbredd: $15^\circ \times 15^\circ$ Förstärkning: 0 dB Bandbredd: > 10 till 1 Frekvensområde: VHF till mmvåg
Konisk spiral 	Az och El 	Polarisation: Cirkulär Lobbredd: $60^\circ \times 60^\circ$ Förstärkning: 5 till 8 dB Bandbredd: 4 till 1 Frekvensområde: UHF till mikrovågor
Horn 	El  Az 	Polarisation: Linjär Lobbredd: $40^\circ \times 40^\circ$ Förstärkning: 5-10 dB Bandbredd: 4 till 1 Frekvensområde: VHF till millimetervågor
Fasstyrd antennarray 	El  Az 	Polarisation: Beror på antenn-elementen Lobbredd: Beror på mängden antennelement Förstärkning: 10-40 dB Bandbredd: 3 till 1 Frekvensområde: VHF till millimetervågor

Bild 4:52. Exempel på antenner i ett VMS-system.

Elektroniskt styrda antenner används tillsammans med mini TWT eller transistoriserade sändare vilket innebär att flygplanet mycket effektivare kan använda sin tillgängliga störeffekt, eftersom bara en liten del av effekten kommer att ödslas bort i felaktiga riktningar. På ännu längre sikt är förhoppningen att kunna tillverka så små och billiga sändar- och mottagar-enheter så att stora delar av flygplansskrovet kan utgöra en stor antenn (en

s k digital gruppantenn). Sändning och mottagning ska kunna riktas i vilken riktning som helst med hög antennförstärkning.

Exempel på modernt motmedelssystem

Bild 4:54 visar den amerikanska egenstörsändaren ALQ -126B installerad i flygplanet F-18 Hornet.

Tabell 4:5. Data för AN/ALQ-126B.

Volym	68 liter
Vikt	86 kg
Effektbehov	3 kVA, max
Frekvensbeteckning	2-18 GHz
Uteffekt	pulseffekt 2,8 kW medeleffekt 150 W
Bärare	F-4, A-6, A-7, F-16, F/A-18, F-14, CF-18 (CAF), F/A-18 (RAAF), EF-18 (spanska FV)

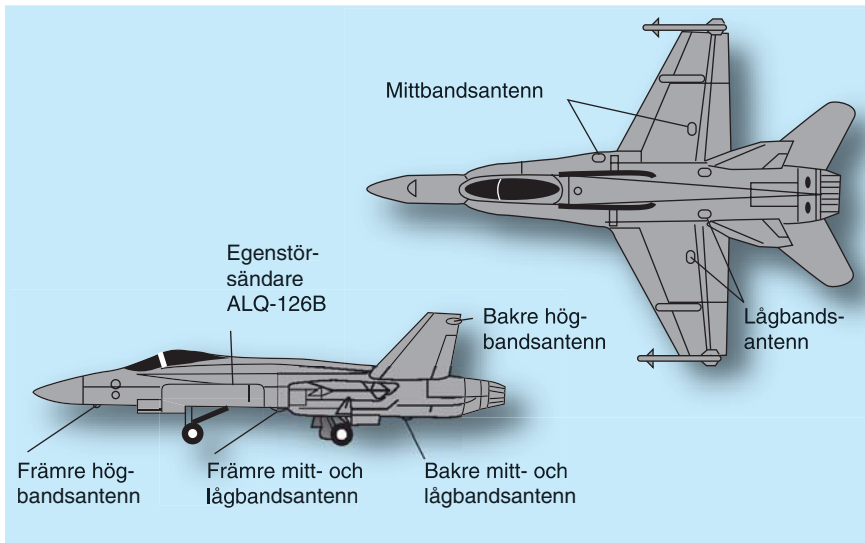


Bild 4:53. ALQ -126B installerad i F-18 Hornet.

Sändarantennerna är nedåt riktade 15° och har en lobbredd av $\pm 60^\circ$. Antennerna är placerade i stjärt- och nosparti. Systemet är utrustat med signalbibliotek och kan därigenom identifiera och prioritera hot. Störutrustningen samarbetar med varnarsystemet AN/ALR-45/APR-43 eller AN/ALR-67. I grundversionen är ALQ 126-B en störsändare mot pulssade radarsystem. Men systemet kan kompletteras med AN/ALQ-162, en CW störare vilket gör att systemet kan utföra hastighetsavhakning.

Olika störmetoder

Telekrigföringen kan, beroende på om någon energi sänds ut eller inte, indelas i

- aktiv störning, vilket innebär att elektromagnetisk energi genereras av störsändare för att påverka radarn
- passiv störning såsom remsor, reflektorer (skenmål) och radarabsorberande materiel s k signaturanpassningsteknik (SAT).

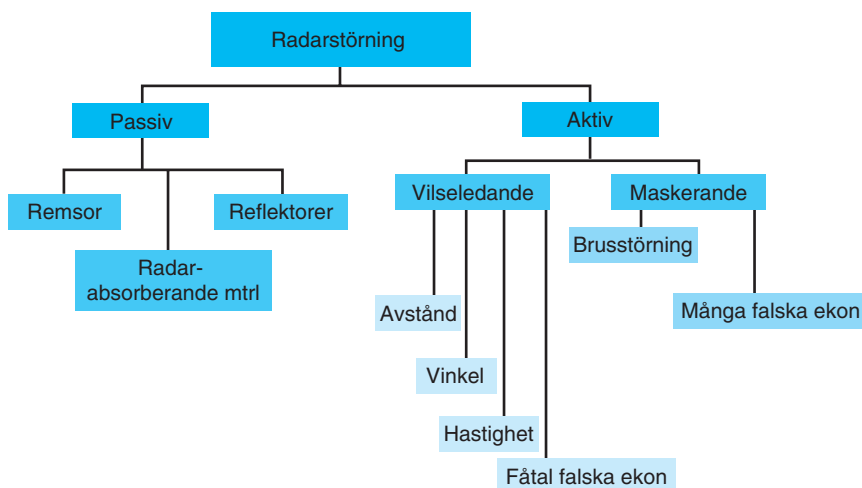


Bild 4:54. Olika störformer och störmoder.

Passiva störmetoder

Passiv störning innebär att motmedelssidan inte nyttjar någon egen energitillförsel. Exempel på passiva störmetoder är

- remsor och radarreflektorer för att skapa falska ekon som vilseleder eller döljer riktiga mål
- radarkamouflage, s k stealthteknik, för att minimera den radarreflekterande ytan och därmed minska risken för upptäckt.

Remsor

En av de första metoderna att störa radarstationerna och fortfarande en av de vanligaste är att använda metallbelagda remsor (eng. chaff), vilka reflekterar radarstrålning och därmed skapar ett intryck av att det finns ett stort mål i radarns antennlob.

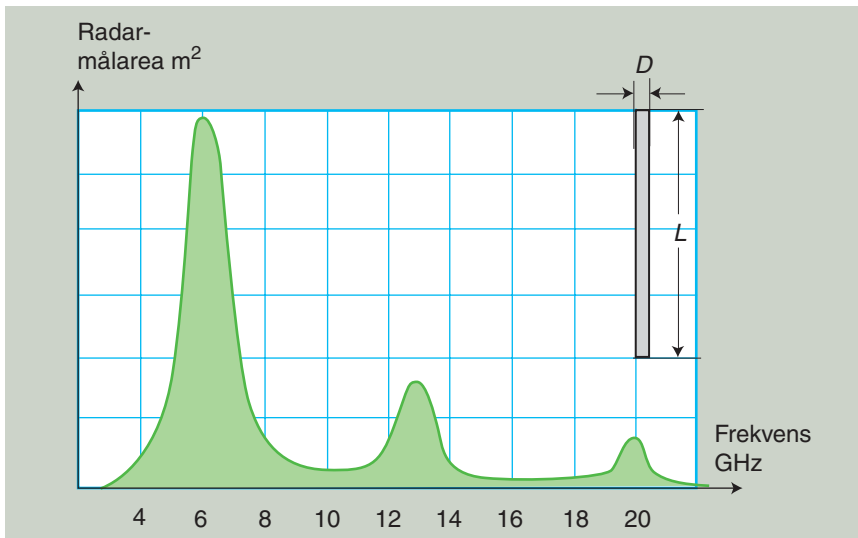


Bild 4:55. Målytan hos en tre cm lång remsa. Bandbredden på resonanstopparna beror på förhållandet mellan remsans diameter, D och längd, L , det s k slankhetstalet (D/L).

Observera att verkan beror på det stora falska målet som remsorna ger upphov till ”dränker” det riktiga målekot. Remsorna hindrar inte radarn att se föremål som befinner sig bortom remsmolnet.

Numera används, istället för metallremsor, tunna metallbelagda nylon- eller glasfibertrådar. Dessa har fördelen att de dels tar betydligt mindre plats samt att de kan hålla sig svävande i luften under betydligt längre tid. Direkt efter att remsor fällts får de en slumpartad orientering men börjar ganska snart finna en horisontell orientering. Genom att utforma remsorna annorlunda, t ex genom att förskjuta tyngdpunkten, kan de fås att falla mer eller mindre vertikalt och då med en högre fallhastighet, vilket ibland är önskvärt. Moderna remsor har en fallhastighet av en halv till en meter per sekund.

Exempel 4:4

Om en remsa släpps på 7 200 meters höjd så tar det två timmar före den når marken.

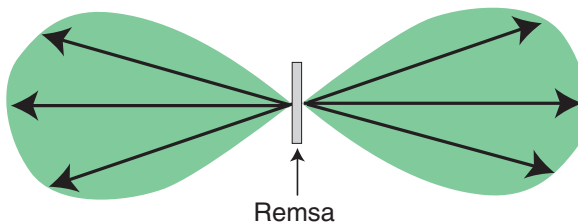


Bild 4:56. Reflektionsdiagram för remsa.

4. Telekrigföring

Remsan fungerar genom att den utgör en sk dipolantenn då den utsätts för radarstrålning. Vanligen används sk halvvågsresonanta remсор. Halvvågsresonanta remсор har en längd som motsvarar halva den belysande radarns våglängd (halvvågs resonanta remсор mot t ex en 10 GHz radar, 3 cm våglängd har en längd på 1,5 cm). Remsans reflektion är störst då remslängden är halva våglängden men är också bra då längden är lika med ett antal halva udda våglängder t ex

$$\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2} \text{ osv}$$

En viss remslängd ger dock tillräckligt bredbandiga reflektioner för att täcka ett helt radarband t ex C-bandet, det hjälper därför inte att byta frekvens i en radarstation.

Radarmålarean från en remsa varierar med hur remsan är orienterad i luften. Den genomsnittliga radarmålarean (σ) från ett remsmoln med väl separerade och slumpmässigt orienterade halvvågsresonanta remсор kan beräknas som

$$\sigma = 0,15 N \cdot \lambda^2 [\text{m}^2]$$

där N = antalet remсор
 λ = våglängden [m]

Det är svårt att tillverka dipolremсор med liten vikt och låg fallhastighet mot frekvenser under 1 GHz. Här kan istället mycket långa metallbelagda rep (engelska rope) användas .

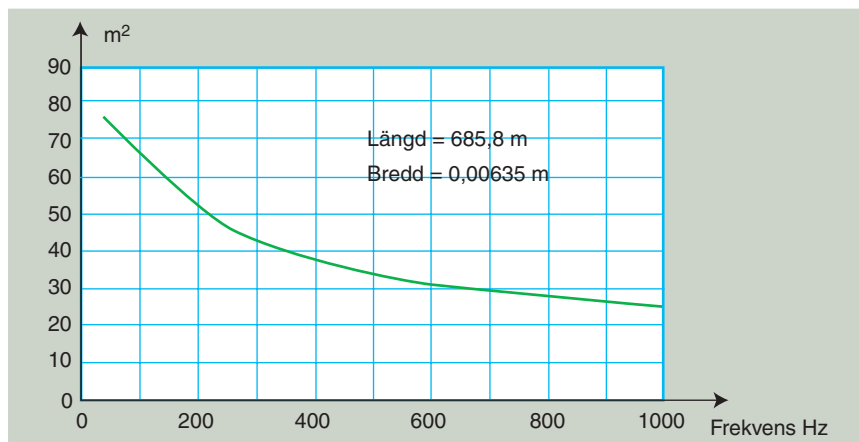


Bild 4:57. Radarmålarea (RCS) för lång remsa.

Remсорnas spridningsmekanism är viktig för att uppnå god remsverkan. Remsmoln där remсорna ligger tätt (< 2 våglängder) skuggar varandra och

bidrar ej till den totala målarean. För att anpassa remsornas längd till aktuellt radarband finns automatiska ”hackningsmaskiner” som när flygplanet blir belyst av en radar, klipper av remsorna i rätt längd före de släpps iväg. Numera är det vanligt att man bestämmer sig före flyguppslaget för vilket/vilka radarband man vill kunna störa och medför färdigklippta remsor. Oftast är det mest önskvärt för attackflygplan att störa radarstationer på X-bandet (tre cm) eftersom flertalet eldlednings- och jaktradar finns i detta våglängdsområde.

Den vanligaste metoden, om man vill vara säker på att störa ett brett frekvensområde är att använda remsbuntar med remsor av olika längd s k bredbandstäckande remsor eller bredbandiga remsor.

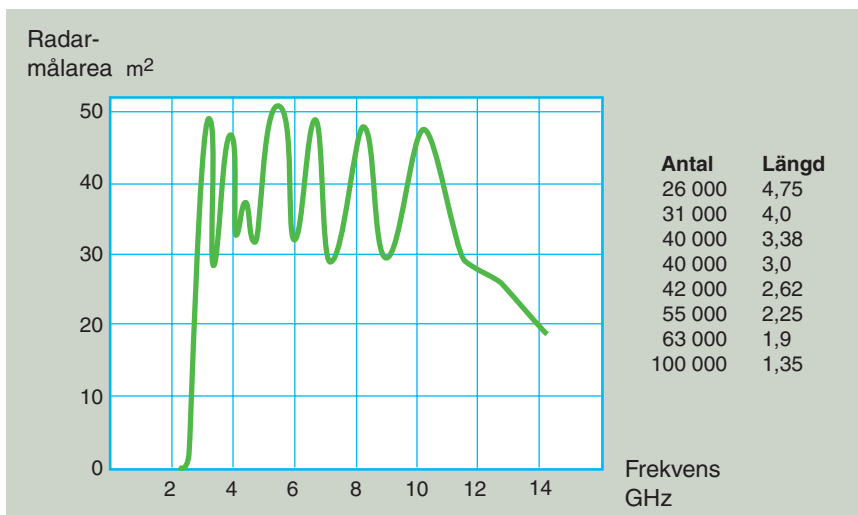


Bild 4:58. Innehållet i en bunt bredbandiga remsor.

Då remsorna började användas under andra världskriget hade inte radarstationerna några metoder att sälla bort markekon eller ekon från t ex regn- moln. När de så småningom utrustades med MTI-behandling (Moving Target Indication) kunde radarstationerna sortera bort markekon och föremål som färdas med låga hastigheter. MTI-funktionen tar bort mål under en viss hastighet, den s k gränshastigheten, oberoende av föremålens riktning. Gränshastigheten påverkas av valt avståndsområde och om PRF-växling eller Staggered PRF används.

Då MTI-funktionen kompletteras med s k vindkompenseringen (i t ex PS-90 och PS-701) så kan radarn även ta bort föremål med låga hastigheter i vissa speciella riktningar t ex regn- eller remsmoln. Hastighet och riktning hos klottret bestämdes manuellt av operatören i äldre stationer som t ex Cig-790 men bestäms automatiskt i PS-90 och UndE 23 genom att stationen mäter upp klottrets medelhastighet och riktning i olika sektorer.

4. Telekrigföring

Även om ett flygplan färdas med hög hastighet då det släpper sina remsor så kommer remsorna snabbt att bromsas upp och färdas med vindens hastighet. Radarns MTI-kretsar och eventuella vindkompensering kommer då att sortera bort remsorna som falska ekon. Men just det att remsorna tvingar radaroperatören att utnyttja radarns MTI gör i gengäld att noll-dopplersvängar kan bli ett sätt för en pilot att under korta ögonblick dölja flygplanet.

Ett annat motdrag mot radarn kan vara att belysa remsorna med en bredbandig brusstörare. Detta kan få till följd att MTI-behandlingen i radarn inte längre kan sälla bort remsorna, de kommer därför att synas på indikatorn.

Taktiskt nyttjande

Remсор används antingen för att dölja insyn i ett område eller för att skapa falska ekon. De kan även användas för att vilseleda en eldledningsradar eller en målsökande robot.

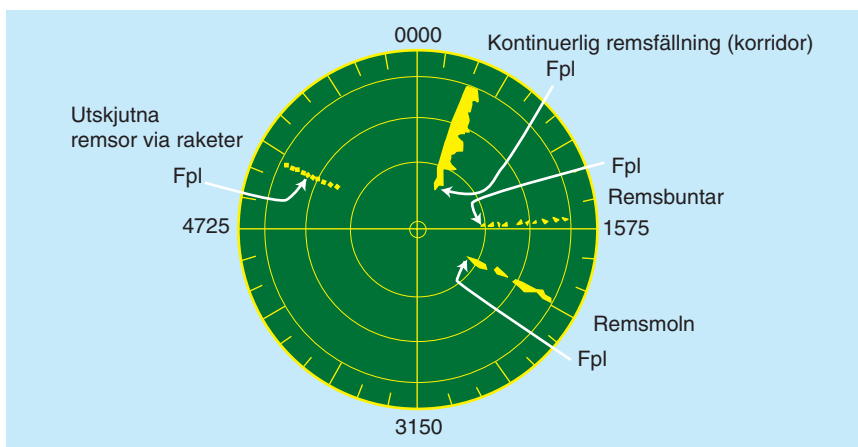


Bild 4:59. Exempel på remsors inverkan på en äldre typ av spaningsradar.

Då remsor används för att dölja flygplan inom ett område från upptäckt av spaningsradarstationer ska radarmålarean från remsorna vara större än flygplanets radarmålarean i var och en av radarns upplösningceller. Upplösningcellens volym fås som:

$$\text{Volym} = \text{avståndsupplösning} \cdot \text{lobbredd i sida} \cdot \text{lobbredd i höjd} \quad [\text{m}^3].$$

Ju större celler desto mindre remsor krävs för att skapa mål i alla celler i ett område.

I bl a Sovjetunionen använde man remsor för att förhindra insyn i ett större område eller att dölja ett flyganfall. Man nyttjade härvid stora transportflygplan som släppte ut remskorridorer som kunde ha en längd av flera tiotals mil. Remsorna hindrade sedan motståndaren att se vad som fanns inne i remskorridoren. Metoden nyttjades för att dolt förflytta förband, göra ett överraskande flyganfall eller för att vilseleda. Sovjetunionen använde sig av remskorridorer under invasionen i Tjeckoslovakien 1968 för att förflytta flygburna trupper utan att NATO kunde upptäcka dem.

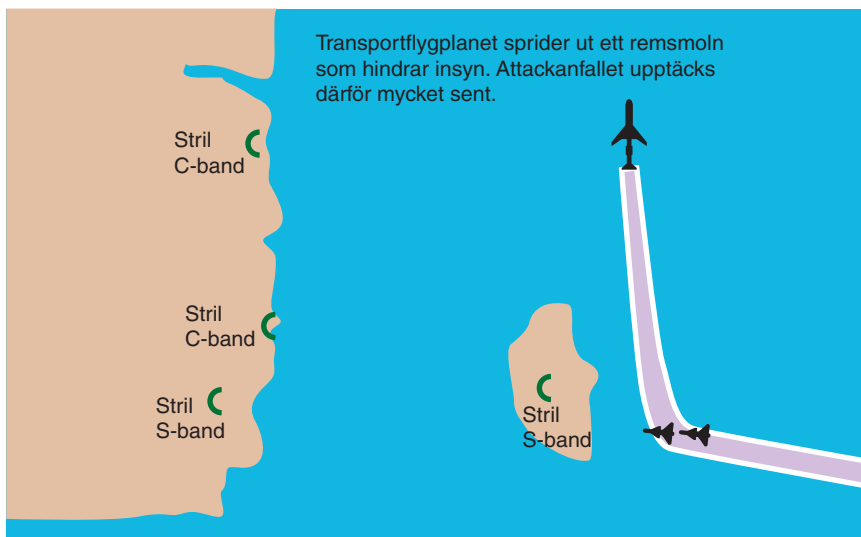


Bild 4:60. Exempel på taktiskt nyttjande av remsor (maskerande remsfällning).

Ett flygplan som upptäcker att det är belyst av en eldledningsradar släpper eller skjuter ut en remsbunt. När remsorna sprids i luften bildas ett remsmoln vilket får en betydligt större målarea än flygplanet. Detta kan få den målsökande radarn att släppa flygplanet och i stället haka på remsmolnet.

Normalt släpps remsorna ut från en behållare i flygplanet. Stor möda läggs ner på att på ett optimalt vis använda turbulensen kring flygmaskineri så att remsmolnet snabbt når önskad storlek.

4. Telekrigföring

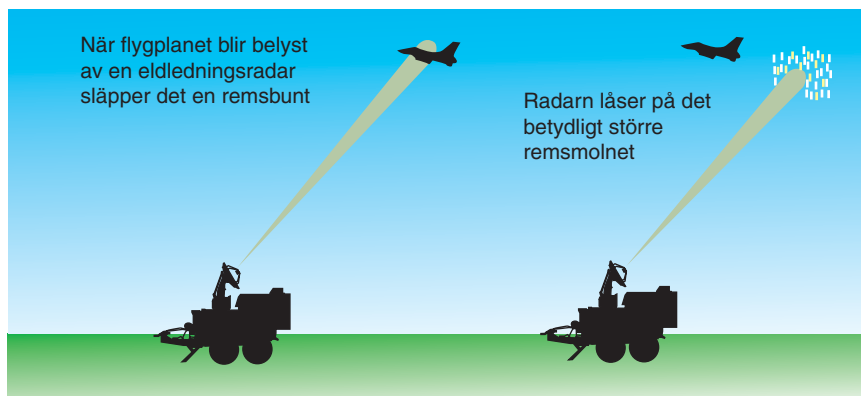


Bild 4:61. Vilseledande remsor.



Bild 4:62. Remskapsel BOL 1. Tidigare var det vanligt med särskilda remspodar. Dessa tog då en vapenbalk på flygplanet. Remskapseln utgör här även själva vapenbalken och ett vapen kan hängas under remskapseln.

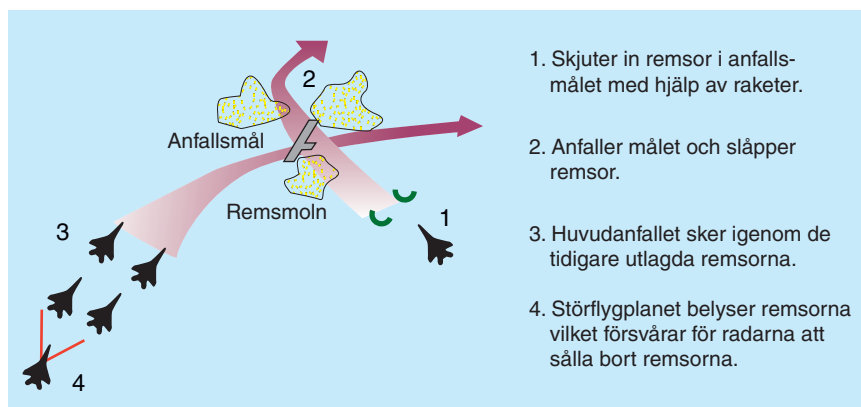


Bild 4:63. Exempel på flyganfall där flygplanen skyddas med hjälp av remsor.

För att ytterligare försvåra för radarn finns det därför även utrustning för att skjuta ut remsorna framåt med raketer eller automatkanon.

För att öka verkan från remsorna är vissa flygplan utrustade med bakåtriktade störsändare som belyser remsmolnet så att MTI-behandlingen ska få svårare att sortera bort molnet. Principen är den att om t ex en belysningsradar sänder med 10 GHz (3 cm våglängd) och flygplanet släpper ut ett remsmoln som det belyser med en signal med frekvensen 10,0001 GHz. Då kommer radarn att uppleva de reflekterade signalerna från remsmolnet som om molnet färdas med en dopplerhastighet på 100 kHz vilket motsvarar 1500 m/s.

$$v = \frac{\lambda \cdot f}{2} = \frac{0,03 \cdot 100 \cdot 10^3}{2} = 1500 \quad [\text{m/s}]$$

Störmetoden är dock vanskelig då belysningssändaren kan fungera som en fyr. Därför sker om möjligt belysningen från en annan ohotad plattform.

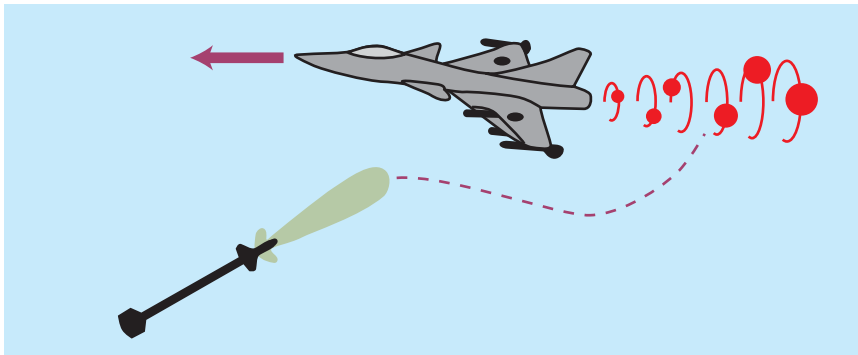


Bild 4:64. Aktiv störning (dumping på belysta remsor). Flygplanet släpper remsor och belyser remsorna med en frekvens som motsvarar den egna dopplerhastigheten, planet svänger sedan mot noll doppler varvid roboten förhoppningsvis låser på remsorna som då tycks ha den hastighet som bestäms av störsändarens frekvens.

Eftersom fartyg färdas med förhållandevis låga hastigheter, blir det små hastighetsskillnader mellan remsmoln och fartyg. En sjömålsrobot kommer av denna anledning att ha svårt att skilja ett remsmoln från ett fartyg.

I marinen finns därför automatiska system som skjuter ut remsraketer när radarvarnaren anger att fartyget är belyst av en sjömålsrobot. Remsorna skjuts iväg i den riktning som är mest optimal i förhållande till fartygets kurs, vindriktningen och robotens anflygningsriktning. Systemen rekommenderar även hur fartyget bör manövreras för att få optimal geometri och minimal fartygsmålyta och därmed skapa störst chans att roboten släpper låsningen på fartyget. För att ytterligare försvåra för robotmålsökaren kombineras remsorna ofta med någon form av aktiv telestörning.

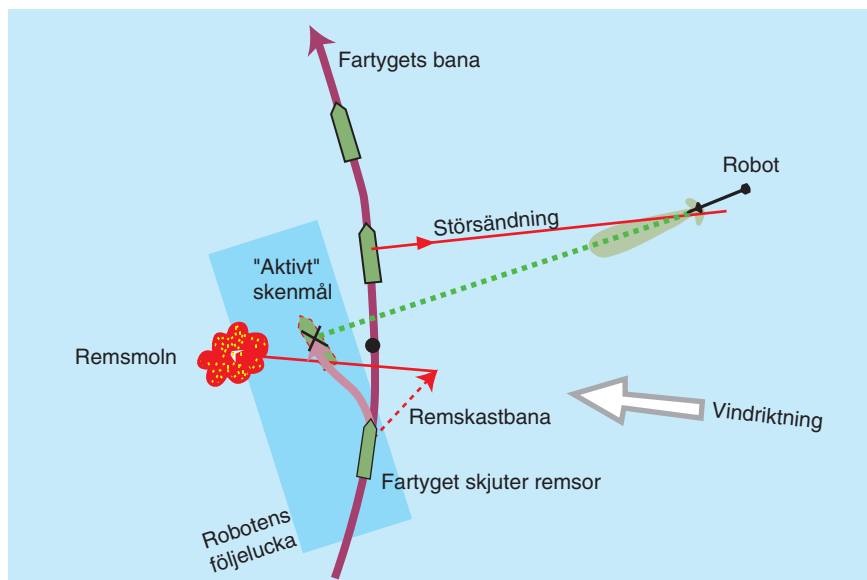


Bild 4:65. Fartyg utsatt för sjörobotanfall. Fartyget kombinerar aktiv telestörning från skenmål med remсор. Remсорna skjuts iväg beroende på fartygets kurs samt vindriktning.

Radarreflektorer

För att skapa skenmål med stor radarmålyta kan reflektorer användas. De vanligaste reflektortyperna är hörnkantprismat och Luneberglinsen. Prismorna utformas så att huvuddelen av den mot reflektorn infallande energin reflekteras tillbaka mot radarn.

Hörnkantreflektorn består av ett ”invändigt hörn” med tre mot varandra vinkelräta plana ytor. Den maximala reflekterade ytan σ (sigma) [m²] från en ensam hörnreflektor med kantlängden a [m] blir

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot a^4}{3 \cdot \lambda^2} \quad [\text{m}^2]$$

En radarreflektor med en kantlinje på 1 meter ger således upphov till en målyta på 4 700 m² för en X-bandsradar (tre cm våglängd, λ).

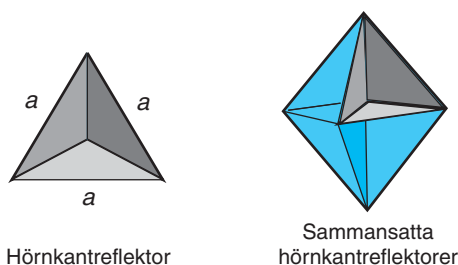


Bild 4:66. Hörnkantreflektorer.

Hörnkantreflektor

Sammansatta hörnkantreflektorer

En ensam hörnreflektor har ett reflektionsdiagram som gör att den är effektiv inom en rymdvinkel av 20° från symmetriaxeln. Flera prismor kan sättas samman till en enhet som kan täcka hela varvet.

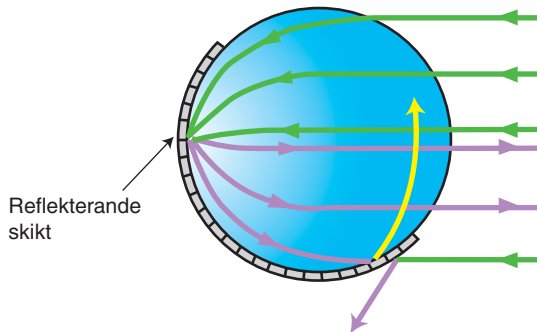


Bild 4:67. Luneberglins.

Luneberglinsen består av ett dielektriskt ledande klot med ett reflekterande skikt som omfattar något mindre än en halv sfär. Den maximala reflektionsarean

$$\sigma = \frac{124 \cdot a^4}{\lambda^2} \text{ [m}^2 \text{]}$$

där a = radien [m].

Detta ger med en meter radie (a) och en radar med tre cm våglängd (λ) att radarmålären blir 137 000 m².

Av formlerna ovan framgår att om våglängden är lång kommer även reflektorerna att behöva öka i storlek.

Små reflektorer kan efterlikna mycket stora föremål om radarns våglängd inte är alltför lång. Reflektorerna kan därför simulera olika typer av mål och används i mål bogserade efter flygplan och fartyg för att vilseleda eldledningsradar och robotmålsökare.

Det finns i teorin några olika metoder att skilja ekot från en radarreflektor från ett verkligt mål. Ekots amplitud hos ett verkligt mål varierar betydligt mer än från en radarreflektor. Orsaken är att det verkliga målet består av en stor mängd delreflektorer. Då radarpulsen träffar målet kommer reflexerna från de olika ytorna att beroende på aspektvinkeln till målet att interferera konstruktivt eller destruktivt. Detta innebär att signalens amplitud fluktuerar. Från skenmålet kommer i huvudsak all energi från en enda reflektor och signalen kommer därför att vara i stort sett konstant. Den här fluktuations-effekten kan även fås genom att byta frekvens (våglängd) mellan pulserna. Interferensavståndet mellan det verkliga målets delreflektorer ändras då. Skenmålets punktreflektor är relativt okänsligt för både förändringar i

4. Telekrigföring

aspektvinkel och frekvensändringar vilket medför att dess eko därför blir oförändrat.

Flygande skenmål

Flygburna skenmål är inte något nytt. Det finns beskrivet åtminstone sedan 1960-talet då de användes för skydd av bombflygplan. Vid det israeliska anfallet mot syrisk luftvärn i Bekandalen nyttjades UAV som skenmål. Under Gulfkriget 1991 nyttjade de allierade olika typer av flygande skenmål.

Syftet med skenmålen var t ex att

- få radarsystemen att sända för att möjliggöra signalspaning
- luftvärnet skulle rikta sitt intresse i fel riktning
- mätta luftvärnet
- få radarstationerna att sända så de kunde bekämpas med SSARB
- locka jaktflyg i strid.

De allierade använde åtskilliga hundra skenmål redan under de första dagarna av kriget.

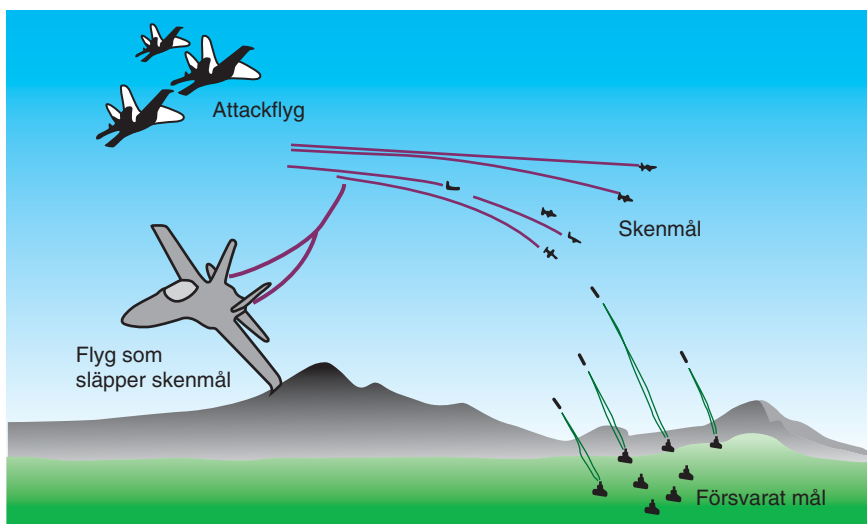


Bild 4:68. Amerikanskt nyttjande av skenmål för att binda luftvärnet mot fel typ av mål.

Det kanske mest använda skenmålet under Gulfkriget var US Navys Tactical Air Launched Decoy (TALD). Under Gulfkrigets första 72 timmar släpptes 138 TALD. Den hängs på vapenbalkarna på ett flygplan och saknar egen framdrivning. När den släpps glidflyger den mot målet, dess maximala räckvidd bedöms vara 100 km. Skenmålet har en radarreflektor i nospartiet

för att ytterligare öka radarmålarean. Varianter av TALD kan även innehålla aktiv repeterstörsändare eller remslast. Om repeterstörsändare används bildar troligen vingarna sändar- och mottagarantennerna. Remslasten kan uppgå till 36 kg vilket räcker för att skapa en 50 km lång remskorridor. Priset (2002) för en TALD antas vara 20 000 dollar.

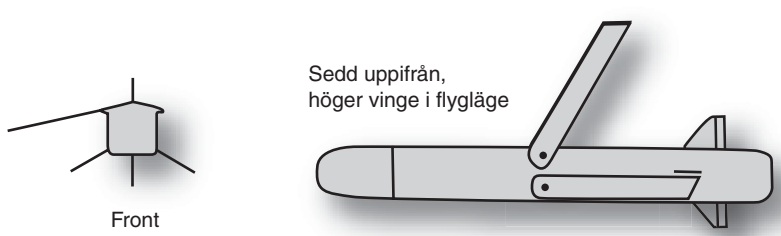
NATO benämning	Tillverkare	Operativ från	Huvudsakliga mål	Plattformer	Längd (m)
TALD	USA				2,34
 Sedd uppifrån, höger vinge i flygläge Front					
Spännvidd (cm)	Vikt (kg)	Räckvidd	Fart (m/s)	Avfyrningshöjd (m)	
155	180	100 km			

Bild 4:69. TALD.

Amerikanska flygvapnet nyttjade under Gulfkriget även ett fyra meter långt obemannat jetflygplan benämnt BQM Chukars. Chukars programmeras att följa en viss bana. Trots detta krävs radiostyrning från mark- eller flygburna operatörer. Chukars kan flyga i banor med varierande höjder upp till 10 000 meters höjd med en hastighet av max 0,8 Mach. Under krigets inledande timmar fälldes minst 38 Chukars.

Utvecklingen tycks gå mot en ökad användning av motordrivna skenmål som i vissa fall efter slutfört uppdrag kan flyga tillbaka och landa.

Exempel på skenmål är amerikanska BQM Chukars, Improved TALD och israeliska Delilah.

Om skenmålen utrustas med repeterstörsändare och flyger nära radarstationen så är det möjligt att skapa en stor mängd falska ekon även framför ett anfallsföretag. Möjligheterna till vilseledning ökar betydligt.

USA avser att anskaffa ett nytt flygande skenmål, vilket kommer att få namnet MALD (Miniture Air Launched Decoy). Nedan presenteras företaget Nortrop Grummans förslag på utformning.

MALD ska bäras till fällningsläge av ett flygplan. Efter fällning drivs farkosten av en liten turbojetmotor och simulerar ett flygplan med en radar-

4. Telekrigföring

signatur inom VHF-, UHF- eller mikrovågsbanden. Nyttolasten på 4,5 kg består av elektronisk repeterutrustning för att repetera mottagna radarpulser så att radarn tar emot ett radareko med en radarmålarea och ett utseende som motsvarar det flygplan som ska simuleras. Sändarantennerna för mikrovåg sitter i farkostens nos och längs kroppens sidor. VHF- och UHF-antennerna är inbyggda i vingarna, i den ena för mottagning och i den andra för sändning. Skenmålets navigeringsutrustning består av ett TN-system och en GPS-mottagare. Före fällning från bärarflygplanet programmeras navigeringsdatan i MALD med de brytpunkter (max åtta) samt de farter och höjder som farkosten ska ha under uppdraget. Två eller flera skenmål kan flygas i förband.

Möjliga framtida användningsområden för MALD

- skenmål
- störfarkost för förgrundsstörning
- billig målrobot för engångsbruk
- bärare och utläggare av olika typer av sensorer i område som inte kan nås oupptäckt med andra medel
- farkost för underrättelseuppdrag, exempelvis signalspaning.

Det kommer att vara svårt att skilja fysiska skenmål från verkliga mål.

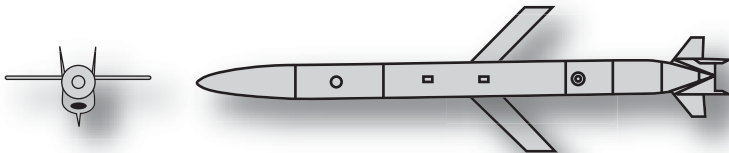
NATO benämning	Tillverkare	Bärare	Huvudsakliga mål	Flygtid	Längd (m)
MALD	USA/Nortrop Grumman	F-16, F-15, B1-B, F/A-18, F-22, F-35	Utgöra skenmål och stör-sändare	> 20 min	2,3
					
Spännvidd (cm)	Vikt (kg)	Räckvidd	Fart (m/s)	Flyghöjd (m)	
65	45	460 km	Hög underljudshastighet	10 000	

Bild 4:70. MALD.

Som möjliga metoder att särskilja skenmål från verkliga mål kan nämnas

- genomföra en noggrann doppleranalys av ekot för att känna igen karaktäristiska frekvenskomponenter från t ex motorer

- högupplösande radar som i princip ger en bild av målet
- datafusion mellan radar och SIS för att avgöra om det sänder ut några för ett flygplan karaktäristiska elektromagnetiska signaler
- bildalstrande IR-spanare.

Man bör notera att det troligen är mycket svårt att skilja ett flygande skenmål från en kryssningsrobot trots att man nyttjar TV- eller IR-kamera.

Signaturanpassning

Tekniken för att förhindra eller försvåra upptäckt benämns signaturanpassning eller stealthteknik (eng. stealth= smygande, förstulet, oförmärkt) och syftar till att göra det svårare att upptäcka, klassificera, identifiera, målnmäta och bekämpa objekten. För att signaturanpassning ska vara verkligt måste det ofta inrikta sig mot flera olika våglängdsområden. Man brukar säga att de ”dödliga signaturerna” är sju stycken. I prioriteringsordning för att upptäcka ett flygplan är de: radar, IR, elektromagnetisk strålning (dvs sändning från planet), optisk upptäckt, kondensstrimma, rök (avgaser) från motorn och slutligen ljud. Här kommer endast signaturanpassning inom radarbandet att behandlas.

Tabell 4:6. Signaturanpassning enligt Electronic Warfare in the information age.

Teknik	Kritiska parametrar
IR	IR signatur i området 0,7-20 μm
Synligt	Minskning av solreflexer
Laser	Reflektionsminskning för 0,3-10,6 μm
Akustiskt	$f = 10 \text{ Hz} - 100 \text{ KHz}$

Forskning och utveckling av radarabsorbenter har pågått under mer än ett halvt sekel. De första radarabsorberande skikten togs fram under mitten av 1930-talet. Under andra världskriget fick forskning och utveckling rörande absorberande material ett stort uppsving, tyskarna placerade till exempel radarabsorberande material på ubåtsperiskopen för att minska risken att ubåtarna upptäcktes av flygburen radar.

USA som är ledande inom tekniken att minska radarmålarean började sin utveckling under 1950-talet. 1958 utrustades ett Lockheed T-33 övningsplan med radarabsorberande material (RAM). Försöket visade att detta var en möjlig väg att uppnå en betydande minskning av radarmålarean. Efter att det amerikanska spaningsplanet U-2 skjutits ner över Sovjetunionen 1960 så beslöt USA att försöka reducera radarmålarean på flygplanet A-12 (en föregångare till SR-71 Blackbird) så att den helst inte alls skulle kunna upptäckas av radar. Man konstaterade att radarmålarean borde minskas

med minst 98 procent jämfört med ett konventionellt flygplan. Man bör här komma ihåg att radarekvationen visar att det krävs en 95% minskning av radarmålärean för att reducera radarns upptäcktsavstånd till hälften. Minskning med 99 % av radarmålärean reducerar upptäcktsavståndet till en tredjedel. Det amerikanska flygplanet F-111 var det första stridsflygplanet där man lyckades reducera radarmålärean. Det gjordes dock inte i så stor omfattning att det ens var i närheten för att kunna kallas stealth-flygplan. År 1974 inledde USA framtagningen av ett experimentflygplan XST som skulle användas som fullskaligt försöksplan för att skapa ett stealthflygplan. Försöken ledde så småningom till attackflygplanet F-117.

Man hade ditintills inte haft någon metod att beräkna radarmålärean hos ett så komplext föremål som ett flygplan före det var färdigbyggt. För att lösa problemet fick man hjälp från ett oväntat håll. Man upptäckte att en sovjetisk matematiker och fysiker Piotr Ufimtsev hade publicerat en avhandling om hur man beräknar radarmålytan från 2-dimensionella (plana) ytor. Ufimtsevs rapport hade väckt litet intresse i Sovjetunionen, vilket gjorde att den fick publiceras i öppna källor. Ufimtsev's avhandling gjorde att man kunde konstruera dataalgoritmer för att beräkna radarmålytan för vilket objekt som helst, så länge det bara bestod av "plana ytor". Detta gjorde att man kunde dela upp ett flygplan i tusentals platta trianglar, beräkna radarmålärean för var och en av dem, summera bidragen och få ett totalt mått på flygplanets radarmålärea. Man hade nu en effektiv metod att redan vid konstruktionsarbetet beräkna radarmålärean. Dåtidens datorer var dock inte tillräckligt kraftfulla för att göra beräkningarna på 3-dimensionella ytor (krökta ytor). Det gjorde att F-117 fick byggas upp av trekantiga plana plattor och fick därmed sitt karaktäristiska facettliknande utseende.



Bild 4:71. Amerikanska bombflygplanet B2.

Utvecklingen av F-117 startade i början av 1970-talet. Lockheed fick 1981 en första beställning på 20 flygplan. Totalt har 59 plan tillverkats. Kostnaden per flygplan har varit över 100 miljoner dollar. Flygplanet kom ut på förband 1983 och användes första gången i Panama 1989. Sitt verkliga

genombrott fick flygplanet under Gulfkriget 1991. Flygplanet är främst signaturanpassat inom radar- och IR-områdena. För att skydda sig mot optisk upptäckt nyttjades flygplanet oftast nattetid. Den låga upptäckts-sannolikheten gjorde att F-117A kunde uppträda utan eskort- och störflygplan under Gulfkriget. Åtta F-117A assisterade av tankningsflygplan klarade uppgifter som normalt skulle kräva 75 flygplan inklusive eskort.

Efter att ett F-117 skjutits ner under Kosovokriget så blev man tvungen att inse att stealth inte är den enda och slutliga lösningen utan en av flera metoder att dölja ett flygplan. Även stealth kräver elektronisk störning. År 1980 inleddes försöken med vad som benämndes Advanced Technology Bomber (ATB) vilket kom sedan att utvecklas till att bli flygplanet B-2. Datorerna hade nu förbättrats så att man även kunde beräkna radarmålaren för böjda ytor, något som tydligt syns då man jämför F-117 och B-2.

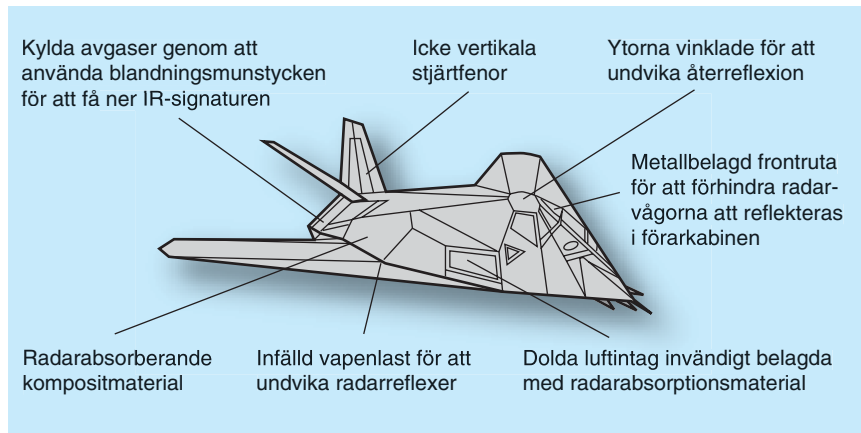


Bild 4:72. Stealthplanet F-117.

Ett flygplan som inte vill bli upptäckt bör helst inte använda egen radar eller radio. Om detta måste ske bör de användas restriktivt. Signalerna kan göras svårare att detektera genom t ex antenn med låga sidolober och puls-kompressionsteknik som sprider ut sändpulsen i frekvensspektrat. En radar-antenn på ett flygplan ger upphov till en mycket stor radarmålarea. Antennen måste, då den inte används, vridas så att den inte reflekterar motståndarens radarsignaler.

Med fasstyrd antenn riktas loben elektriskt. Dessa antenner ger starka reflexer tillbaka mot en annan radar endast då den själv är styrd att se i denna riktning. En annan metod att hindra antennen att ge upphov till oönskade reflektioner är att använda en radom tillverkat i ett frekvens-selektivt material. Ett sådant materiel ska släppa igenom flygplanets egna radarpulser men spärra andra frekvenser. Helst ska det även vara möjligt att elektriskt styra när radomen är genomsläpplig och inte.



Bild 4:73. Jaktflygplanet F-22 Raptor.

Operativa stealthflygplan finns idag endast i USA. De har attackplanet F-117 och det strategiska bombplanet B-2. Under utveckling är jaktplanet F-22 vilket kommer att få betydligt bättre flygegenskaper än F-117. Bombplanet B-1B har viss stealthanpassning.

USA har lagt en beställning (2002) av attackflygplanet JSF (Joint Strike Fighter), vilket precis som F-22 ska ha såväl goda flygegenskaper och liten radarmålarea. Beställningen omfattar över 3000 flygplan. På flygplan som F-16, JAS 39 och Eurofighter har vissa åtgärder gjorts för att minska radarmålarean. Uppgifter gör gällande att radarmålarean på detta vis eventuellt minskas med en faktor 10.

Sverige har genomfört försök med försöksfartyget Smyge vilket är signaturanpassat inom främst radar- och IR-områden. Resultaten från Smyge har nyttjats vid konstruktion av de nya fartygen av Visby-klass. Enligt öppna källor sägs korvetten Visby endast kunna upptäckas på halva avståndet jämfört med en ordinär korvett.

Även vapen har börjat signaturanpassas. Den amerikanska kryssningsroboten AGM-129A är signaturanpassad inom mikrovågsområdet. Detta har främst skett genom formgivning av roboten.

Radarmålarea

Radarmålarean anger hur stort målet tycks vara sett från radarn. Radarmålarean, σ , definieras som tvärsnittsarean (m^2) hos en sfär som reflekterar lika mycket effekt tillbaka mot radarn som vad målet gör.

När radarmåltytan minskas blir också upptäcktsavståndet mindre. Radarekvationen ($r = \sqrt[4]{k \cdot \sigma}$) visar att upptäcktsavståndet (r) är proportionellt mot fjärde roten av radarmålarean (σ). Om t ex upptäcktsavståndet ska halveras så måste måltytan minskas hela 16 ggr.

Radarmålarean beskriver ett objekts radarreflekterande egenskaper och är en funktion av

- radarns frekvens
- polarisation
- aspektvinkel (dvs från vilken riktning objektet observeras)
- materialegenskaper.

Förutom att upptäcktsavståndet minskar så finns flera andra fördelar att minska radarmålarean

- mängden remsor som krävs för att skapa ett lika stort skenmål som flygplanet minskar och är direkt proportionellt mot radarmålarean
- störsändare behöver inte ha lika stor effekt för att dölja flygplanet (stör-effekten är proportionell mot radarmålarean). Störsändaren blir därmed svårare att signalspana mot.
- markklotter, fåglar och insekter ger upphov till falska ekon i radarn.

En minskad radarmålarean ställer högre krav på klotterundertryckningen i en radar. Risken att låsa på markklotter ökar. Om ekot minskas tillräckligt mycket blir det inte längre möjligt för en eldledningsradar att kontinuerligt följa målet.

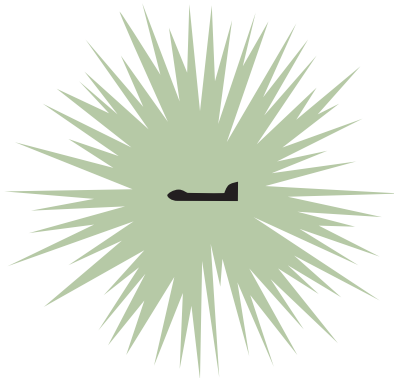


Bild 4:74. Radarmålarean varierar kraftigt med målets aspektvinkel.

Bilden ovan visar att radarmålarean varierar kraftigt med aspektvinkeln. Orsaken är att flygplanet består av en stor mängd delreflektorer, som var och en ger upphov till en reflekterande våg då flygplanet träffas av en radarpuls. I vissa riktningar kommer gångvägsskillnaden för de reflekterande vågorna vara sådan att de kommer i motfas till varandra och summa signalen blir noll. I andra riktningar förstärker de varandra.

4. Telekrigföring

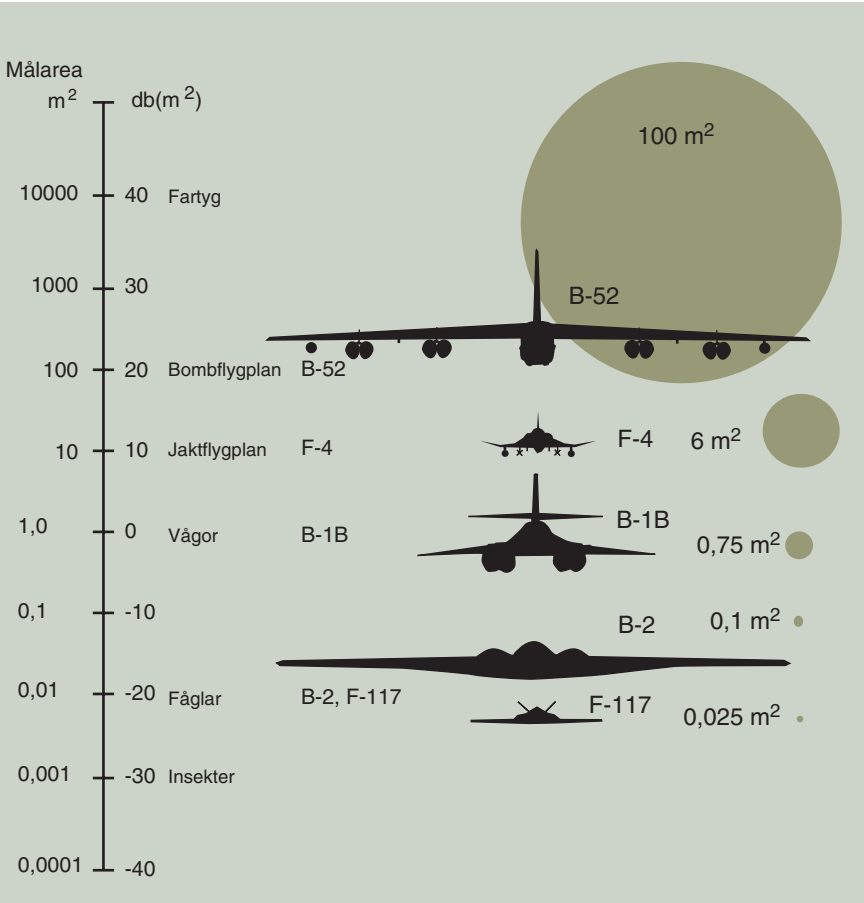


Bild 4:75. Exempel på radarmålareans storlek.

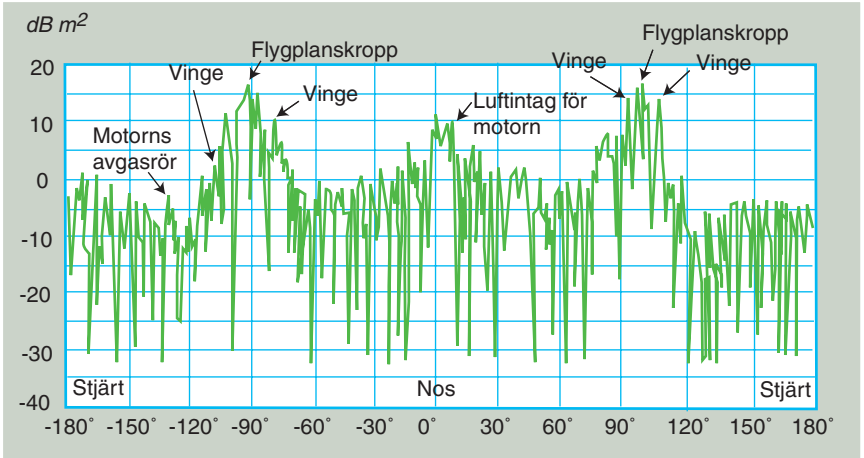


Bild 4:76. Radarmålärea av en Boeing 737.

Ett praktiskt exempel på hur radarmålarean varierar syns i bild 4:75. Bild 4:76 visar radarmålarean hos en modell av en Boeing 737 i skala 1:15, som belyses av en radar med frekvensen 10 GHz.

Vad händer då en elektromagnetisk våg träffar ett föremål?

Några exempel från optiken

För att få förståelse vad som händer då en radarsignal träffar ett flygplan kan man ta några exempel från optiken eftersom man oftast har både en praktisk och intuitiv känsla för olika ljusfenomen. Från skolans fysik känner vi några grundläggande regler som gäller ljus. Ljus är en form av elektromagnetisk strålning. Radarvågor skiljer sig från ljus genom att de har en annan våglängd och frekvens.

Samma fysiska lagar gäller alltså för ljus som för mikrovågor.

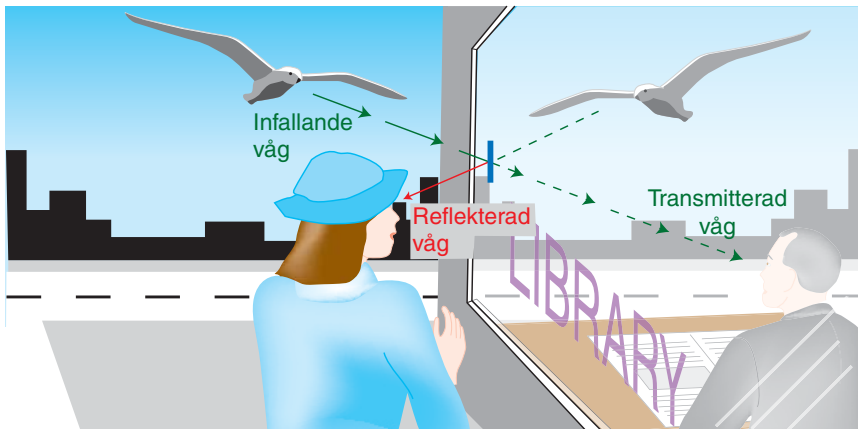


Bild 4:77. Några ljusfenomen.

Tre olika saker kan inträffa med den elektromagnetiska våg som träffar ett objekt

- den reflekteras
- den transmitteras dvs passerar igenom materialet härvid kommer vågen även att brytas.
- den absorberas, dämpas.

Då man ser in en i ett fönster ser man dels igenom glasrutan, men samtidigt så ses även reflexer i glaset. Intensiteten hos det reflekterade och transmittade ljuset beror på infallsvinkeln, brytningsindex hos de två ämnena (här luften och glaset) och polarisationen. Den i glaset reflekterade andelen ljus är minst vid vinkelrätt infall, störst då strålningen faller in längs glasytan.

4. Telekrigföring

Från optiken känner vi till att *infallsvinkeln* = *reflektionsvinkeln* (mätt från normalen till ytan). Det är detta förhållande som gör att en lutande yta inte reflekterar signalen tillbaka mot radarn. Se bild 4:78. Detta är den enskilt viktigaste metoden för att minska radarmålearen.

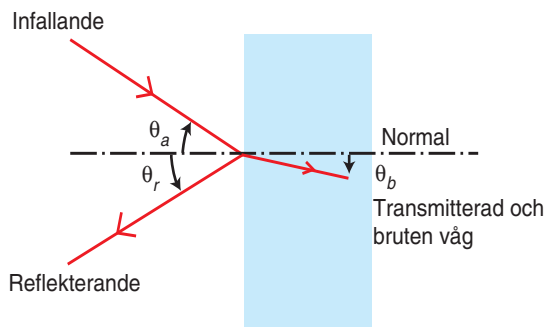


Bild 4:78. Ljusets reflektion och brytning.

Ljusets hastighet i vakuum, c , är som bekant 300 000 km/s. I andra medier är hastigheten långsammare.

Kvoten mellan hastigheten i vakuum, c , och hastigheten, v , i det aktuella materialet, benämns brytningsindex, n :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Vakuum har följaktligen brytningsindex 1, alla andra ämnen har ett högre brytningsindex. Luftens brytningsindex avrundas oftast till 1.

Förhållandet mellan hastighet, frekvens och våglängd i vakuum är (se kaptitlet Radarlära):

$$c = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Om en elektromagnetisk våg tränger in i ett material med ett annat brytningsindex så förändras hastigheten, men vad händer med vågens frekvens och våglängd? Det som händer är att frekvensen kommer att vara oförändrad medan hastigheten och våglängden ändras så att ekvationen i formel 2 förblir sann. Om t ex brytningsindex i det nya materialet är 2, kommer både hastigheten och våglängden att halveras.

Vid vinkelrätt infall kan reflektionskoefficienten, r , beräknas som:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (3)$$

Den reflekterade *effekten* fås som $R = r^2$ och den transmitterade andelen av effekten fås som

$$T = 1 - R. \quad (4)$$

där n_1 är brytningsindex framför materialet (här luften) och n_2 brytningsindex i materialet (här glaset). Reflektionen blir noll om $n_1 = n_2$. Om vi vill att reflektionen i gränsytan mellan två material ska vara noll ska alltså den elektromagnetsiska vågens hastighet vara lika hög i båda ämnena dvs de ska ha samma brytningsindex. Om två ämnen inte har samma brytningsindex sker en reflektion i gränsytan. Detta gäller oavsett om vågen går från ett tunnare till ett tjockare medium eller tvärtom.

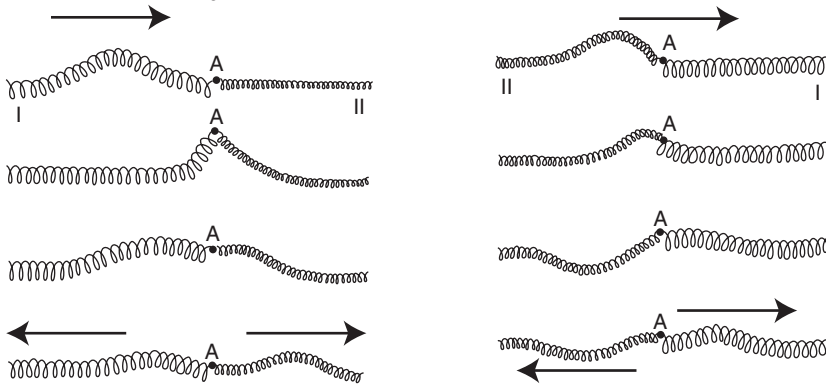


Bild 4:79. En vågs reflektion vid övergång mellan två olika material.

Detta kan illustreras med hjälp av två stålfjädrar med olika massa per längdenhet. En puls som fortplantar sig som en vågrörelse i den svagare fjädern kommer att ha högre hastighet än i den starkare fjädern. I sammanbindningspunkten kommer en del av pulsen att reflekteras en del att fortsätta in i den andra fjädern.

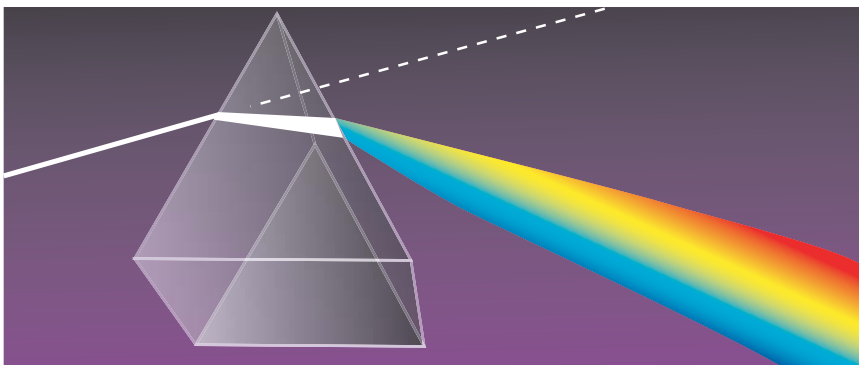


Bild 4:80. Ett material kan ha olika brytningsindex för olika frekvenser.

Elektromagnetiska vågor med olika frekvenser har ofta olika hastigheter i ett material, detta innebär därmed att de också har olika brytningsindex. Vitt ljus består som bekant av vågor med många frekvenser. När detta passerar ett material t ex ett prisma med varierande brytningsindex för de olika frekvenserna så kommer ljuset delas upp i sina olika färger. Fenomenet kallas dispersion.

Generella elektromagnetiska vågor

Vad som sagts om optik gäller alla elektromagnetiska vågor. Men vi ska nu gå över och beskriva samma förlopp i mer generella termer och se kopplingen till optiken.

Alla material kan karakteriseras av två materialkonstanter, ϵ (permittivitet även benämnt dielektricitetskonstanten) och (permeabiliteten) vilka beskriver materialets elektriska och magnetiska egenskaper. Kvoten

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5)$$

brukar kallas den karakteristiska impedansen. För vakuum gäller t ex

$$[\text{H/m}], \quad \epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \quad [\text{F/m}] \quad (\text{indexet } 0 \text{ betecknar}$$

vakuum). Impedansen för vakuum blir då $377 \, \Omega$.

I gränsytan mellan två material med samma impedans kommer det inte uppstå någon reflektion, vågen passerar opåverkad mellan materialen.

Olika materials permittivitet och permeabilitet uttrycks ofta i förhållande till de värden som gäller för vakuum. Dessa relativa värden betecknas då μ_r och ϵ_r . Om t ex ett material har $\epsilon_r = 1$ så har det samma μ som vakuum, om $\epsilon_r = 2$ så är den dubbelt så stor som i vakuum o s v.

De båda materialkonstanterna, ϵ och μ bestämmer den elektromagnetiska vågens hastighet i materialet. Hastigheten fås som:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} \quad [\text{m/s}].$$

Vi kan därmed bestämma hastigheten i vakuum till:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300\,000 \text{ km/s}$$

I exemplet från optiken såg vi att brytningsindex var förhållandet mellan ljusets hastighet i vakuum och det aktuella materialets samt att brytningsindex bestämde hur mycket av vågen som reflekterades och transmittas av materialet. Detta visar att den elektromagnetiska vågens hastighet i sin tur bestäms av materialets dielektricitetskonstant, ϵ_r , och dess permeabilitet, μ_r .

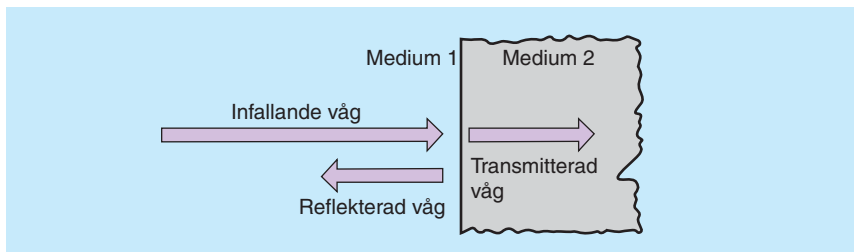


Bild 4:81. Reflektion i icke perfekt ledande material.

Formlerna för reflektion och transmission inom optiken kan vi därför istället uttrycka med hjälp av förhållandet mellan impedanserna i de båda ämnena. Låt en våg färdas i ett medium 1 och träffa ett annat medium 2 (t ex ett flygplan) vinkelrätt mot ytan då gäller att reflektionskoefficienten (r) dvs. förhållandet mellan infallande och reflekterad våg fås som:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

Den reflekterade andelen av den infallande *effekten* fås som:

$$R = r^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (7)$$

Den transmittade effekten (T) anger hur stor del av effekten som tränger in i materialet

$$T = 1 - R \quad (4)$$

Exempel 4:5

Ett föremål omgivet av luft har ett ϵ som är 3,4 ggr större än vakuum ($\epsilon_r = 3,4$), dess permeabilitet, μ , är den samma som för vakuum. Bestäm reflektionskoefficienten vid vinkelrätt infall samt hur många procent av den infallande effekten som reflekteras.

Lösning

Beteckna luften med index 1 och föremålet med index 2.

För luften gäller att i stort sett att $\mu_1 = \epsilon_0$ och $\epsilon_1 = \epsilon_0$. För föremålet gäller att $\epsilon_2 = 3,4 \epsilon_0$ och $\epsilon_1 = \epsilon_0$

Impedansen för föremålet kan då beräknas som:

$$Z_2 = Z_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot 1}} = 0,54$$

Reflektionskoefficienten blir då

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0,54 - 1}{0,54 + 1} = -0,30$$

$$R = r^2 = (-0,30)^2 = 0,09$$

Svar

Reflektionskoefficienten blir -0,3 och 9% av den infallande effekten reflekteras.

Av formlerna ovan framgår att om impedanserna är lika stora blir reflektionskoefficienten noll dvs inget reflekteras och hela vågen tränger opåverkad in i medium 2.

Om materialet 2 är en god ledare kommer impedansen Z_2 att vara noll vilket innebär att $r = -1$ dvs hela vågen reflekteras varvid $T=0$ dvs. ingen effekt tränger in i materialet.

Den karakteristiska impedansen bestämmer andelen energi mellan vågens elektriska och magnetiska fält. I vakuum delas energin jämnt mellan de båda fälten. För att justera balansen till det nya materialets karakteristiska impedans så måste en del av energin reflekteras. Den energin kommer att reflekteras som en elektromagnetisk våg.

Reflektion i perfekt ledande material

Vad händer då en radarsignal träffar ett material som är en god ledare? Den elektromagnetiska vågen består av ett elektriskt och ett magnetiskt fält. Se bild 4:82, tidpunkt 1. När den infallande vågen träffar ett elektriskt ledande material kommer det elektriska fältet att kortslutas. Detta gör att elektroner i materialet kommer att accelereras, tidpunkt 2. Då elektroner ändrar sin hastighet uppstår ett magnetiskt fält utanför materialet. Tidpunkt 3, magnetfältet ger i sin tur upphov till ett elektriskt fält osv. En ny elektromagnetisk våg har bildats utanför materialet, dvs radarsignalen har reflekterats.

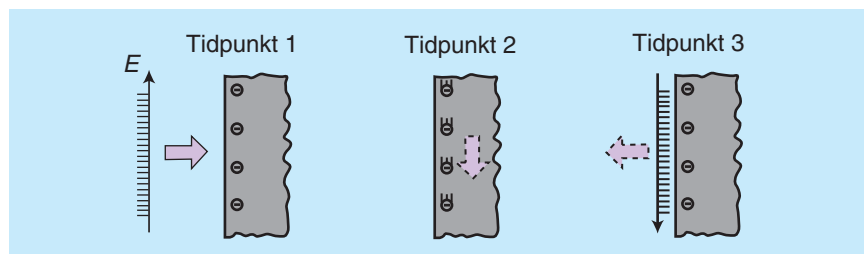


Bild 4:82. Reflektion i ledande material.

Stämmer detta med vad som sagts tidigare?

En god ledare har en låg impedans följaktligen innebär det att $r = -1$ och hela vågen reflekteras.

I en god ledare är hastigheten hos den elektromagnetiska vågen mycket låg. För t ex koppar är hastigheten vid 3 MHz endast 720 m/s vilket ger ett brytningsindex på $n_{3\text{MHz}} = 4 \cdot 10^5$, vilket också med en "optisk beräkning" av reflektionen innebär att i stort sett hela den infallande vågen reflekteras.

Det kan vara värt att notera att en spegel har ett försilvrat skikt på baksidan av en glasskiva just på grund av skiktets goda ledningsförmåga.

Absorption, dämpning, frekvensberoende m m

En elektromagnetisk våg som tränger in i vissa typer av material kan komma att helt eller delvis dämpas/absorberas av detta. Vad som sker är att vågens varierande elektriska fält kommer att polarisera materialet. Då materialet polariseras i olika riktningar i takt med fältets förändringar så uppstår friktion och därmed värmeförluster. Den elektromagnetiska energin omvandlas till värme.

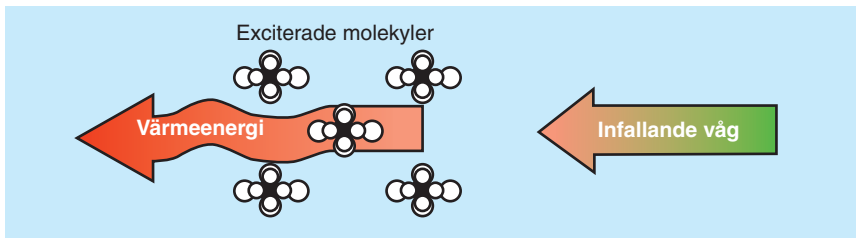


Bild 4:83. När molekylerna exciteras omvandlas den elektromagnetiska energin i radarvågen till värmeenergi.

Absorptionen i ett visst material är frekvensberoende. Absorptionen kan bli mycket stor vid olika molekylers resonansfrekvenser (se kapitel Radarlära). Ofta gäller att ju högre frekvensen är desto mer inverkar partiklarnas tröghet och vågens dämpning ökar därför med frekvensen. Ett praktiskt exempel på omvandling av elektromagnetisk energi till värme sker i en mikrovågsugn.

Metoder att minska målarean

De delar av ett flygplan som ger störst radarmålarea visas i bild 4:84.

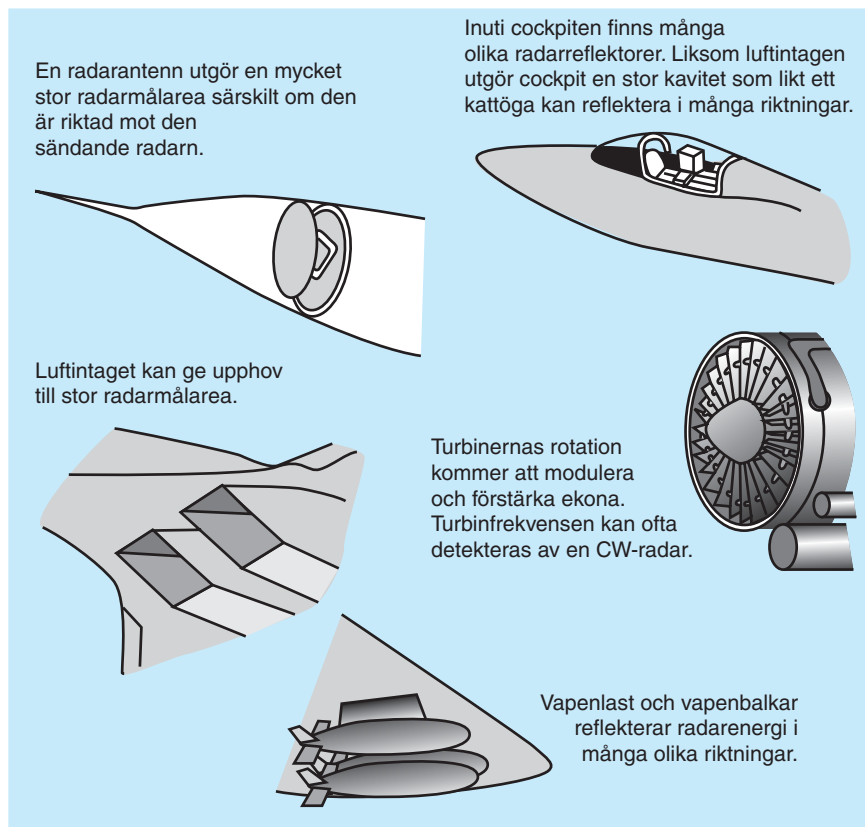


Bild 4:84. Några viktiga radarreflekterande ytor i ett flygplan.

För att konstruera ett objekt med liten radarmålarea så finns det fyra metoder

- formgivning. Den viktigaste metoden.

Formgivning innebär att plattformen utformas så att så lite radarenergi som möjligt reflekteras tillbaka i riktning mot den sändande radarn. Formgivning är den enskilt viktigaste metoden att minska radarmålarean.

- radarabsorberande material (RAM).

Metoden *radarabsorberande material (RAM)* nyttjar icke-reflekterande eller dämpande material.

- aktiv interferens (aktiv utsläckning).

Aktiv interferens innebär att flygplanet har en egen signalkälla som sänder ut en signal som ska ha samma amplitud men vara i motfas mot ekosignalen. Den transmitterade signalens amplitud, fas, frekvens och polarisation måste kunna justeras för att kompensera hotsignalens parametrar.

- passiv interferens (passiv utsläckning).

Metoden med *passiv interferens* innebär att man applicerar spridare (reflektorer) med uppgiften att kompensera (i motfas) objektets "normala" spridnings egenskaper. Metoden kräver att målet bara består av ett mindre antal reflekterande ytor och frekvenskaraktäristiken är väl känd. Passiv interferens är i praktiken ingen effektiv metod.

Operativt idag används endast metoderna med formgivning och radarabsorberande material för att minska radarmålarean.

Formgivning

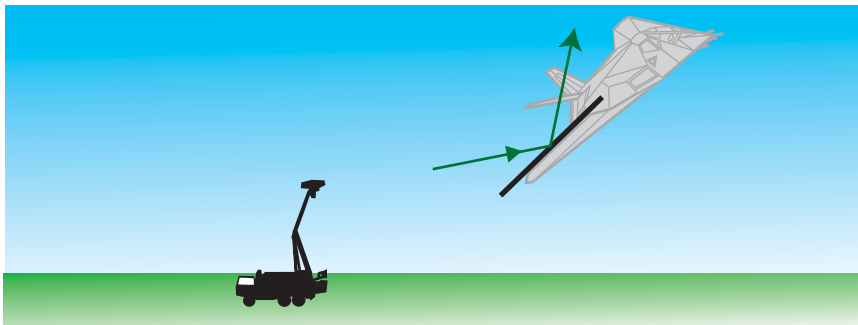


Bild 4:85. Formgivning. För att ge minsta möjliga radarmålarean ska radarvågorna studsas bort från radarn.

För att få ner radarmålarean genom formgivning måste man anta att hotet främst finns i några speciella riktningar. Man försöker utforma objektet så att det blir en bortreflektion istället för en återreflektion av en belysande radarsignal. Man måste härvid särskilt undvika plana ytor vinkelräta mot radarn och se hörnreflektorer. Hörnreflektorer bildas genom att flera plana ytor möts i räta vinklar (vilket är fallet i ett vanligt hörn).

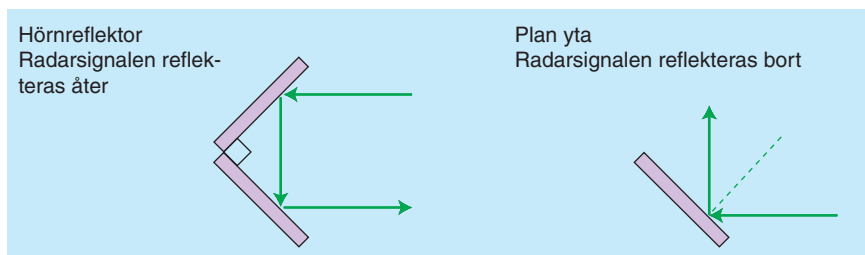


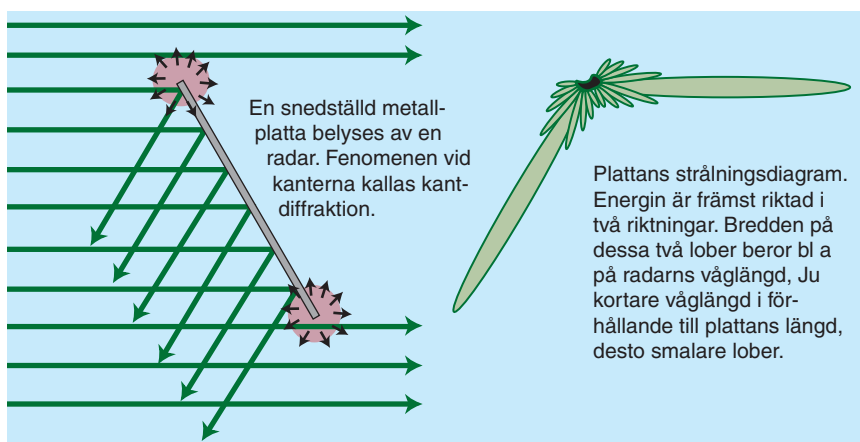
Bild 4:86. Princip för formgivning.

4. Telekrigföring

Om man kan ha hörn med andra vinklar minskar den återreflekterade signalen högst avsevärt.

Formgivningen kommer inte att påverka den totala reflekterade energin från objektet. En reducering av energin i en riktning kan bara ske om energin ökar i motsvarande grad i någon annan riktning. De lobar i de riktningar dit energin reflekteras försöker man göra så smala som möjligt. Syftet är att en bistatisk radar som befinner sig i denna riktning endast ska motta en stark signal under ett kort ögonblick. Den kommer att uppfatta målet som ett kortvarigt falskt larm och att få svårt att låsa eller följa på målet. Lobvidden på den reflekterande signalen beror på förhållandet mellan våglängden (λ) och längden (L) på den yta som reflekterar vågen. Lobvidden kan beräknas som:

$$\theta = \frac{\lambda}{L} \text{ [radianer]} \text{ (OBS! 1 streck = 1 milliradian} \approx 1/17 \text{ grad)}$$



*Bild 4:87. En metallplatta belyst av en radar.
Plattan kan t ex vara en del av ett flygplan.*

Notera att formeln ovan är samma formel som gäller för beräkning av antennloben från vilken antenn som helst. Av formeln framgår att ju lägre frekvensen blir (dvs längre våglängd) desto bredare blir loben. Detta är en av orsakerna till att lång våglängd är en motåtgärd mot stealth.

Exempel 4:6

Hur stor blir lobvidden från en 10 GHz radarsignal som reflekteras mot vingen på ett B2-bombflygplan? Vingen antas vara 30 meter lång.

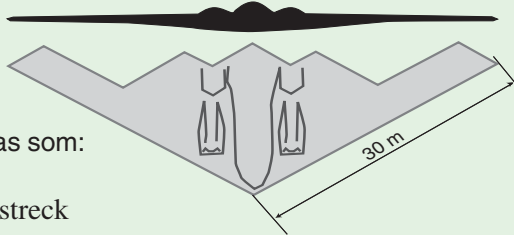
Lösning

Våglängden fås som:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0,03 \text{ m}$$

Lobbredden kan nu beräknas som:

$$\theta = \frac{\lambda}{L} = \frac{0,03}{30} = 0,001 \text{ radian} = 1 \text{ streck}$$

**Svar**

Lobvidden blir 1 streck dvs ca 1/17 grad.

Radarabsorberande material (RAM)

Den andra metoden för att minska radarmålarean är att använda radarabsorberande material.

Med radarabsorbent avses här en radarabsorberande struktur bestående av ett eller flera homogena material och/eller skikt.

Man skiljer på två huvudtyper av radarabsorbenter

- resonanta absorbenter
- icke resonanta absorbenter.

Resonanta absorbenter

Resonanta radarabsorbenter karakteriseras av att deras dimensioner är av avgörande betydelse för deras reflekterande förmåga.

Principen bygger på att låta två reflekterade signaler interferera destruktivt så att summasignalen blir noll. Det är samma metod som används vid antireflexbehandling av linser.

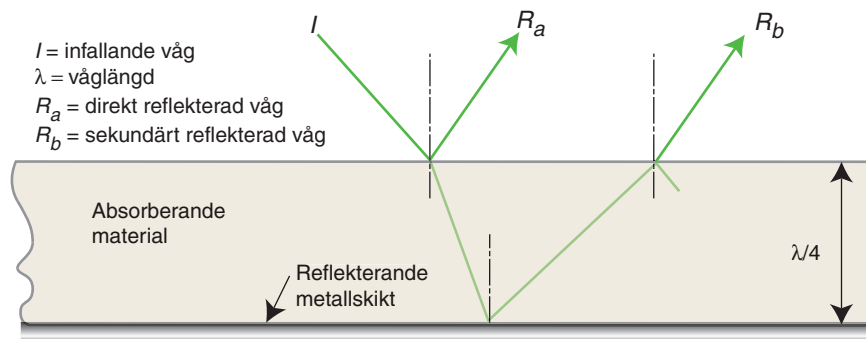


Bild 4:89. Interferande absorptionsmateriel.

En infallande våg delas upp i två delar då den träffar materialets ytskikt. En del av vågen (R_a) reflekteras direkt. Den andra delen (R_b) tränger in i materialet och reflekteras mot den underliggande metallytan. Om gångvägen för R_b är en halv våglängd längre än R_a kommer de båda vågorna att vara i motfas, summasignalen blir då noll. Detta innebär att materialet måste ha en tjocklek på en fjärdedels våglängd. För att de båda signalerna ska ta ut varandra gäller vidare att de måste ha samma amplitud. Dämpningen i materialet måste alltså vara sådan att det balanserar reflektionskoefficienten i materialets ytskikt.

De resonanta materielen är normalt mindre bredbandiga än de icke resonanta absorbenterna. De påverkas också av infallsvinkeln eftersom denna påverkar gångvägen för vågen R_b . Vid små infallsvinklar kommer inte R_b att vara i motfas mot R_a .

Salisbury screen – ett exempel på resonant absorbent

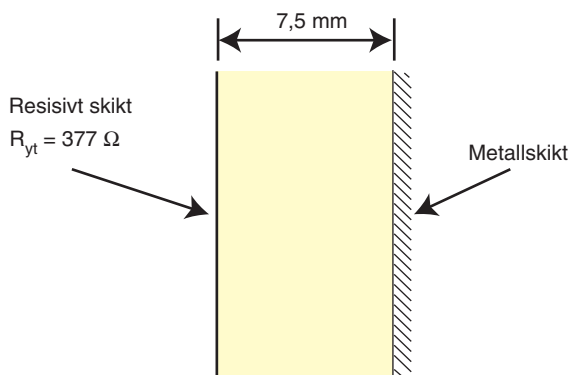


Bild 4:90. Schematisk skiss över en Salisbury screen optimerad för frekvensen 10 GHz.

En konventionell Salisbury screen består av ett tunt resistivt skikt, exempelvis en kolfiberduk eller en plastfilm med ett tunt förlustskikt, med en ytresistans, R_{yt} , lika med vågimpedansen för vakuum:

$$R_{yt} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \quad [\Omega]$$

Det resistiva skiktet backas upp av ett metallskikt med oändlig ledningsförmåga, på ett avstånd av en kvarts våglängd ($\lambda/4$) vid mittfrekvensen. Det mellanliggande skiktet utgörs av ett material med en relativ dielektricitetskonstant ϵ_r nära 1.

Ett exempel på en Salisbury screen, optimerad för frekvensen 10 GHz visas i bild 4:90.

I diagrammet (bild 4:91) visas reflektionsegenskaperna som funktion av frekvensen för ovanstående absorbent. Vid mittfrekvensen (10 GHz) fås i princip oändligt liten reflektion.

Som ett mått på en radarabsorbents effektivitet används ofta absorbentens bandbredd, dvs det frekvensområde där reflektionsegenskaperna är de önskade. För en Salisbury screen är bandbredden relativt begränsad. I detta exempel fås en reflektion mindre än -13 dB (5%) inom frekvensintervallet 7,3- 12,8 GHz.

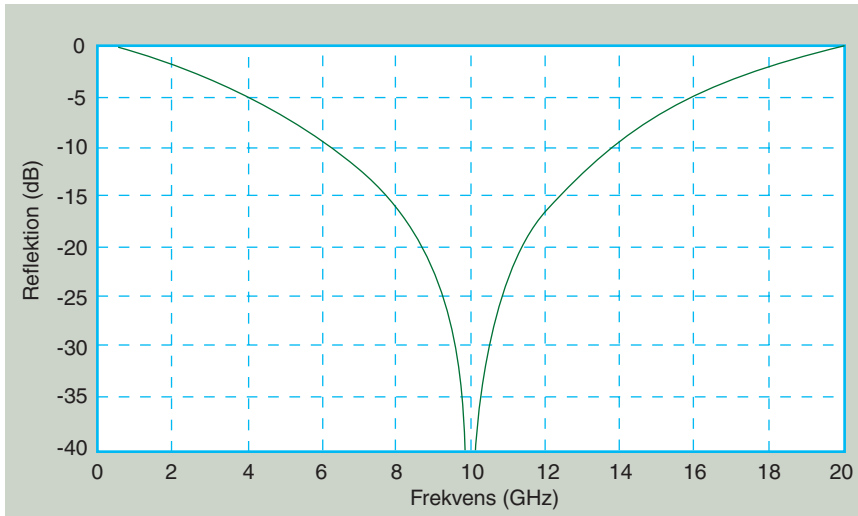


Bild 4:91. Reflektion som funktion av frekvens för en Salisbury screen enligt tidigare bild Vinkelrätt infall.

På grund av absorbentens resonanta natur får även reflektionsegenskaperna ett infallsvinkelberoende.

Nackdelen med en ren Salisbury screen är dess begränsade bandbredd. En förbättring av bandbredden kan uppnås genom att utnyttja två eller flera resistiva skikt med lämpligt valda ytresistanser och på lämpligt avstånd från varandra. Denna typ av absorbent benämns Jaumanabsorbenter och klassas efter antalet resistiva skikt. Nackdelen med denna typ av absorbent är att tjockleken snabbt ökar med ökad bandbredd (antalet resistiva skikt bestämmer bandbredden).

Icke resonanta absorbenter

Tillskillnad från resonanta radarabsorbenter har de icke resonanta radarabsorbenternas dimensioner ingen avgörande betydelse för absorptionsförmågan.

Gradientabsorbenter är en typ av radarabsorbent där man utnyttjar en inhomogen struktur med successivt ökande förluster (stigande gradient).

4. Telekrigföring

Vid absorbentens framsida ska ytresistansen vara lika med vågimpedansen för vakuum = 377 Ohm dvs ϵ_r och ϵ_r ska vara så nära 1 som möjligt. Gradient-absorbenter har oftast mycket god radarabsorption över breda frekvensområden, typiska värden är 15–30 dB absorption inom frekvensområdet 2–40 GHz. För lägre frekvenser tenderar även denna typ av radarabsorbent att öka i tjocklek. Som en tumregel kan man säga att vid undre gränzfrequensen har absorbenten en tjocklek på ca $\lambda/4$.

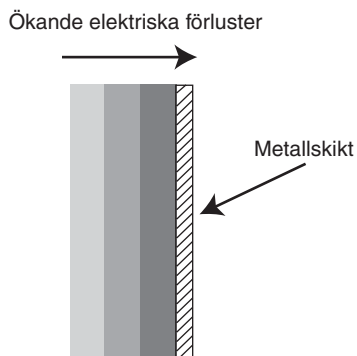


Bild 4:92. Skiss över en absorbent bestående av tre homogena skikt med successivt ökande förluster.

Ett vanligt sätt att uppnå ökande grad av elektriska förluster i en radarabsorbent är att foga ihop homogena material med successivt ökande förluster.

En annan typ av gradientabsorbent är eliminmaterial och bygger på att förlustmaterialet appliceras på väggarna hos en dielektrisk bikakestruktur.

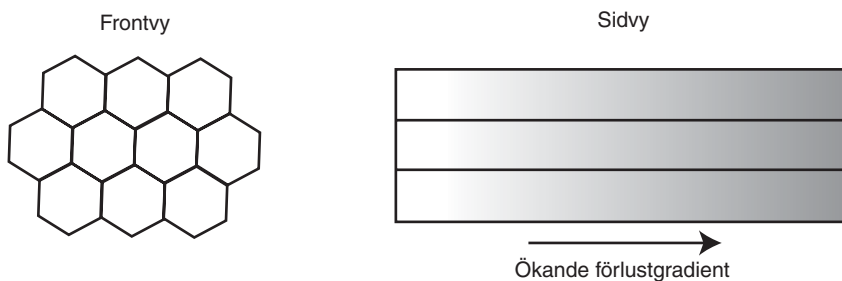


Bild 4:93. Skiss över gradientabsorbent baserat på bikakekärna.

Bikakestrukturen kan förses med täcksikt av kompositmaterial för att uppnå väderbeständighet och goda hållfasthetsegenskaper. Typiska reflektionsegenskaper för denna radarabsorbent är -13dB (5%) inom frekvensområdet 4-18 GHz.

Även gradient absorbenterna har vinkelberoende reflektions egenskaper. Hos dessa blir reflektionen minst vid ca 45° infallsvinkel.

Förlustmaterial

En absorbent innehåller oftast ett förlustmaterial. Absorptionen i en radarabsorbent kan vara

- dielektrisk
- resistiv
- magnetisk.

Dielektriska förluster uppstår i isolatorer genom att den inträngande radarvågen polariserar atomer, joner, molekyler och gränssytor. Radarabsorberande material baseras sällan enbart på denna typ av förluster.

Resistiva förluster uppstår om materialet har en ledningsförmåga. Vanliga material med resistiva förluster utgörs av kol, metaller samt halvledande keramer och polymerer. Materialen utnyttjas i form av tunna partiklar, flak, fibrer men också tunna skikt.

Magnetiska förluster uppträder som hysteres hos magnetiska material men också som virvelströmsförluster i ledande material. Ferriter och ferroelektrika är exempel på material med magnetiska förluster.

Aktiv radarabsorption- plasma stealth

En helt annorlunda metod att minska den radarmålarean är att utnyttja joniserad gas s k plasma. Fördelen med denna metod är att flygplanet inte måste byggas med samma extrema formgivning som skett med t ex F 117 och B2 utan kan designas främst efter aerodynamiska krav.

Med plasma avses joniserade gaser med lika mängd elektroner och positiva joner. Detta finns t ex i jonosfären och uppstår där genom solljuset påverkan, plasma uppstår även i t ex ett lysrör genom elektriska urladdningar i gas.

Beroende på koncentrationen av elektroner kommer en elektromagnetisk våg antingen att dämpas, reflekteras eller att passera utan förluster. Gränshfrekvensen f_p mellan dessa tillstånd kan approximeras som:

$$f_p \approx 9\sqrt{N} \quad [Hz]$$

Där N är koncentrationen av fria elektroner [st/m^3]

Exempel 4:7

I jonosfären finns mellan 10^{10} - 10^{12} elektroner $/m^3$ Vilken frekvens ska väljas för att man från jorden ska kunna kommunicera med en satellit?

Svar

Gränshfrekvensen f_p i detta exempel kommer att variera mellan 0,9 till 9 MHz. Frekvensen ska därför väljas betydligt högre än 9 MHz för att odämpat passera jonosfären. Signaler med frekvens betydligt under 0,9 MHz kommer att studsas mot jonosfären, något som förövrigt utnyttjas vid kortvågssändning. Frekvenser mellan dessa värden kommer att delvis tränga in i plasman och absorberas.

4. Telekrigföring

Om joniserad luft kan skapas runt ett flygplan kan en elektromagnetisk våg inom ett visst frekvensområde dämpas. Fenomenet har tidigare observerats då ett en rymdfarkost återinträder i atmosfären och friktionen mot luften bildar plasma. När detta inträffar bryts tillfälligt radiokommunikationen genom att plasman avskärmar farkosten.

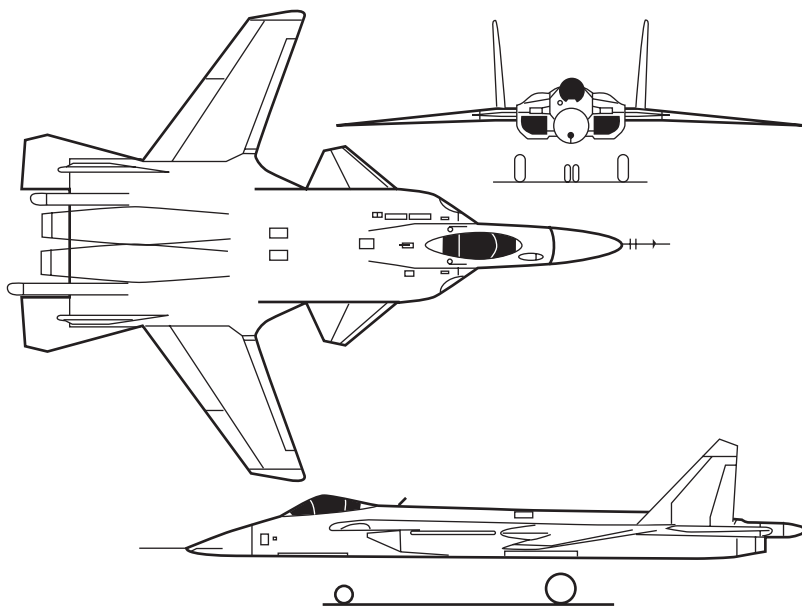


Bild 4:94. Företaget Sukhoi's förslag till ryskt stridsflygplan S-37.

Uppgifter i internationell press gör gällande att forskare i Ryssland konstruerat en plasmagenerator, s k plasmatron, som kan jonisera luften. Generatoren sprutar troligen ut gasen i framkanten av flygplanet varefter den spolas längs flygplanet av fartvinden. Man tror att radarekott dämpas med en faktor 10-100 med den här metoden. Till metodens kritiska punkter hör att plasmageneratoren kan bli stor och förbrukar mycket energi. Man tror därför att plasmageneratoren startas först då radarvarnaren indikerar att en radar låst på flygplanet. Då generatoren är påslagen kan troligen inte flygplanets egenradar (eller radarvarnare) användas. I Ryssland ska man ha lyckats få ner vikten på plasmageneratoren under 100 kg, vilket gör det fullt möjligt att placera den på ett konventionellt stridsflygplan. Enligt samma uppgifter har metoden prövats på de senaste versioner av Su 27 och kommer att placeras på flygplan S-37.

En bieffekt är att den joniserade luften kommer att göra att flygplanet troligen kommer att lysa i mörker.

Flera andra länder bl a USA och Frankrike lär också bedriva forskning med plasma stealth.

Att upptäcka radarkamouflerade mål

Som alla nya medel kan också stealthtekniken mötas av motåtgärder. Detta blev inte minst uppenbart då ett amerikanskt F-117 flygplan sköts ner i Kosovo.

Några metoder för att upptäcka stealthflygplan är att

- öka radarns uteffekt eller mottagarens känslighet
- använda akustiska system
- använda bi- och multistatiska system
- använda IR
- att detektera magnetiska förändringar.

Teoretiskt finns det flera metoder som utnyttjar mikrovågor

- lågfrekventa system (OTH-radar)
- signalspaning
- högfrekvent radar (mm-radar).

Att öka radarns uteffekt är, kanske skenbart, den enklaste metoden att förbättra räckvidden mot små mål. Metoden har dock följande tre nackdelar.

1. För att fördubbla räckvidden krävs 16 ggr så stor uteffekt.
2. Hög uteffekt kan leda till problem med överslag, komponenter kan behöva kylas och det är svårare att bygga sändare med halvledarteknik.
3. En ökad uteffekt gör också att fåglar ($0,01 \text{ m}^2$) och till och med insekter ($0,001 \text{ m}^2$) kan detekteras. Den höga effekten gör att de ställs mycket höga krav på radarns markekoundertryckning eftersom annars kommer radarn få en stor mängd markklotter.

Lågfrekvensradar (lång våglängd) kan motverka stealthformgivning och RAM. Om en signal har en våglängd av samma storleksordning som målet eller någon del av detta så uppstår ett resonansfenomen som ger en bättre reflektion. När vågländen är stor kommer vågen att böjas runt hindret (diffraktion). Betydelsen av formgivning minskar därför. En UHF-radar t ex amerikanska E2-C AEW (400 MHz) har vågländen 75 cm. Denna våglängd kommer att framförallt ge resonansfenomen i fenor och vingklaffar. För att kunna få mycket lång räckvidd hos ett radarsystem används s k OTH-radar (Over The Horizon). Det finns flera rapporter att OTH-radar har upptäckt stealthflygplan. Dessa radarstationer arbetar typiskt med våglängder mellan en och 100 m (3MHz-300 MHz). Problemet med långa våglängder hos en radar är att radarantennen kommer bli mycket stor och riktningsnoggrannheten dålig vilket kan göra det svårt att invisa ett vapensystem mot målet.

4. Telekrigföring

Ett annat alternativ är att använda bistatisk eller multistatisk radar, dvs att fler sändare och en eller fler mottagare finns på olika platser. Att den reflekterande pulsen inte studsar tillbaka mot sändaren gör då inget eftersom mottagaren inte finns på samma plats som sändaren.

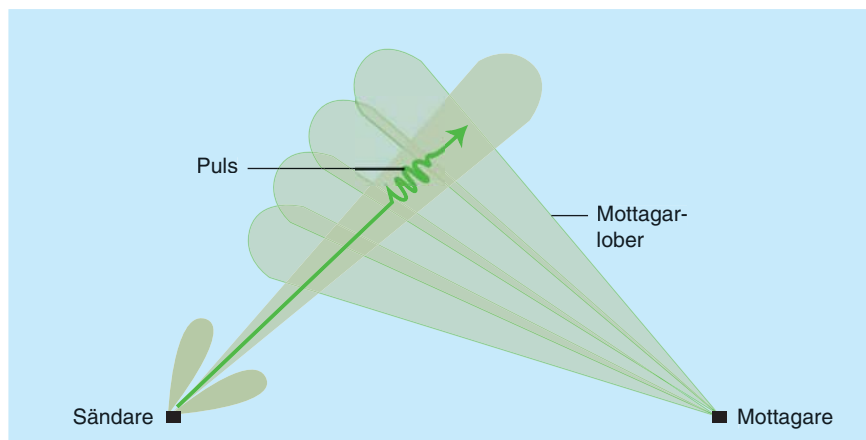


Bild 4:95. Bistatisk radar. Mottagaren använder flera antennlobor för att fastställa målets position.

Fördelar med bistatisk radar är att

- vinsten med formgivning hos ett stealthflygplan minskar, då man inte vet var mottagaren befinner sig
- många mottagare ökar upptäcktssannolikheten eftersom det blir svårt att ha liten radarmålarea i alla riktningar
- mottagarens position inte kan fastställas genom signalspaning vilket försvårar att rikta telestörning rakt mot mottagaren
- hög PRF kan användas eftersom mottagaren inte får samma problem med "blinda område (minsta mätavstånd)" som hos en konventionell radar.

Nackdelar med bistatisk radar är att

- både mottagare och sändare måste samtidigt se målet
- det är svårare med geometriskt bestämning av målets position
- det är svårt att synkronisera sändare och mottagare
- mottagaren bör ha många antennlobor vilket har hitintills varit kostsamt.

Med lång våglängd och bistatisk radar kan man säga att man är tillbaka till radarns barndom under 1930-talet då radarn arbetade på meterbandet och sändare och mottagare var separerade.

En ytterligare metod skulle vara att använda radarstationer med mycket kort våglängd (mm). För dessa våglängder så kan flygplansskrovet utgöra en ”skrovlig” yta som gör att energin reflekteras tillbaka mot radarn. Metoden kan endast användas av sensorer med kort räckvidd eftersom atmosfären dämpar millimetervågor kraftigt.

Aktiva störmetoder

Syftet med den aktiva störningen kan vara att försvåra

- upptäckt (t ex minska radarns räckvidd)
- klassificering (t ex om det är transportflygplan eller attackflygplan)
- identifiering (t ex störa igenkänningsutrustningen)
- målinmätning (t ex ge felaktigt avstånd eller hastighet till radarn)
- bekämpning (t ex få en robot att tappa mållåsningen).

Följande begrepp förekommer.

- *Störformer* avser kategori eller art av störning t ex maskerande eller vilseledande störning.
- *Störmoder* avser varje störform som kan delas upp i ett antal störmoder t ex avståndsavhakning inåt/utåt.
- *Störparametrar* karaktiserar en störmod t ex avhakningslängd, brusbandbredd, varaktighet m m.
- *Störprogram* avser ett antal störmoder som programmerats till en sekvens och bildar på så sätt ett program.

Den aktiva störningen kan indelas i två huvuddelar

- maskerande störning
- vilseledande störning.

Ibland nämns ”mättande störning” vilket kan utgöras av en stor mängd falska ekon. Någon klar gräns mellan dessa typer av störning finns inte.

Ju mer lik en störsignal är den verkliga radarsignalen desto enklare kan den passera in i radarns signalbehandling utan att undertryckas.

I litteraturen finns beskrivet hundratals olika former av aktiv radarstörning. I de följande avsnitten behandlas några av de principiellt viktigaste.

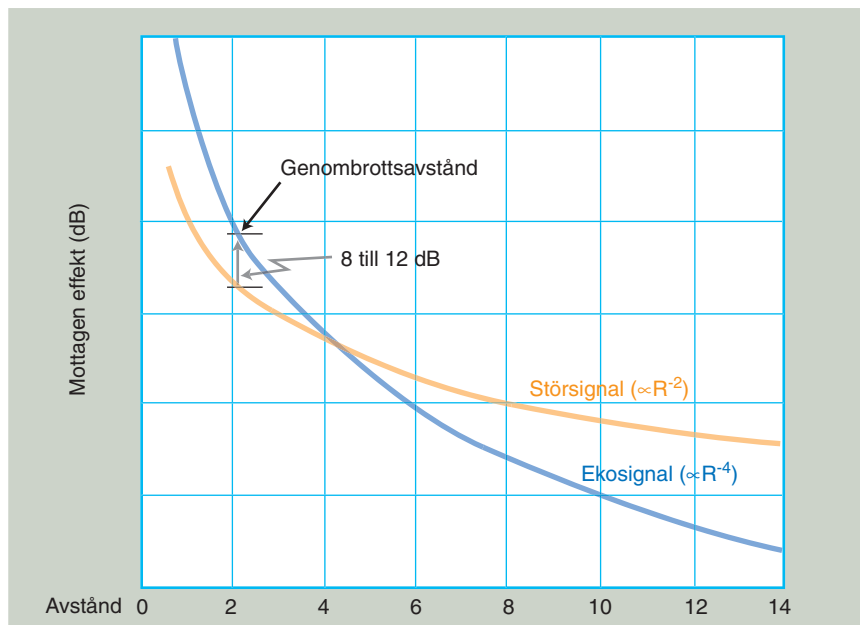


Bild 4:96. Vid genombrottsavståndet är ekosignalen tillräckligt mycket starkare än störsignalen för att målet ska kunna detekteras.

Genombrottsavstånd

Enligt radarekvationen (kap 3) är den mottagna ekosignalen proportionell mot $1/R^4$. För störfallet gäller envågsutbredning och störsignalstyrkan är därför proportionell mot $1/R^2$. Om ett flygplan närmar sig radar kommer ekosignalen att öka i styrka snabbare än störsignalen. Förr eller senare blir ekosignalen starkare än störsignalen. När detta sker har radarn en teoretisk möjlighet att detektera målet. Enligt radarekvationen så kräver radarn en "extra säkerhetssignal" innan målet detekteras. Denna marginal bestäms av radarns minsta signal/brusförhållande ($SNR_{\min}$). För en spaningsradar är $SNR_{\min}$ i storleksordningen 8–12 dB. $SNR_{\min}$ kan påverkas av operatören genom vald KFA-nivå.

Det avstånd där ekosignalen blir tillräckligt mycket starkare än störsignalen för att målet ska kunna detekteras kallas genombrottsavstånd. Ekot bryter här igenom störsignalen.

Maskerande störning

Denna form av störsändning (noise jamming) ska dölja det verkliga ekot och innebär att man försöker "blända" radarn med elektronisk störning så att den inte ser normala mål. En radar kan upptäcka ett mål först då ekosignalen är något starkare än den totala brusnivån dvs mottaget brus plus bruset från den egna mottagaren. Vid maskerande störning försöker man

förhindra eller fördröja målupptäckt genom att sända ut någon form av elektroniskt brus som minskar signal/brusförhållandet så att målet döljs.

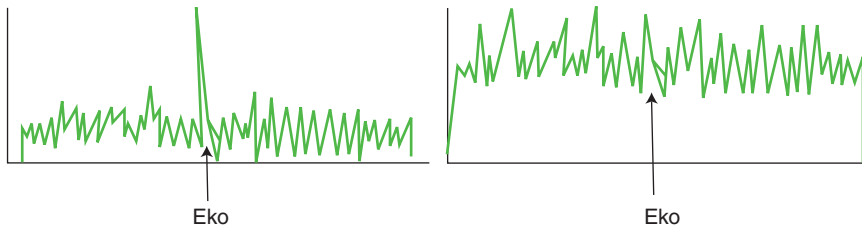


Bild 4:97. När bruset ökar så minskar signalbrusförhållandet, vilket medför att det blir svårt för radarn att urskilja ekot.

Maskerande störning kan även ske med en stor mängd falska ekon eller med hjälp av remsor. Det senare räknas dock som en passiv störform.

Vilseledande störning

Vilseledande störning har till syfte att ge operatören eller radarn en felaktig bild av var målen är eller hur många de är.

Ett gränsfall mellan vilseledande- och maskerande störning är när stör-sändaren skapar en stor mängd skenmål s k multipla skenmål. En stor mängd skenmål döljer genom sin mängd det riktiga ekot för operatören, men kan också överbelasta radarns signalbehandling eller få radarn att höja sina KFA-trösklar så mycket att de verkliga målen inte kommer över detekteringströsklarna, vilket leder till att de inte presenteras.

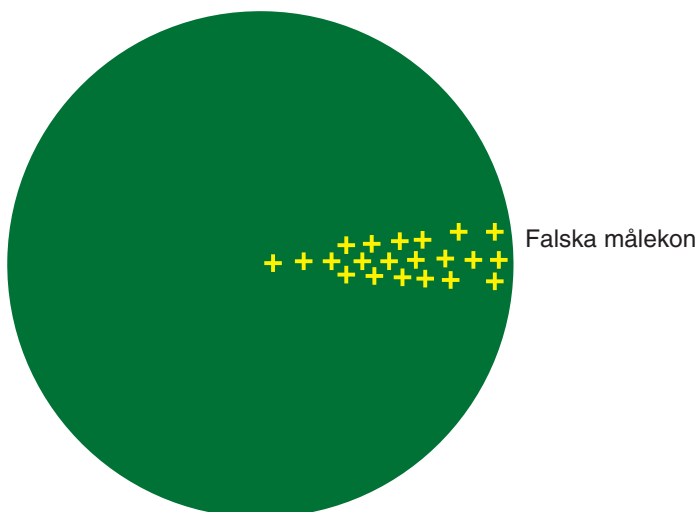


Bild 4:98. PPI med falska ekon.

Exempel på olika former av vilseledande störning är

- falska ekon
- falska signaler för avstånds-, hastighets- och vinkelavhakning mot eldledningsradar
- om remsor släpps ut i små puffar kan en radar fås att tro de är verkliga ekon (detta är dock ej en aktiv störform).

Mot en spaningsradar är det främst aktuellt med olika mängder falska ekon.

Då en eldledningsradar befinner sig i spaningsfas är den känslig för i stort sett samma typer av störning som spaningsradarn. Eldledningsradarn, till skillnad mot spaningsradarn, har inte bara till uppgift att upptäcka målet utan ska också följa målets rörelser för att t ex styra en robot mot målet. Radarn måste därför kunna följa flygplanets rörelser i vinkelled samt i avstånd och hastighet. När en eldledningsradar låst på planet kan den därför påverkas av de avhakande störformerna, hastighets-, avstånds- och vinkelavhakning. Dessa störformer har till uppgift att få eldledningsradarn att låsa över på ett skenmål och prediktera felaktiga koordinater för vapensystemet.

De vilseledande störformerna skapas oftast av sk repeterstörsändare. Denna typ av störsändare har möjligheten att lagra (spela in) radarpulsen i ett minne för att sedan förvanska pulsen och sända ut den en eller flera gånger vid ett senare tillfälle.

Man bör observera att en konventionell spaningsradar inte är känslig för avhakande störning eftersom den inte låser på målet. Moderna radarstationer med elektroniskt styrda antenner t ex artillerilokaliseringsradarn Arthur kan sägas både vara spanings- och eldledningsradarstationer, eftersom de både kan spana efter mål och målfölja. Dessa radarstationer skulle därför i princip kunna utsättas för avhakande störformer.

Att hushålla med energin – power management

Energin i en störsändare är en begränsad resurs. För att energin ska användas optimalt ska den sändas ut

- vid rätt tidpunkt
- på rätt frekvens
- i rätt riktning.

För att kunna sända vid rätt tidpunkt och på rätt frekvens innehåller flertalet moderna störsändare någon form av mottagare för lagring och/eller analys av radarns signaler.

De flesta störsändare har även någon form av riktantenn för att rikta störenergien i den troligaste hotriktningen. Ofta är störningen riktad framåt och/eller bakåt. Man försöker i moderna system använda sig av elektroniskt styrda antenner som kan koncentrera störenergien i en eller flera smala lober i vilken/vilka riktningar som helst.

Repeterstörsändare nyttjar generellt sett energin betydligt bättre än en konventionell brusstörsändare. Om en repeterstörsändare modulerar på brus ovanpå den repeterade pulsen kommer detta automatiskt få rätt frekvens. Den blir då en smalbandig brusstörsändare. Repeterstörsändare drar därför mindre energi och används därför ofta i egenstörsändare i flygplan och UAV.

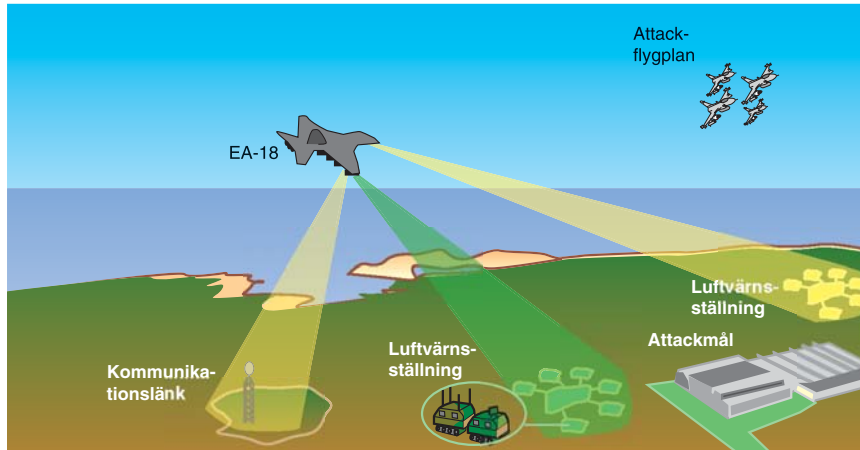


Bild. 4:99. EA-18 föreslagen ersättare till EA 6-Prowler med elektroniskt styrd antenn.

Effektsteg

Vandringsvågrör (Travelling Wave Tube, TWT) är beteckningen på en form av elektronrör som används till slutförstärkare i störsändare och i radarstationer. Till dess fördelar hör att de är koherenta och har större bandbredd än t ex magnetronen och carcinotronen som var vanliga tidigare.

När ett TWT används kan störsignalen alstras på låg effektnivå. Detta gör det enklare att styra fasläget för att t ex skapa olika pulskoder vilket i stort sett är omöjligt med en magnetron. Koherenta störformer mot pulskompressionsradar kan därmed skapas.

Begränsande faktorer hos störsändarna är kraven på låg vikt och volym samtidigt som hög effekt är önskvärt. Kraftaggregaten till sändarna kan ta en betydande plats och den höga effekten kan ge upphov till kylproblem av störkapseln.

På senare år har s k mini-TWT börjat användas. Ett mini-TWT med relativt låg uteffekt kan ha en storlek ungefär som en större tuschpenna. Dessa TWT kan då bl a användas i släpade skenmål och i små UAV. På motsvarande vis som inom radartechniken så utvecklas små transistoriserade sändarelement. Varje sändarelement har bara en effekt på ett fåtal watt, men genom att kombinera många till en antennarray kan man skapa en fasstyrd antenn med förmåga att snabbt rikta effekter från många sändare i en viss riktning.

Motmedelssystemets styrdator styr sändarens högfrekvensgenerator HFG så att den lämnar en signal med det önskade utseendet t ex vad avser frekvens, pulslängd, amplitud m m till vandringsvågröret. I TWT förstärks sedan signalen före den sänds ut.

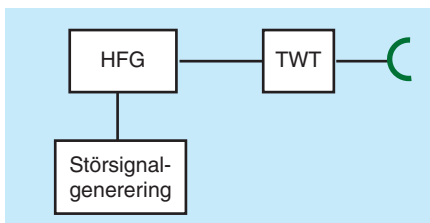


Bild 4:100. Principen för effektförstärkning.

Maskerande störning

Detta avsnitt vill skapa en allmän förståelse för maskerande störning. Maskerande störning benämns oftast brusstörning.

Smalbandig och bredbandig störning

En störform kan vara smalbandig eller bredbandig. Smalbandig störning är betydligt mer effektivt eftersom störsändarens energi kan koncentreras inom ett litet frekvensområde. Radarmottagaren har en viss bandbredd vilken är anpassad till bandbredden hos den utsända pulsen. Det är bara störenergien inom mottagarbandbredden som kan passera in i radar-mottagaren och påverka radarn.

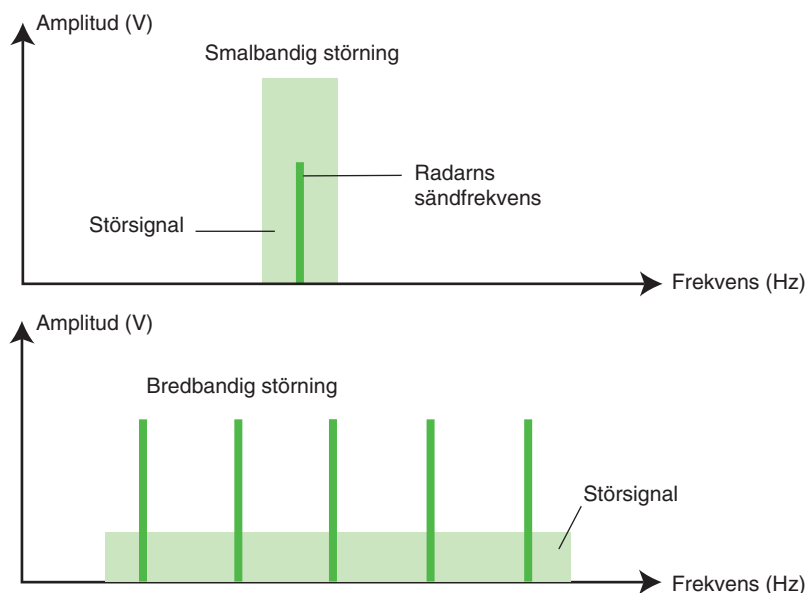


Bild 4:101. Smal- och bredbandig störning. Om radarn sänder på en frekvens kan störsändaren fördela all energi på denna frekvens. Om radarn växlar frekvens kan störsändaren behöva fördela sin energi över hela frekvensbandet och effekten av störningen blir då liten.

Exempel 4:8

En radar sänder med frekvensen på 5,6 GHz och har en mottagarbandbredd på 400 kHz. Radarn kommer bara vara mottaglig för störning som sker på frekvenser mellan $5,6 \text{ GHz} \pm 200 \text{ kHz}$.

Om en störsändare kan störa smalbandigt inom ett 800 kHz brett område kring sändfrekvensen så kommer $400/800=50\%$ av störningen att kunna påverka stationen.

Om i stället en motståndare tvingas störa bredbandigt inom ett 500 MHz område kommer endast $400/500\,000=0,08\%$ av störningen att kunna påverka radarn.

Följaktligen eftersträvar den som störsänder att sända smalbandigt. För att lyckas med smalbandig störning bör antalet sändande radarstationer vara litet och frekvensändringsmöjligheterna små hos radarstationerna.

Om en motståndare vill störa många radarstationer samtidigt eller radarstationen byter frekvens fortare än vad störutrustningen kan, tvingas han att övergå till bredbandig störning.

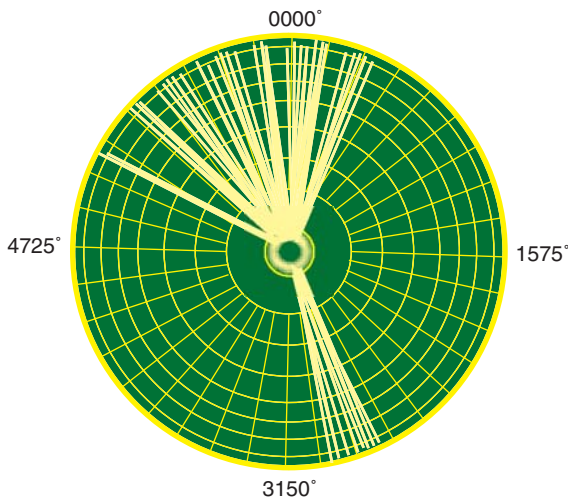


Bild 4:102. Brusstört PPI i huvud- och backlober.

Bredbandig brusstörning är en enkel metod som inte kräver någon avancerad signalspaningsutrustning. Bredbandig störning kräver emellertid en stor mängd energi, annars så nedgår störverkan.

Om störsändaren lyckas täcka hela radarbandet med tillräckligt med brusenergi så finns det inga motåtgärder radarn snabbt kan göra för att komma utanför störningen. Men för att störsändaren ska lyckas med detta krävs att den har hög uteffekt alternativt befinner sig nära radarn.

De moderna störsändarna kan i vissa fall hinna följa med då radarstationen byter frekvens. Om störsändaren hinner följa med i frekvens-

ändringarna, kan den störa smalbandigt fast radarn byter frekvens hela tiden. En smalbandig störare måste innehålla en signalspaningsutrustning för att alltid kunna rikta sin störning mot rätt frekvens.

Störutrustningen kan ha möjlighet att samtidigt störa smalbandigt mot flera olika radarstationer, om inte frekvensändrings möjligheterna i radarn är alltför stora.

I t ex övningsstörsändaren Astor kan man ställa in maximalt åtta 40 MHz breda frekvensområden som mottagaren i Astor övervakar. Om en radar börjar sända inom ett övervakat område börjar Astor störsända smalbandigt mot detta frekvensområde.

I en pulskompressionsradar kommer framförallt signaler som överensstämmer med pulskompressionskoden att förstärkas medan övriga signaler kommer att undertryckas. Grovt sett kan man säga att verkan av brusstörningen reduceras ju fler subpulser som sändpulsen innehåller. I vissa radarstationer används flest subpulser vid de långa avståndsområdena.

Om störsändaren kan använda samma pulskod som radarstationen använder så krävs mycket lite störeffekt.

Täckpulsstörning är en störform som är ytterst effektiv mot pulskompressionsradar om denna saknar råvideo. Då flygplanet träffas av en radarpuls skickar störutrustningen genast tillbaka en kraftig bruspuls, vilket sker så snabbt att den hinner täcka större delen av flygplanets ekopuls. En repesterstörsändare med mycket kort intern fördröjning är lämplig att använda i detta fall.

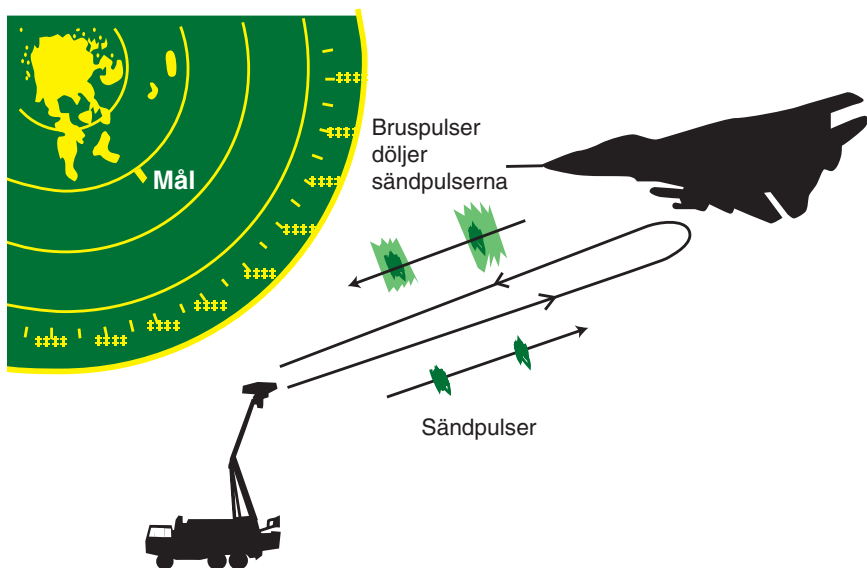


Bild 4:103. Täckpulsstörning.

När radarstationen samtidigt får tillbaka både ekot och bruspulsen kan bruspulsen maskera ekopulsen så mycket att huvuddelen av pulskompressionskoden går förlorad. Detta får till följd att radarn inte känner igen sin egen puls. Stationen kommer därför varken att presentera ekot i MTI eller Icke-MTI kanalerna. Något eko syns därför inte på indikatorn.

I en radar utan råvideo kommer inte operatören få någon som helst upplysning om att radarn är utsatt för störning. Anledningen till att det inte uppstår någon störbäring är att i förhållande till radarns hela mätområde så är bruspulsen trots allt kort och ger därför i medeltal inte upphov till tillräckligt stor höjning av brusnivån för att en störbäring ska indikeras. Dessutom sker mätningen för att fastställa brusnivån endast vid något enstaka tillfälle i slutet av varje mätperiod.

I PS-90 kommer täckpulsen resultera i ett stort eko på råvideon där störsändaren finns. I de kanaler som använder pulskomprimerad information, MTI-, Icke MTI- och helikopterkanalerna syns däremot ingenting.

I PS-70, PS-701 och andra konventionella pulsradar, vilka saknar pulskompression, kommer effekten att bli densamma som på PS-90 råvideo, dvs att ett mycket stort eko framträder.

Problemet för PS-70 och PS-90 blir att avgöra vad som finns inuti det stora ekot. Är det ett falskt eko, döljs ett flygplan eller finns där en hel division? Konsekvenserna av svaret kan vara av avgörande betydelse.

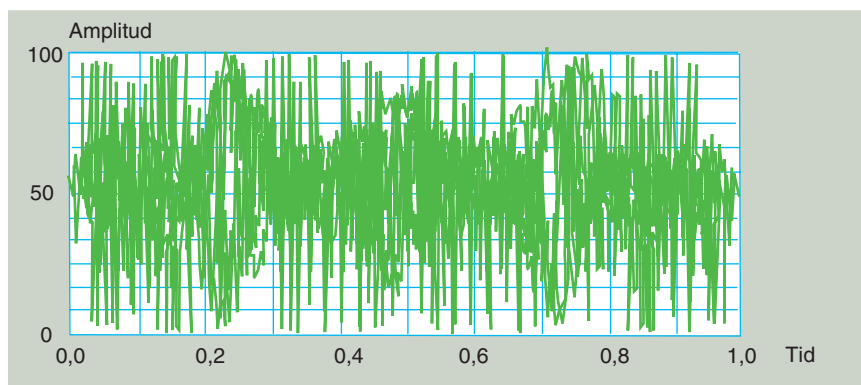


Bild 4:104. Amplitudmodulerat brus.

Brus

Den vanligaste formen av maskerande störning är att sända ut en elektromagnetisk signal som är slumpmässigt modulerad i amplitud och/eller frekvens, en s k brussignal. Störsändarens brussignal ska försämra radarns signalbrusförhållande så att ekodetektion ej blir möjlig eller försåras.

Brusstörning är, i varierande grad, effektivt mot alla radarstationer. Ingen radar kan upptäcka ett eko om bruset är tillräckligt mycket kraftigare än

4. Telekrigföring

målekot. Hur mycket starkare bruset måste vara än signalen beror på typ av radarstation. Generellt kan dock sägas pulskompressionsradar är den typ av radar som är svårast att störa med brus.

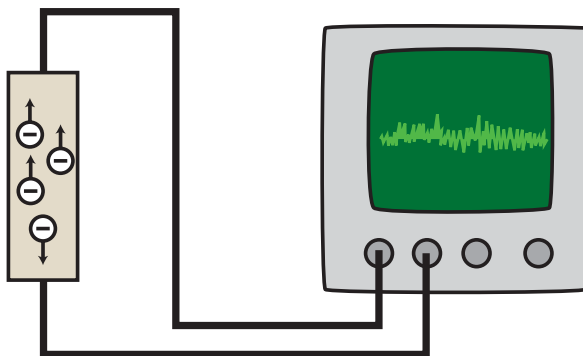


Bild 4:105. Brus. Vid små spänningar blir det uppenbart att genom elektronernas slumpmässiga rörelser uppstår över- respektive underskott av elektroner i en elektrisk komponents ändar. En elektrisk spänning uppstår över komponenten. På oscilloskopet syns en brusspänning.

I elektroniska komponenter alstras brus. Bruset beror på att vid små strömmar blir det märkbart att de enskilda elektronerna rör sig slumpvis. I närvaro av en elektrisk spänning får elektronerna visserligen i medeltal en viss hastighet men de enskilda elektronerna rör sig fortfarande slumpvis. Bruset ökar bl a med ökande temperatur.

$$P_{\text{brus}} = k \cdot T \cdot B$$

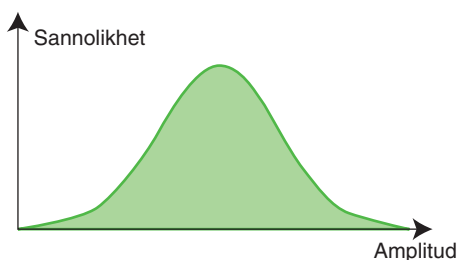
$$P_{\text{brus}} = \text{bruseffekt [W]}$$

$$k = \text{Boltzmanskostant [1,38} \cdot 10^{-23} \text{J/K}]$$

$$T = \text{temperaturen [K]}$$

$$B = \text{mottagarbandbredden [Hz]}$$

Det helt slumpvisa bruset kallas vitt Gaussiskt brus eller termiskt brus. Benämningen vitt brus, kommer egentligen från optiken. Vitt ljus innehåller alla frekvenser hos ljuset. Vitt brus har samma medeleffekt på alla frekvenser. Amplituden är dock normalfördelad dvs enligt den s k Gausskurvan.



*Bild 4:106. Gaussiskt brus.
Amplitudens sannolikhetsfördelning.*

Om en störutrustning kan skapa vitt Gaussiskt brus så är det omöjligt för radarstationen att skilja störsignalerna från det brus som skapas i radarstationens egna elektroniska komponenter.

Numera finns bra brusmodulatorer som kan generera brus med önskad bandbredd. Bruset kan sedan förstärkas med ett vandringsvågrör eller av transistorförstärkare (endast lågeffekt).

Metoder att skapa en maskerande störsignal

För att skapa en maskerande störsignal finns två huvudsakliga metoder

- använda vitt Gaussiskt brus
- använda linjär frekvensmodulering.

Vitt Gaussiskt brus (Amplitudmodulerat brus, AM)

Genom att förstärka egenbruset i någon elektronisk komponent t ex en diod och sedan skicka ut detta via en antenn så kan en amplitudmodulerad brusstörsignal skapas. Bruset kommer då att finnas på alla frekvenser men variera i amplitud, enligt Gaussfördelningen.

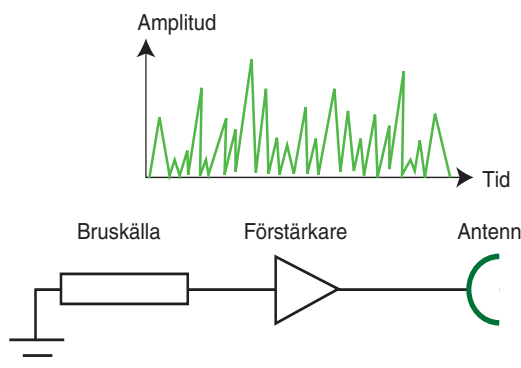


Bild 4:107. Princip för generering av amplitudmodulerat brus.

Denna metod använd sällan i praktiken, anledningen är att detta innebär ett dåligt nyttjande av störsändarens slutförstärkare. Antag att slutförstärkaren maximalt lämnar 100 W. Förstärkningen av bruset bör då läggas så att brusets högsta amplitud blir 100 W. Vid alla andra amplituder lämnar slutförstärkaren mindre än 100% av sin effekt och används då inte fullt. På grund av den låga nyttjandegraden i slutförstärkaren används därför inte amplitudmodulerat vitt Gaussiskt brus så ofta i brusstörsändare.

Vid vilseledande störning kan det däremot vara önskvärt att variera förstärkarens uteffekt. Dett är då per definition en form av amplitudmodulering. I övningsstörsändaren Astor kan man använda viss amplitud-

4. Telekrigföring

modulering uppe på den frekvensmodulerade brussignalen. Syftet kan vara att försvåra krysspejling eller att amplitudtoppen kan ge upphov till slumpvisa falska ekon i radarn.

Linjär frekvensmodulering (linjär FM)

Den vanligaste metoden att skapa en maskerande störsignal är att använda en stark signal som sveps i frekvens över den sändande radarns aktuella frekvens.

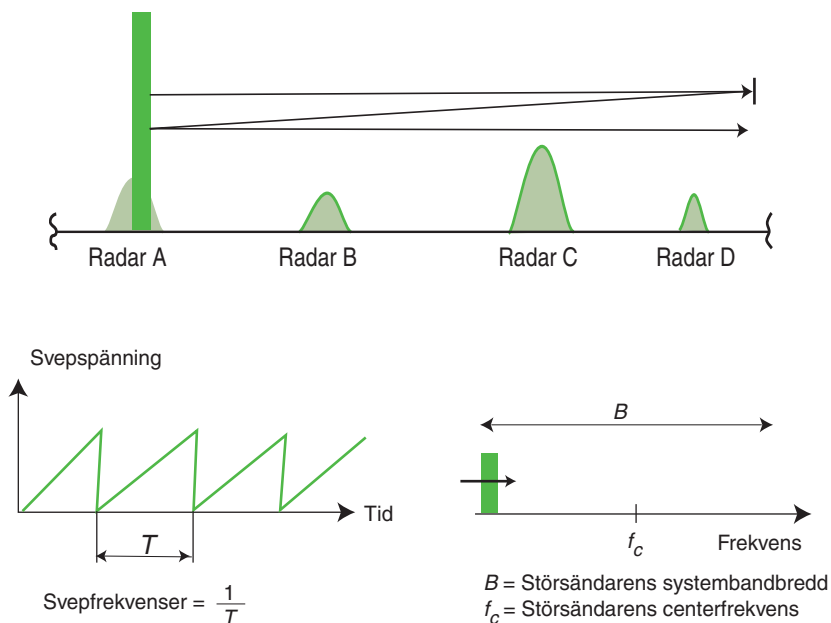


Bild 4:108. Svepstörning. En sågtandspänning påverkar störgeneratoren, när spänningen ökar så ökar den utsända signalens frekvens. På så vis fås störsignalen att svepa över frekvensbandet. Ju mindre bandbredd det störda området har desto bättre verkan får störningen.

Metoden kallas störning med frekvenssvept signal. Metoden fungerar i princip så att en spänningsstyrd oscillator (VCO) påverkas av en styrsignal vilken får oscillatorns utsignal att variera i frekvens. Signalen förstärks och sänds ut i luften via en antenn. Anm. VCO är en delvis föråldrad metod. Numera används DDS (Direct Digital Synthesis) för att generera ett frekvenssvep.

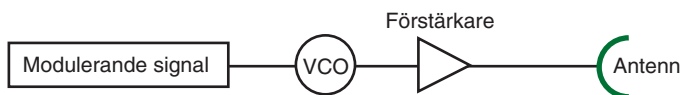


Bild 4:109. FM-sändare.

Den stora fördelen jämfört med amplitudmodulering är att den frekvensmodulerade signalen har konstant uteffekt. Störsändarens slutförstärkare kan därför alltid användas till 100%.

Beroende på vilken typ av signal som används för att påverka oscillatorns utsignal benämns det

- sågtandsmodulering
- brusmodulering.

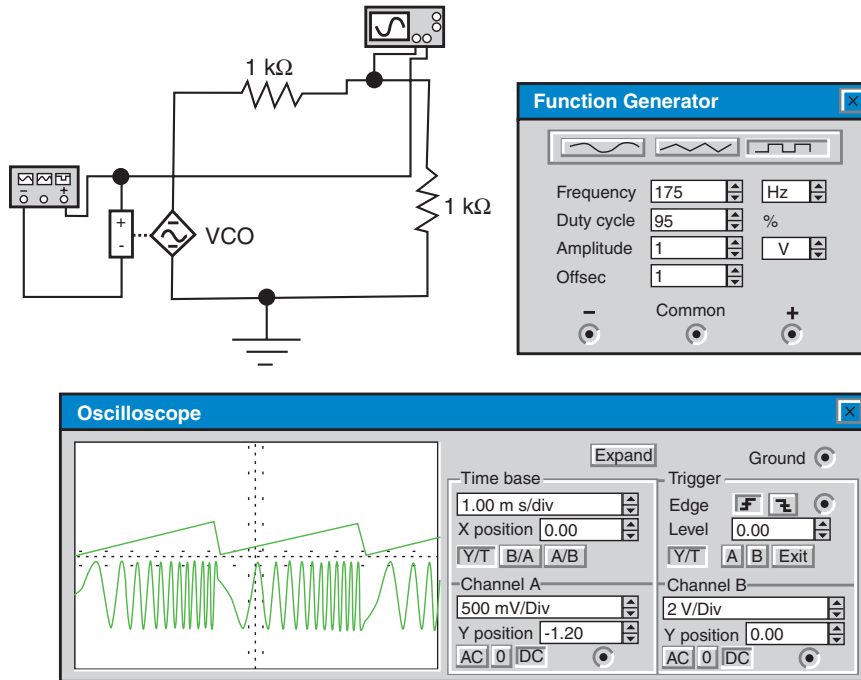


Bild 4:110. Laborationsuppkoppling av en frekvensmodulerad signal med hjälp av sågtandsmodulering. Notera att FM-signalen (den nedre signalen) har konstant amplitud.

Sågtandsmodulering innebär att frekvensen från VCO bestäms av en sågtandsignal (när spänningen ökar, ökas sändfrekvensen) vilken sveper störsignalen över ett visst frekvensområde. En svepstörning erhålls. Hur ofta störsändaren sveper förbi det aktuella området benämns svepfrekvens eller modulationsfrekvens. Svepfrekvensen kan uppgå till flera MHz (miljoner gånger/sekund).

4. Telekrigföring

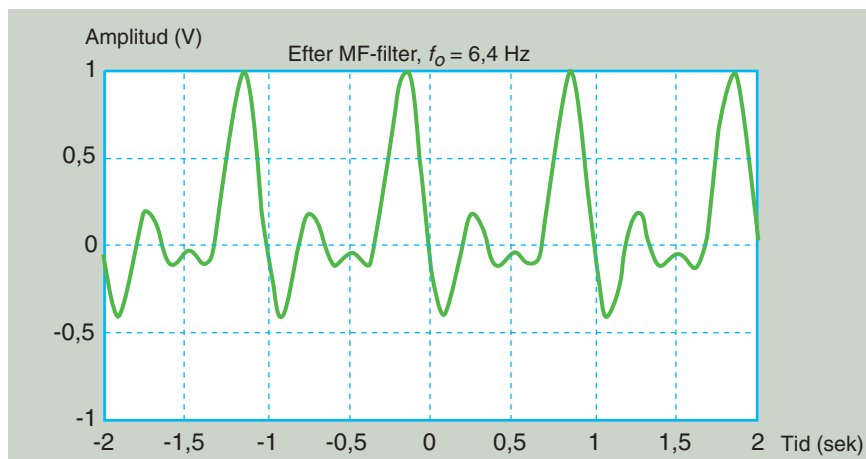


Bild 4:111. Ringningar i ett filter som utsätts för svepstörning. En ringning hinner nätt och jämnt klinga ut före nästa svep kommer. (Per Hyberg)

Svepstörning innebär att radarn får en kort störpuls varje gång störsignalen sveper förbi på rätt frekvens. Den korta men kraftiga störsignalen ger då upphov till "ringningar" i radarmottagaren. Före ringningarna klingar ut kommer nästa svep, med en ny störpuls.

Då en signal sveps i frekvens, periodiskt med konstant svepfrekvens (modulationsfrekvens), kommer utsignalen sett över tiden bara att innehålla vissa frekvenser. Avståndet mellan frekvenskomponenterna bestäms av svepfrekvensen ju snabbare svep desto glesare mellan frekvenskomponenterna.

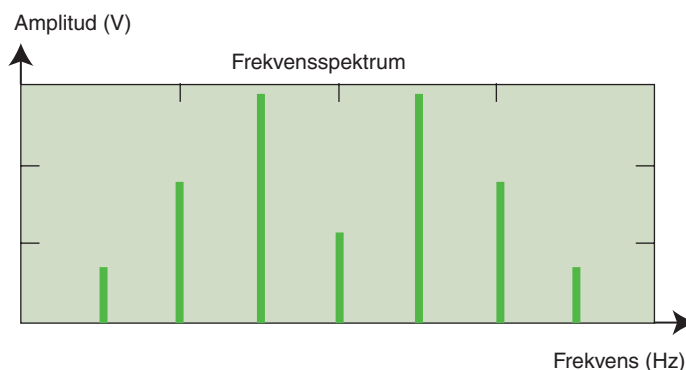


Bild 4:112. Frekvensmodulerad signal med modulationsindex $=2$. Notera att frekvenskomponenterna har olika amplituder; bärvågen, i mitten, behöver inte ha störst amplitud. Amplituden hos frekvenskomponenterna bestäms av modulationsindex.

Störpulsen "hoppar" således fram mellan olika frekvenser. Hur långt varje hopp blir bestäms av svepfrekvensen (PRF) hos svepsignalen. Ju högre frekvens hos den modulerande signalen desto glesare mellan frekvens-

komponenterna. Om frekvensen på den modulerande signalen är konstant hamnar frekvenskomponenterna alltid på samma ställe. Om svepfrekvensen ändras bildas frekvenskomponenterna i störspektret på nya frekvenser.

Det område som täcks av frekvenskomponenter (området mellan högsta och lägsta frekvenskomponent) kallas för signalens bandbredd och beror på det s k modulationsindexet (M_f).

$$M_f = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Δf =frekvensdeviationen dvs över hur stort område signalen sveps,

f_m = frekvensmodulationen dvs med vilken frekvens signalen sveps.

Om modulationsindex ökas uppstår fler frekvenskomponenter. Summan av alla frekvenskomponentsers amplitud är alltid konstant, därför blir utsignalens effekt också konstant.

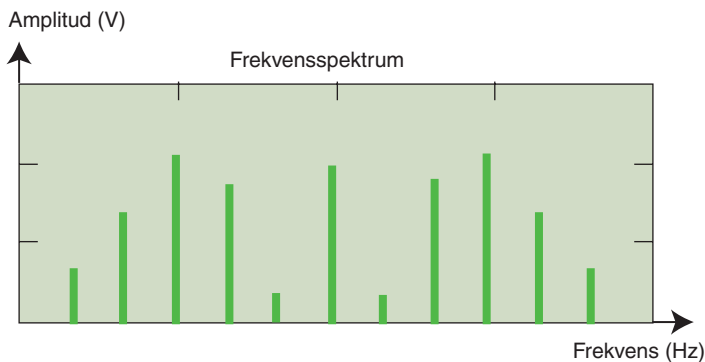


Bild 4:113. Frekvensmodulerad signal med modulationsindex = 4.

Om störsändaren hela tiden nyttjar samma svepfrekvens hos den modulerande sågtandsignalen visar det sig att frekvenskomponenterna alltid hamnar på samma ställe på frekvensaxeln, dvs energin hamnar bara på vissa speciella frekvenser. Det uppstår alltså ostörda områden mellan frekvenskomponenterna i störspektret. Om de enskilda frekvenskomponenterna i störspektret inte hamnar inom radarns mottagarbandbredd så är radarn ostörd.

Orsaken till de ostörda områdena i spektrumet kan förklaras som en typ av interferensfenomen. Om en signal sveps periodiskt ett stort antal gånger över ett område så kommer signalerna på vissa frekvenser i ofas. Resultatet blir att ingen signalenergi hamnar på dessa frekvenser.

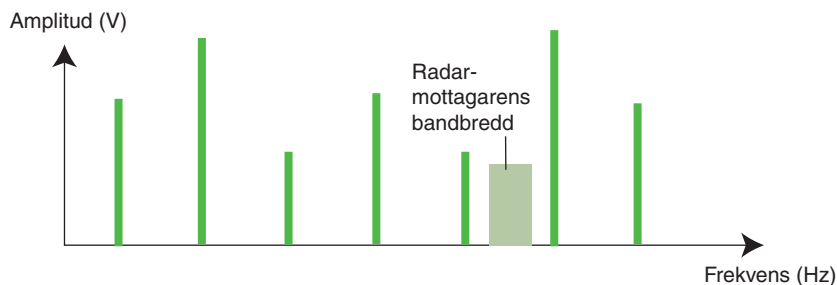


Bild 4:114. Svepstörning ger ostörda områden. Vid frekvensmodulering kan radarn vara opåverkad om dess mottagarbandbredd befinner sig mellan störsvepets frekvenskomponenter.

Det finns särskilda radarmottagare som kan släppa igenom radarsignalens spektrum men undertrycka störsignalens frekvensspektrum. Ett exempel på detta är Dicke-Fix mottagaren.

Att skapa ett effektivare störspektrum

Om man modulerar svepsignalen till VCO ännu en gång så kan man hindra att svepfrekvensen blir den samma mellan varje svep. Frekvenskomponenterna i störsignalen kommer då att hela tiden hamna på olika frekvenser. Detta leder till mellanrummet mellan frekvenskomponenterna i störsignalens spektrum fylls ut, vilket i sin tur gör att risken minskar att radarmottagaren hamnar mellan störsändarens frekvenskomponenter. Radarn förhindras därmed även att skilja ut störpulsen från målekona.

Följande två huvudsakliga metoder används

- sågtand/brus -modulering
- sågtand/sågtand-modulering.

En metod att förhindra att störsändarens sveptid är konstant är att tillsätta brus till svepspänningen (bild 4:115). Metoden brukar benämnas sågtand/brus-modulering.

Genom att modulera svepspänningen med brus kommer spektrats frekvenskomponenter att svänga fram och tillbaka vilket får till följd att utrymmet mellan "fingrarna" fylls ut.

Resultatet av sågtandsbrus blir att störsignalen sveps över frekvensbandet och är lika effektiv mot alla frekvenser. Sågtand/brus-modulering brukar betecknas BS-modulering.

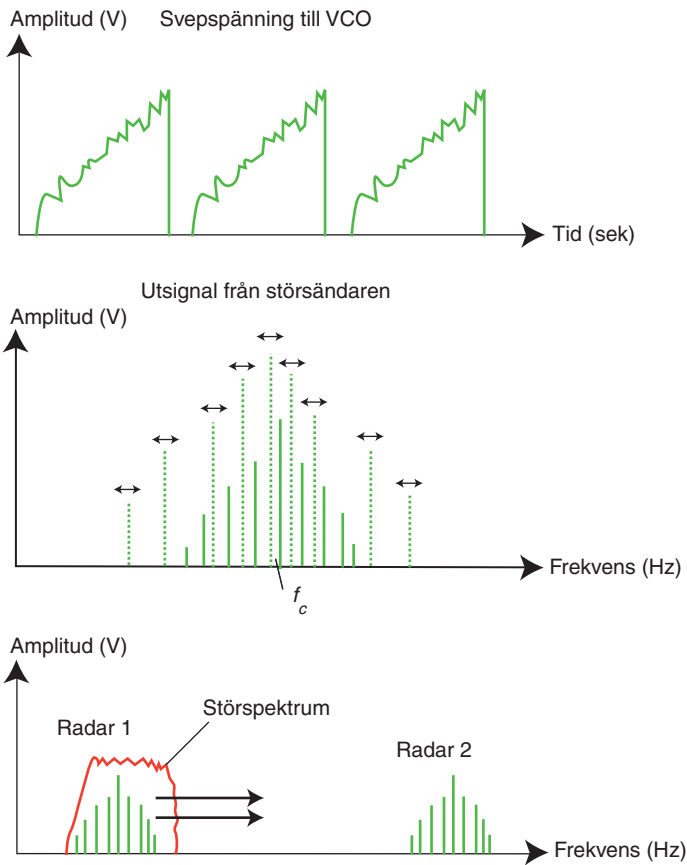


Bild 4:115. Sågtand/brus-modulering.

Vid sågtand/sågtand-modulering används istället två sågtandspänningar med olika frekvenser.

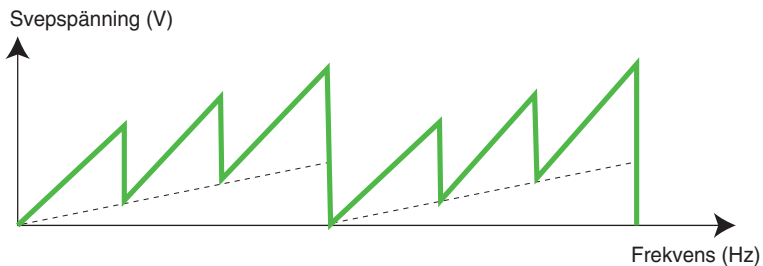


Bild 4:116. Sågtand/sågtand-modulering. Ett effektivare störspektrum erhålls om svepspänningen skapas av två sågtandspänningar med olika frekvenser.

Genom att addera två sågtandspänningar till varandra kommer störsändarens sveptid att variera mellan varje svep. Detta innebär också att mellan-

4. Telekrigföring

rummet mellan störspektrats ”fingrar” kommer att fylls med nya frekvenskomponenter. Störformen betecknas som SS-modulering.

Att samtidigt störa flera radarstationer smalbandigt

Som nämnts är det betydligt effektivare att störa en radarstation smalbandigt än bredbandigt.

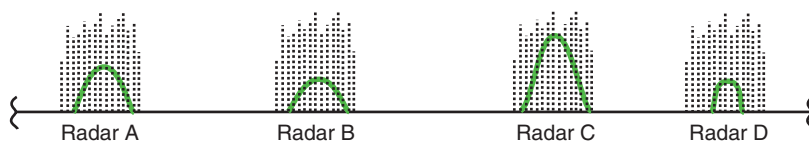


Bild 4:117. Smalbandig störning av flera frekvenser samtidigt.

Hur ska en störsändare konstrueras för att kunna störa flera radarstationer smalbandigt på samma gång?

Antag att ett störsystem vill kunna störa fyra radarstationer som sänder på fyra olika frekvenser.

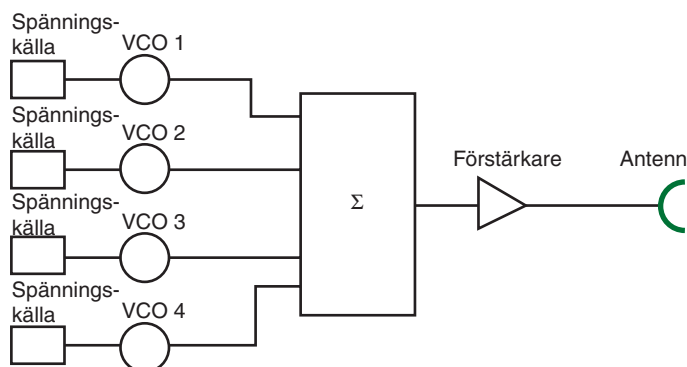
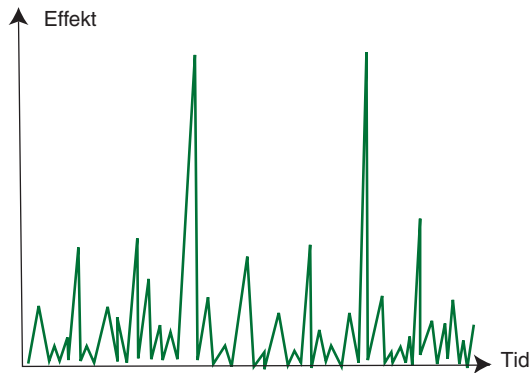


Bild 4:118. Flera störsignaler.

Störsändaren (bild 4:118) består av en mottagare och fyra störgeneratorer (VCO).

Mottagaren analyserar vilka frekvenser radarstationerna nyttjar. Störgeneratorerna får av systemets styrdator, order att skapa varsin smalbandig frekvensmodulerad signal. Störgeneratorernas signaler leds sedan in i den gemensamma slutförstärkaren. Ut från slutförstärkaren fås nu en signal som innehåller frekvenser från alla fyra frekvensgeneratorerna. Detta leder till att alla fyra radarstationerna blir störda. Det är dock nödvändigt att radarstationerna inte skiljer sig alltför mycket i frekvens eftersom varje motmedelssystem har en maximal bandbredd. Denna bestäms ofta främst av slutförstärkarens bandbredd.

Bild 4:119. Exempel på hur effekten varierar då flera olika frekvenser summeras i slutförstärkaren.



Nackdelen med metoden är att när de fyra FM-modulerade signalerna adderas samman i slutförstärkaren så kommer de ibland att samverka, varvid en kraftig signal uppstår. Ibland motverkar de varandra varvid slutförstärkaren lämnar en mindre signal. Resultatet blir att slutförstärkaren lämnar en frekvens- och amplitudmodulerad utsignal. Som tidigare konstaterats innebär en amplitudmodulation ett dåligt nyttjande av slutförstärkarens tillgängliga effekt.

Tidsmultiplexa störsignalerna

Ett bättre nyttjande av den tillgängliga effekten fås om störgeneratorerna en i taget får tillgång till slutförstärkaren. Att tidsmässigt dela på en resurs kallas tidsmultiplex.

Först får VCO 1 tillgång till slutförstärkaren och frekvenssveper signalen t ex mellan 5,4 och 5,45 GHz under några mikrosekunder. Därefter stör VCO 2 mellan t ex 5,6 och 5,67 GHz under ytterligare några mikrosekunder osv. Genom det här förfarandet kan slutförstärkaren lämna nästan 100% av sin effekt mot de önskade frekvenserna. Det uppstår dock viss störning mot oönskade frekvenser i samband med omkopplingen mellan två störgeneratorer. Dessa oönskade frekvenser kallas *spuriöser*.

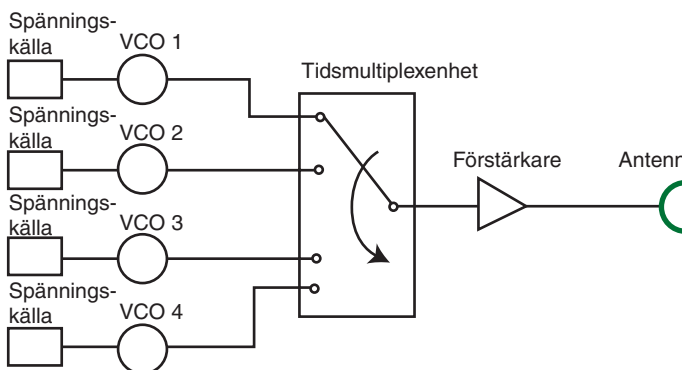


Bild 4:120. Flera störsignaler – tidsmultiplex.

Långsamt amplitudmodulerat brus kan försvåra kryssspejling

I vissa fall kan det vara önskvärt att variera uteffekten från en frekvens-svept störsändare. Amplitudmodulering gör det nämligen svårare för radarn att bestämma riktningen (störbäringen) till störsändaren. Modulationsmetoden kan i detta fall kallas AM+FM-modulering. Dessa störformer befinner sig i gränsområdet mellan maskerande- och vilseledande störning.

Ett exempel på en kombination av AM+FM-modulerad brussignal kallas invers lobmodulation (eng. invers gain). Syftet med invers lobmodulation är att alstra en maskerande störform som inte kommer ge någon entydig störbäring på indikatorn. Personalen i radarstationen kan därför inte avgöra från vilken riktning störningen kommer.

Störsändarens mottagare mäter kontinuerligt exakt med hur stor effekt som radarn belyser flygplanet med.

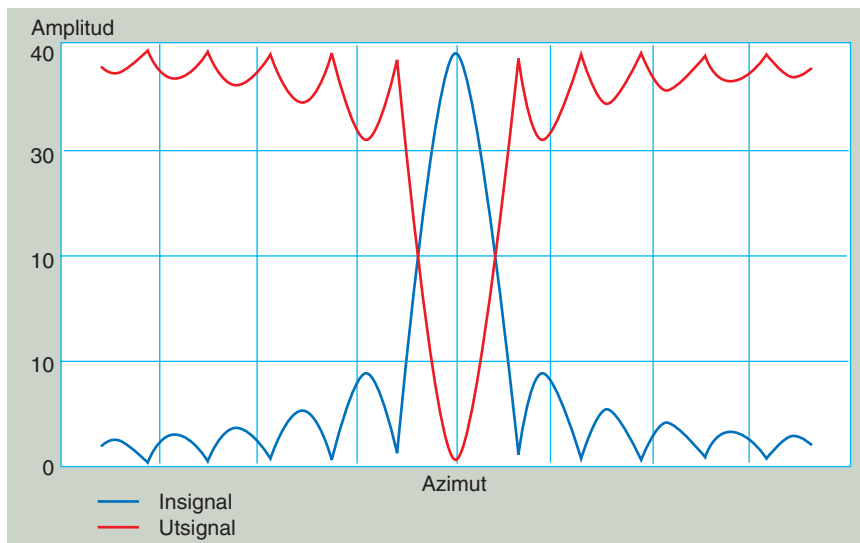


Bild 4:121. Invers lobmodulation. Den blå signalen är den mottagna signalen som moduleras av antenndiagrammet. Den röda är störsignalen vilken kommer att vara insignalens invers.

När störaren belyses av de svagare sidoloberna ökar den störeffekten något 1000-tals gånger, när huvudloben belyser störsändaren minskar den störeffekten. Dvs då radarns antennförstärkning är stor behövs bara en liten störsignal och vice versa. Radarstationen kommer därför alltid erhålla en lika stark störsignal, oberoende i vilket riktning antennen pekar. Detta resulterar i att stationen inte kommer att kunna presentera någon störbäring, eftersom signalen är lika stark i alla riktningar. Den här metod fungerar inte mot monopulsradar.

Om stegdämpning används kommer detta inte att hjälpa eftersom alla stör-signaler är lika starka oberoende vilken riktning antennen har. En stör-sändare som arbetar med invers lobmodulation klarar oftast bara av att störa en radarstation åt gången. En sidogrupeerad radarstation kommer troligtvis kunna ange störbäringen till målet eller t o m kunna se målet.

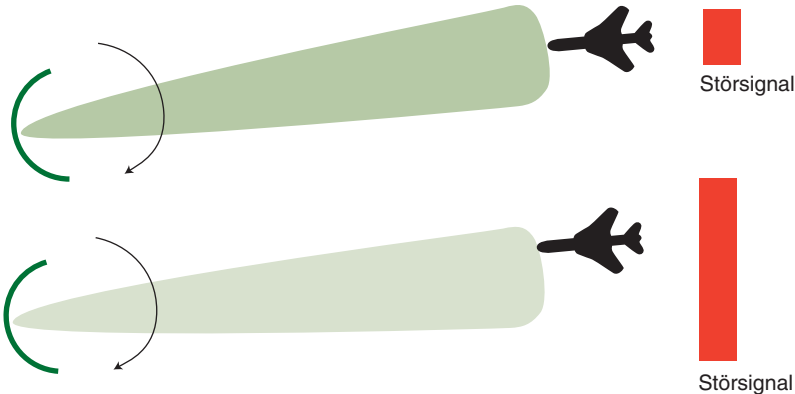


Bild 4:122. Störbäringsfel. Genom att ge en kraftigare störsignal då "kanten" på loben når flygplanet, kan radarn fås att ge fel störbäringsriktning,

Ett enklare sätt att försvåra krysspejling än invers lobmodulation är att variera brussignalens uteffekt i form av "amplitudhopp". Frekvensen på amplitudhoppet bör anpassas till radarns lobvinkel och antenntrotationstid.

Radarmottagaren får normalt den starkaste störsignalen då antennlobens mittpunkt pekar rakt mot bruskällan. Orsaken är att antennens sk antennförstärkning (G) förstärker störsignalen mest i denna riktning.

Om störsändaren tillfälligtvis ökar signalens amplitud kraftigt, kan den starkaste signalen komma in via någon av antennens sidolober eller från ytterkanten av huvudloben. Resultatet blir att radarn kommer att placera störbäringen i en felaktig riktning.

Exempel 4:9

Antag att en radarantenns antennförstärkning är 1000 ggr mitt i antennloben. 2° från mittlinjen är antennförstärkningen 20 ggr. Då "kanten på antennloben" når störsändaren så störsänder den med en uteffekt på 400 W. När mitten på loben når antennen sänder den med 4 W. Vilken av riktningarna kommer radarstationen anse att störsändaren befinner sig i?

Lösning

Alt 1. Mitt i loben $P = 4\text{W}$, $G = 1000$

$$P \cdot G = 4 \cdot 1000 = 4000\text{W}$$

Alt 2. Vid "kanten" på loben $P = 400W$, $G = 20$
 $P \cdot G = 400 \cdot 20 = 800W$

Alt 2 > Alt 1

Svar

Radarn kommer att anse att riktningen till störsändaren befinner sig 2° från den rätta riktningen eftersom den mottagna signalen kommer att vara starkast i denna riktning.

Genom att på detta sätt variera uteffekten kommer störbäringen att pendla fram och tillbaka. Metoden kan troligen fungera samtidigt mot flera likartade radarstationer. Ju bättre sidolobsundertryckning och smalare huvudlob radarstationerna har desto svårare blir det att lyckas med metoden.

Det bör noteras att denna form av amplitudmodulerad brussignal kommer få störbäringen att variera kring någon form av medelvärde (hur mycket kommer att vara ett statistiskt problem). Det kommer därför vara omöjligt att krysspejla helt "exakt".

Smart brus

Ibland nämns begreppet smart brus (ett exempel på power management). Med smart brus avses en störsignal som är signalanpassad till radarstationens stationens frekvens och/eller pulskod. Smart brus kräver endast låg uteffekt. Täckpulsstörning är ett exempel på smart brus. Andra exempel är då en repeterstörare sänder tillbaka kant till kant liggande ekokopior med omkastad pulskod. Detta kommer i radarn att uppfattas som ett smalbandigt brus.

Vilseledande störsändning

Repeaterstörsändare

Vilseledande störsändning utgörs ofta av repeterstörsändning. Ordet repeterstörning härstammar från repetera dvs upprepa.

En repetersändare i sin enklaste form består av en förförstärkare, minne, blandare, slutförstärkare samt någon form av styrdator. En ändå enklare typ av störsändare är den s k ekoförstoraren vilken endast består av mottagarantenn, förstärkare och sändarantenn. Skillnaden mellan repeterstöraren och ekoförstoraren är alltså att ekoförstoraren saknar minne och förmåga att tillföra pulsen någon falsk information. Ekoförstoraren skickar alltså bara ut *en* förstärkt kopia av varje mottagen puls. Med en mindre förändring kan signalen förlängas för att skapa täckpulsstörning (se föregående avsnitt).

Den enklaste störformen för en repeterstörsändare är att skapa falska ekon i avstånd. Repeterstörsändaren tar då emot radarstationens puls och lagrar den i ett minne. Därefter spelar störsändaren upp den inspelade pulsen upprepade gånger vilket får till följd att ett antal falska pulser skapas. Repeterstörsändaren kan eventuellt före den skickar tillbaka pulsen påföra

den en falsk information t ex en dopplerfrekvens vilket kan ge radarn en felaktig uppfattning om målets hastighet.

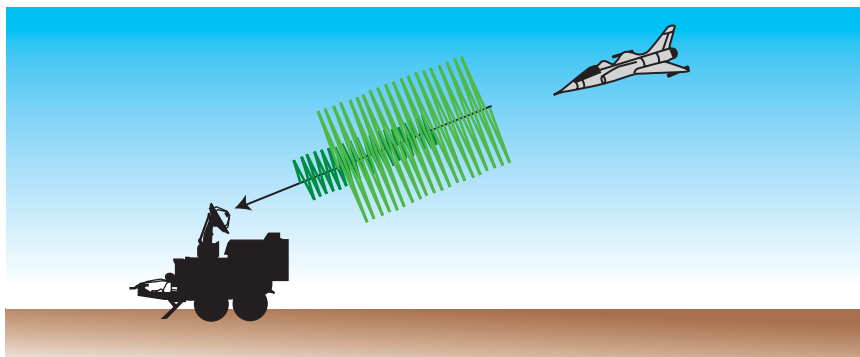


Bild 4:123. Repeterstörning. Skrovekot når alltid radarn först, men tidsskillnaden mellan skrovekot och det falska ekot kan göras mycket kort.

En puls som passerat en repeterstörare är alltid något fördröjd jämfört med radarekot (det s k skrovekot). Om så önskas kan, med dagens teknik, fördröjningen göras mycket kort (ca 10 meter).

Repeterstörning kräver lite uteffekt av en störsändare. Det beror främst på två orsaker.

- Störningen sker automatiskt på rätt frekvens, med rätt bandbredd och i förekommande fall med rätt pulskod eftersom störsändaren nyttjar radarstationens ”egna” utsändande pulser som kopieras.
- Genom att störningen är pulsad blir medeleffekten låg även om själva pulsen har hög effekt. Hur stor medeleffekten blir beror bl a på hur många pulser störaren vill skicka ut varje gång den belyses. Jämför t ex PS-90 som har 12 kW pulseffekt men bara ca 200 W i medeleffekt eftersom tiden mellan pulserna är lång.

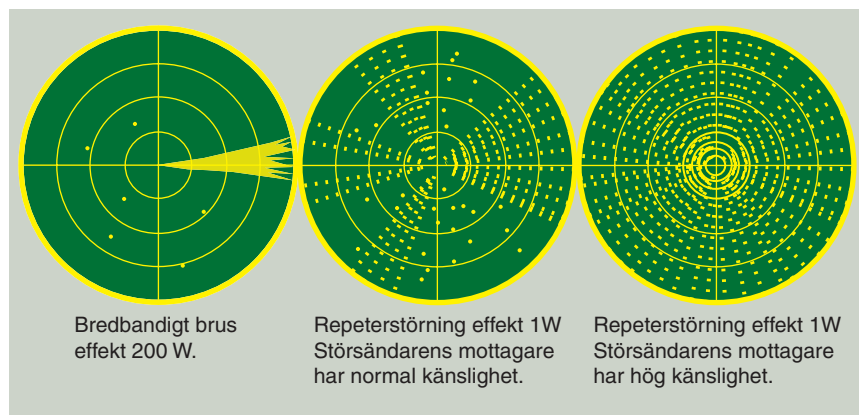


Bild 4:124. PPI-bilder vid olika typer av störning.

Exempel 4:10

En radarstation har mottagarbandbredden 1 MHz.

Antag att man med en brusstörare tvingas att störa bredbandigt, med bandbredden 500 MHz och det krävs 1000 W för att uppnå ett visst resultat dvs 2 W/MHz.

Med hjälp av en repeterstörare kopieras radarpulsens bärvågsfrekvens och bandbredd (1 MHz). Repeterstöraren kan nu uppnå samma resultat med endast 2 W uteffekt, genom att störningen sker mot precis rätt frekvens.

Den stora minskningen av energibehovet vid användning av repeterstörarsändare leder till mycket stora skillnader i kostnader för slutsteget i störsändaren. Om det är ett flygburet system minskas behovet av kraft och kylning radikalt. Om kylmaskinen kan tas bort klarar sig systemet med mindre effekt från flygplanet. Dessutom minskar vikten och volymen. Störsystemet kan då placeras ombord på flygplanet istället för i en kapsel, eller kan placeras i en UAV.

Analogt radiofrekvensminne – FML

De första minnena bestod av förstärkare med en återkopplad kabelslinga, genom vilken radarpulsen fick fortplanta sig. Ett sådant minne kallades för cirkulerande minne (Frequency Memory Loop – FML). Ju längre kabelslinga desto längre fördröjning. Efter varje cirkulation tas beslut om pulsen ska sändas ut eller fortsätta att cirkulera för att sändas ut vid ett senare tillfälle. Det går också att sända ut en puls efter varje cirkulation så att ett pulståg skapas.

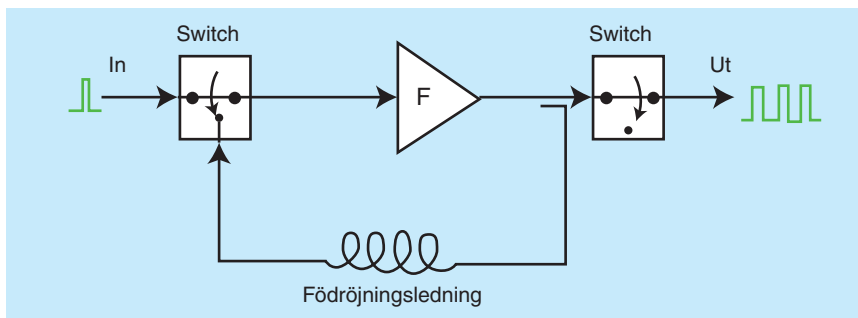


Bild 4:125. Cirkulerande minne (FML). Äldre typ av frekvensminne.

Nackdelen med dessa minnen är att de blir volymmässigt stora, då det för varje mikrosekunds fördröjning går åt 200-250 meter kabel. Dessutom fås en ökad brustillväxt och distorsion av pulsen för varje cirkulation. Detta är ett stort problem vid störning mot koherenta radarstationer som t ex UndE-23.

Digitalt radiofrekvent minne – DRFM

Moderna system innehåller digitala radiofrekventa minnen (DRFM) vilka i stort sett kan lagra en exakt kopia av en signal under obegränsad tid, utan att signalen förvanskas.

Utvecklingen går mot fler och fler koherenta radarstationer (t ex pulskompressionsradar som UndE-23, PS-90 och PS-91). För att kunna generera falska ekon mot denna typ av radar krävs DRFM, eftersom dessa kan kopiera signalens fasläge och pulskod. Störsignalerna ser ut och behandlas i radarn som riktiga ekon.

I början av 1980-talet startade utvecklingen av DRFM. Ett DRFM nyttjar digital samplingsteknik (jämför sampling inom musiken) och kan under obegränsad tid lagra en mycket bra kopia av den verkliga pulsen. Kopian kan sedan användas för att skapa ett stort antal falska ekon. DRFM var inledningsvis mycket dyra, men genom teknikutvecklingen på det digitala området har priserna kunnat minskas. Det är ingen överdrift att påstå att det ökande nyttjandet av DRFM i störsändare och signalspaningsutrustningar är ett av de främsta hoten mot radarstationerna.

Ett DRFM kan spela in och lagra en radarpuls godtyckligt länge utan att pulsen förändras.



Bild 4:126. Ett DRFM lagrar radarpulsen digitalt före återutsändning.

Ett DRFM består av följande huvuddelar

- S/H-krets (sämpel- and holdkrets)
- A/D (analog/digital) omvandlare
- DRFM-minne (lagring)
- D/A (digital/analog) omvandling.

Dessutom brukar systemet innehålla två blandare och en oscillator samt några filter.

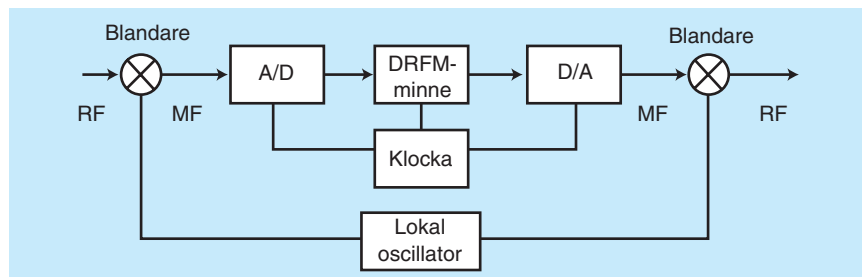


Bild 4:127. Princip för hur DRFM lagrar och återutsänder en frekvens.

Radarsignalens frekvens (RF) tas emot och blandas ner till en lägre mellanfrekvens (MF) med hjälp av en lokaloscillatorsignal. Signalen A/D omvandlas och lagras sedan i ett RAM-minne. Då signalen ska sändas ut omvandlas den till en analog signal via en D/A-omvandlare. Signalen (MF) får sedan passera en blandare där den transponeras till rätt frekvens (RF). Slutligen skickas signalen ut via någon form av förstärkare.

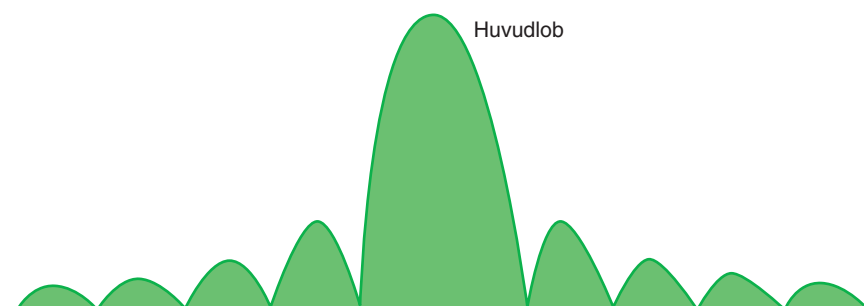


Bild 4:128. Störsändarmottagarens förmåga att detektera radarns huvud- och sidolober är avgörande för förmågan att generera störsignaler.

En intressant egenskap hos störsändare med DRFM är att det inte är störsändarens uteffekt utan dess mottagarkänslighet som avgör hur bra systemet är. Då störaren belyses av radarns starka huvudlob har den ofta inga problem att "spela" in den mottagna pulsen. Om repeterstöraren befinner sig långt borta och/eller radarn har små sidolober kan signaleffekten bli för låg för att störsändarens mottagare ska kunna uppfatta radarpulsen. Den utsända falska pulsens effekt räcker normalt sätt alltid till eftersom radarn letar just efter denna typ av signal.

Med tillräcklig känslighet hos mottagaren kan en radar detekteras hela varvet runt och en mängd falsk ekon skapas i alla riktningar. Mängden falska mål kan bli så stort att radarn inte hinner med att databehandla och plotta alla falska mål. Operatören får dessutom problem att hitta och följa nya mål i denna enorma mängd falska plottar.

Bandbredd

Med systembandbredd avses den bandbredd som det är möjligt för hela störsystemet att arbeta inom. T ex är det vanligt att störsystem för egen-skydd har en systembandbredd på 2-18 GHz. Arbetsbandbredden kan vara ett radarband t ex X-bandet, den bestäms om det är kvalificerat i vissa fall av operatören före uppdraget. Ett system kan ha flera parallella arbetsbandbredder .

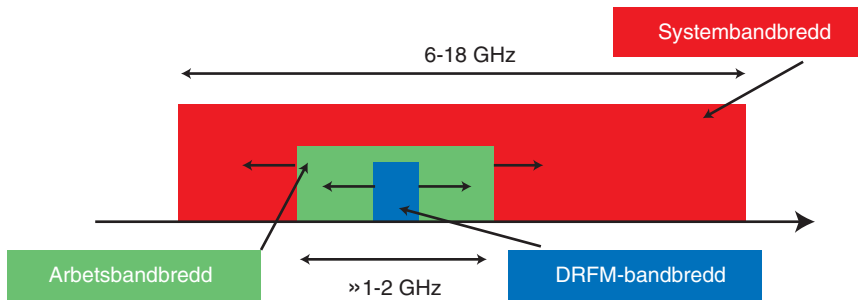


Bild 4:129. Bandbreddsbegrepp.

Den momentana bandbredden är den bandbredd som DRFM:et lyssnar/störsänder mot. Den momentana bandbredden brukar ligga mellan 50-500 MHz. En nackdel med en mycket stor momentan bandbredd är att DRFM lagrar och repeterar både starka och svaga signaler inom bandet utan urskiljning. Om ett mindre flyttbart bandbreddsfönster används finns möjligheten att flytta det aktuella bandbreddsfönstret. Detta kan vara ett sätt att undvika signaler som inte ska störas.

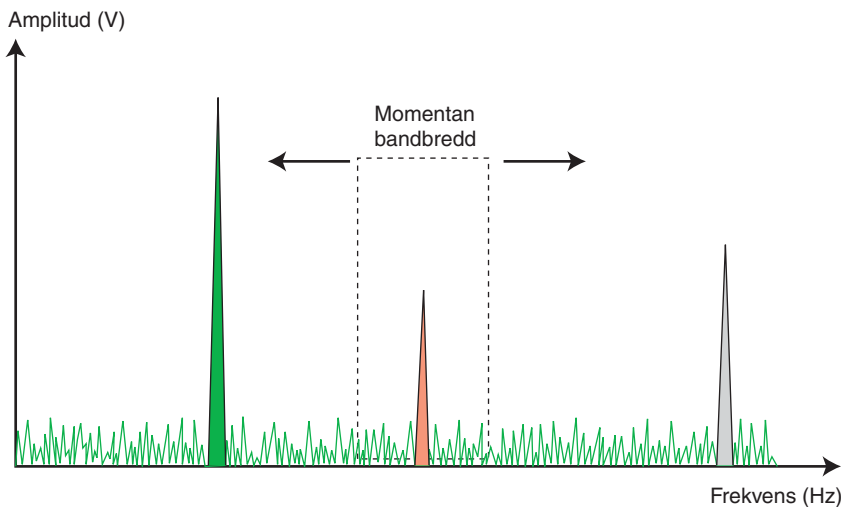


Bild 4:130. Ett mindre flyttbart bandbreddsfönster. Detta underlättar när det finns starka signaler som inte ska störas.

Utvecklingen av DRFM går mot att de får större och större momentan bandbredd. Troligtvis kommer utvecklingen att stagnera kring 200-500 MHz dvs DRFM kan lagra alla typer av signaler inom ett 200-500 MHz brett frekvensområde. Om det krävs en större momentan bandbredd, kan flera parallellkopplade DRFM användas.

Annat nyttjande av DRFM

Utveckling pågår av skyst radar, vilken ska vara mycket svår att upptäcka med hjälp av signalspaningsutrustning. Radarstationen sänder ut en lång radarpuls med lågeffekt.

Pulsen kodas med en slumpmässig faskod (Pseudorandom Code). Ett DRFM i radarn nyttjas för att exakt minnas hur den utsända pulsen såg ut. När ekot kommer tillbaka kan radarstationen med hjälp av innehållet i DRFM genomföra pulskompression och på så vis förstärka de mottagna ekon och förbättra avståndupplösningen.

Fördelen med skyst radar är att motståndarens signalspaningsutrustning kommer att få svårt att skilja radarpulsen från vanligt brus. Detta innebär att han inte märker att han är belyst av en radar och följaktligen inte vidtar några motåtgärder.

Allt bör inte repeteras

En störutrustning får inte repetera alla radarsignaler utan bara de som utgör ett hot. Varje typ av radar måste dessutom påverkas med olika former av falsk information för att få optimal störverkan. Mot en spaningsradar räcker det kanske med att skicka ut kopior av den mottagna pulsen medan mot en eldledningsradar så måste pulsen kanske påföras falsk information. Att korrekt analysera en stor mängd olika signaler ställer stora krav på mottagaren och hotbiblioteket.

Svårigheterna att störsända effektivt ökar därför i betydande grad om det finns flera radarstationer i samma område.

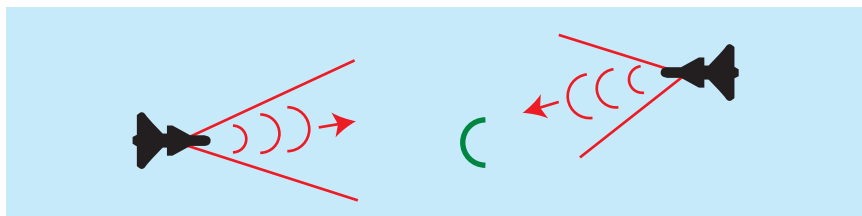


Bild 4:131. Störsändarna kan riskera att störa varandra.

Ett annat problem är om det finns flera störsändare i ett flygförband hur hindrar man då att repeterpulserna från en störsändare uppfattas som pulser från en radar (de är exakta kopior) av de andra störsändarna. Risk finns att störsändarna stör varandra. Ett sätt att undvika detta är att ha en form av tröskelnivå i störsändarens mottagare. En puls från en annan störsändare som inte är riktad rakt mot dess egen antenn (dvs antenn mot antenn) kommer att vara för svag för att störsändaren ska välja att förstärka den. Nackdelen med denna metod är att störsändarna då också får problem med att skapa falska ekon i radarns sidolöber.

Ovanstående exempel visar att det kan vara stor skillnad på vilken störverkan som kan uppnås vid övningar mellan en störsändare och en radar jämfört med verkliga taktiska scenarior med många radarstationer och flygplan.

Falska ekon

Om störsändaren spelar in den mottagna pulsen och spelar upp den ett antal gånger skapas falska ekon. Detta är den enklaste formen av repeterstörning eftersom ingen falsk information behöver tillföras signalen.

Falska ekon ger troligtvis inte någon störbäringsindikering i radarstationen. Radarn gör en mätning i varje riktning för att fastställa en störbärning. Denna mätning sker dock på ett bestämt avstånd i slutet på varje svep. Om det inte skulle finnas ett falskt eko just på denna position (under ett par antennvarv) så uppstår ingen störbärning. Operatören får istället uppskatta riktningen med hjälp av läget på de falska målen.

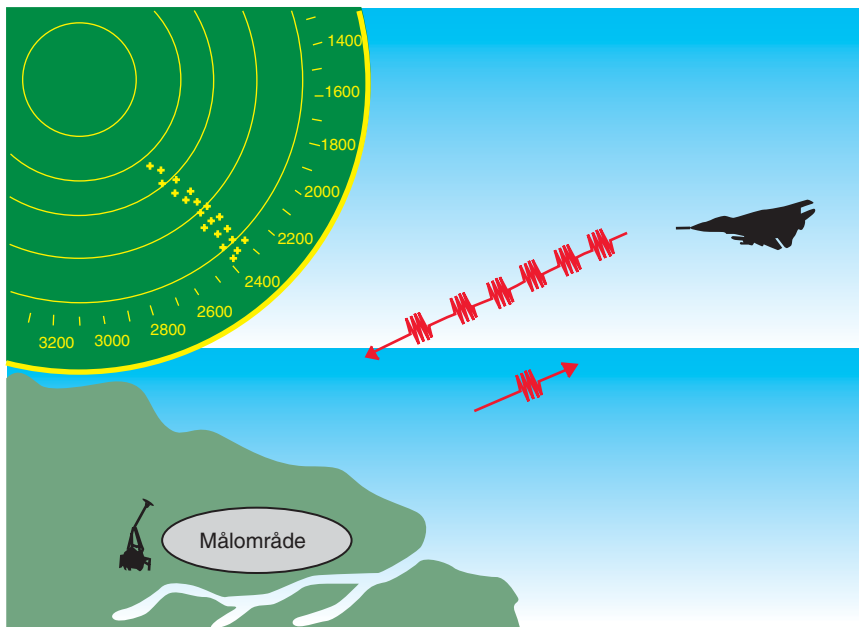


Bild 4:132. Falska ekon.

Mot en konventionell spaningsradar skulle en DRFM störsändare i princip kunna lägga ett falskt eko per avståndsfälla (halva radarns pulslängd). Men detta kräver högre medeleffekt och arbetsfaktor hos störsändaren. Av radarn skulle detta uppfattas som en kontinuerlig (smalbandig) brus signal (s k smart brus). Ur störsändarens synpunkt är det oftast bättre att ha ett tidsmellanrum mellan pulserna. Störsignalerna uppfattas då som verkliga

4. Telekrigföring

ekon varvid radarns databehandling snabbt kan bli överbelastad, dessutom sjunker kravet på störsändarens medeleffekt och arbetsfaktor.

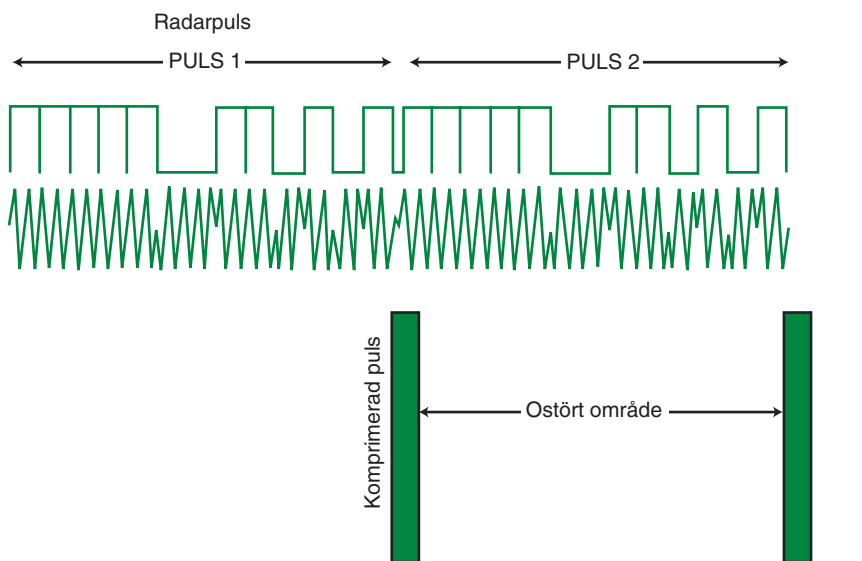


Bild 4:133. Störsändning mot pulskompressionsradar. (Anders Eneroth, FOI)

En radar som arbetar med pulskompression sänder ut långa kodade pulser. I radarmottagaren komprimeras sedan pulserna varvid amplituden ökar samtidigt som pulslängden minskar. Längden på avståndsfällorna kommer i en binärfaskodad radar att bestämmas av subpulslängden. För att störsändaren ska skapa en störsignal med maximal amplitud i radarn så ska den kopiera och sända ut radarns hela puls (bild 4:134). När den första kopia sänts klart kan den börja sända ut nästa kopia. I radarns pulskompressionsfilter trycks pulserna ihop till längden av en subpuls. Mellan de komprimerade pulserna kommer det då att uppstå ostörda områden. I de ostörda områdena kan radaroperatörerna följa verkliga mål.

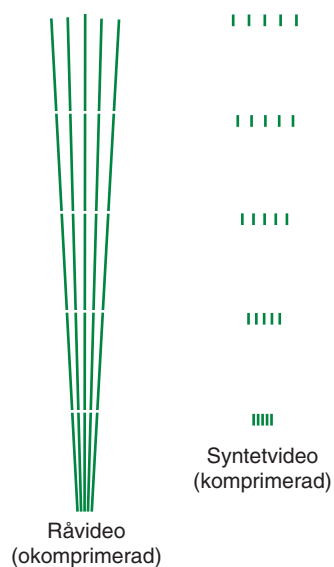


Bild 4: 134. Störpulser före och efter pulskomprimering. På syntetvideon uppstår ostörda områden mellan de komprimerande pulserna.

Genom bara kopiera halva radarns puls kan störsändaren placera ekona dubbelt så tätt. Nackdelen är att ekoamplituden halveras. I bäringsled bestäms hur tätt ekona placeras av hur många pulser radarn normalt sett behöver integrera för att säga att där finns ett mål. Ett grovt mått är ca 1/2-1 antennlobbredd mellan ekona. Genom att gradvis förskjuta ekona i avstånds- och bäringsled kan de ostörda områdena på PPI göras mindre och målföljningen försvåras.

Om det finns en stor mängd ekon kommer operatören att få problem att avgöra hur många verkliga flygplan det finns inne i störningen. Om operatören väljer STAGGERED PRF så kommer störsändaren få svårt att skapa falska ekon framför sin egen position. Operatören kan då målfölja på främsta flygplanet. Dock är det fortfarande svårt att veta hur många fler flygplan som döljs i störningen.

Om tillräckligt många falska ekon kan skapas, förutsatt att störsignalerna kringgår radarns störskyddskriterier, kommer radarns signal- och databehandling blockeras i den störda riktningen. Detta kan leda till att i den riktning som störaren befinner sig i så finns det inga ekon alls på indikatorn.

Repeterstörning syns inte i en passiv radar

Antag att en radar är utsatt för repeterstörning. En bit därifrån finns en passivt spanande radar. Den passiva radarn kommer inte att upptäcka repeterstörningen beroende på att störsignalerna är mycket smalbandiga med bara den sändande radarns frekvens. Om inte den passiva radarn har exakt samma frekvens kommer den inte att uppfatta några ekon.

Observera att även om två radarstationer väljer t ex frekvens F2 så behöver inte detta innebära att de sänder på samma frekvens eftersom frekvensoscillatorerna i radarna är individuella.

Skulle störningen mot all förmodan ske mot den radartysta stationens frekvens så skulle det teoretisk kunna uppstå ett helt slumpvis mönster av störpulser. Det beror på att störpulserna inte är synkroniserade med varandra när stationen ritar sina svep på indikatorn. I praktiken skulle dessa störpulser troligtvis inte presenteras eftersom de skulle undertryckas av signalbehandlings integrator.

Konstant PRF kan medge falska ekon framför störsändaren

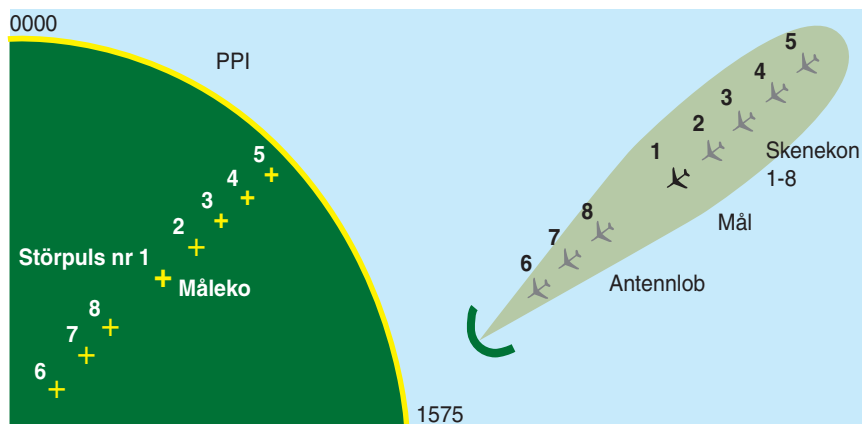


Bild 4:135. Falska ekon. Konstant PRF.

Antag att en radar använder konstant PRF samt använder fixfrekvens och inte ändrar sin pulskod.

Då ett flygplan utrustat med en repeterstörare nås av en radarpuls uppstår först ett skroveko (då radarpulsen studsar mot flygplanet). Därefter börjar störutrustningen att skicka ut en begränsad mängd falska ekon. Oavsett störpulserna, kommer det första ekot som når radarn att vara det riktiga ekot från flygplansskrovet. Störaren finns alltså längst fram bland de falska ekona.

Antag att repeterstöraren fortsätter att skicka ut falska ekon och radarn skickar en ny sändpuls på samma frekvens. Nu kommer en ”gammal” störpuls, som når radarn strax efter det att sändpulsen sänts iväg, att presenteras som ett mål på kort avstånd. Nästa störpuls blir ett mål på lite längre avstånd osv. Jämför med andragångsekon. När flygplanet nås av den nya pulsen, uppstår som tidigare ett skroveko, men nu finns det redan en mängd falska ekon innanför dess position. Störsändaren kan nu på nytt spela in den nya pulsen och förloppet kan upprepas.

Viktigt att notera är att störsändaren måste skapa de falska ekona på ungefär samma avstånd (i samma avståndsfälla) från gång till gång. Om ekona hamnar på olika avstånd efter varje svep kommer radarns signalbehandling att plocka bort dem. På samma sätt som radarn kan undertrycka andragångsekon.

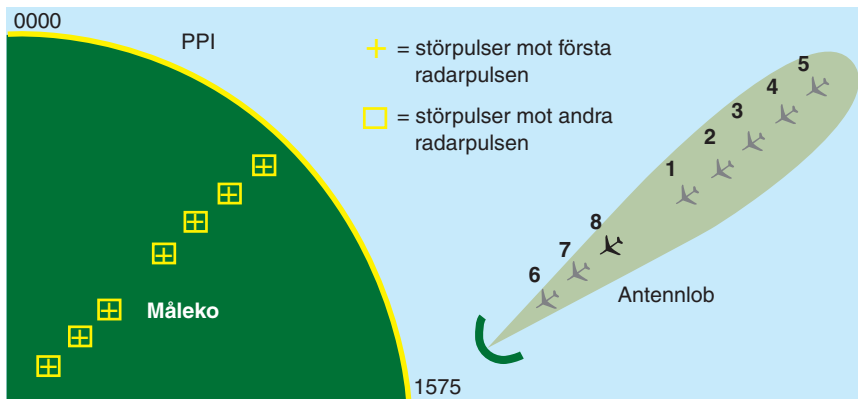


Bild 4:136. Konstant PRF.

Staggered PRF förhindrar falska mål framför störsändarens position

Radarn byter till staggered PRF, dvs ändrar tiden mellan varje sändpuls.

Precis som tidigare kan repeterstörsändaren skapa falska ekon bakom sig. När störsändaren når av en puls väntar den t ex 10 ms före den skickar ut första störsignalen. Därefter ytterligare 10 ms osv på så vis skapas falska ekon på samma avstånd mellan varje sändpuls. Men det här fungerar bara fram till "avståndsområdets slut". Anledningen är att då staggered PRF används så varierar tiden mellan varje sändpuls hos radarn.

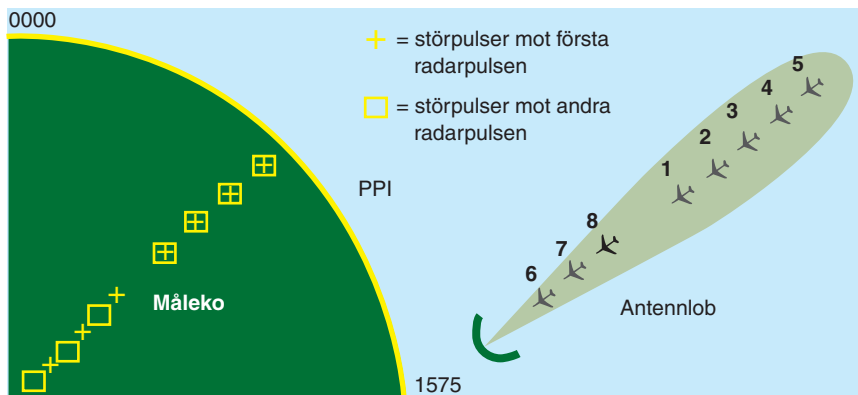


Bild 4:137. Staggered PRF. Tiden varierar mellan varje puls. Störsignalerna framför störsändaren hamnar inte på samma position mellan varje puls.

För att lyckas generera falska ekon som hela tiden hamnar på samma avstånd framför sin egen position, måste störsändaren veta när nästa radar-puls sänds, så att en störsignal t ex alltid når radarn 10 ms efter radarns sändpuls, nästa störsignal efter ytterligare en viss tid osv.

Det vore ett olösbart problem för störutrustningen att veta när radarn ska sända, om radarn slumpmässigt byter avståndet (dvs ändrar tiden) mellan sändpulserna. Men tyvärr har radarstationerna oftast ett begränsat antal staggersintervall att välja på. Äldre radarstationer kanske har fyra intervall att välja på, vilka upprepas i en bestämd ordning. Anledningen till att staggeringen inte är slumpvis är att detta skulle ge problem med dopplerfiltren som ska ta bort markekon. Om tiden mellan sändpulserna hos radarn var 80, 110, 90, 120, 80, 110, 90, 120, 80...ms, Så skulle det inte krävas stor intelligens hos en störsändare för att analysera mönstret för sändningstidpunkten. Om störutrustningen vet när stationen kommer att sända, kan den justera sina sändpulser så att de alltid hamnar på ungefär samma avstånd hos radarn.

Nyare stationer brukar ha betydligt komplexare staggeringsmönster än de äldre radarstationerna. De byter dessutom frekvens mer eller mindre slumpmässigt efter en viss tid.

Om det finns flera radarstationer som sänder torde det vara mycket svårt för en störsändare att hinna analysera staggringscyklerna och generera falska ekon framför sin egen position.

För att få skydd mot falska ekon innanför störarens position gäller det för radarn att så slumpvis som möjligt förändra olika parametrar mellan sändpulserna t ex

- slumpvisa eller åtminstone ett stort antal olika staggeringsintervall
- byta pulskod (UndE-23 har denna möjlighet)
- byta frekvens mellan varje puls (PS-91 och UndE-23).

Man bör här vara medveten om att ju fler parametrar som förändras i radarn desto sämre blir dess markekoundertryckning.

Störformer mot eldledningsradar

En eldledningsradar skiljer sig normalt sett från en spaningsradar genom att den hela tiden ska peka med antennloben på målet. Radarn ska dessutom kontinuerligt bestämma målets avstånd eller hastighet. Om radarn inte kan mäta avståndet eller hastigheten hos målet, t ex p g a stark brusstörning, så kan vapensystemet i vissa fall ändå komma till verkan om antennen fortfarande kan peka ut riktningen. Vid brusföljning följer antennen den starkaste signalkällan (störaren) systemet blir då en enkel SSARB. Det mest optimala ur skyddssynpunkt är därför att försöka få eldledningsradarn att mista förmågan att peka ut riktningen till målet.

Som vi snart ska se så kan man lite tillspetsat säga att även avstånds- och hastighetsavhakning har till uppgift att få radarn att tappa målet i vinkelled. Detta kan ske genom att få radarn att låsa över på t ex sken-, mark- eller remsekon så att den tappar sin förmåga till vinkelföljning.

Avståndsavhakning (Range gate walk off)

Avståndsavhakning används mot eldledningsradar till kanonluftvärnssystem t ex på fartyg, sjömålsrobotar m m för att få systemen att prediktera en felaktig framförhållning eller låsa över på något felaktigt eko (t ex ett remsmoln).

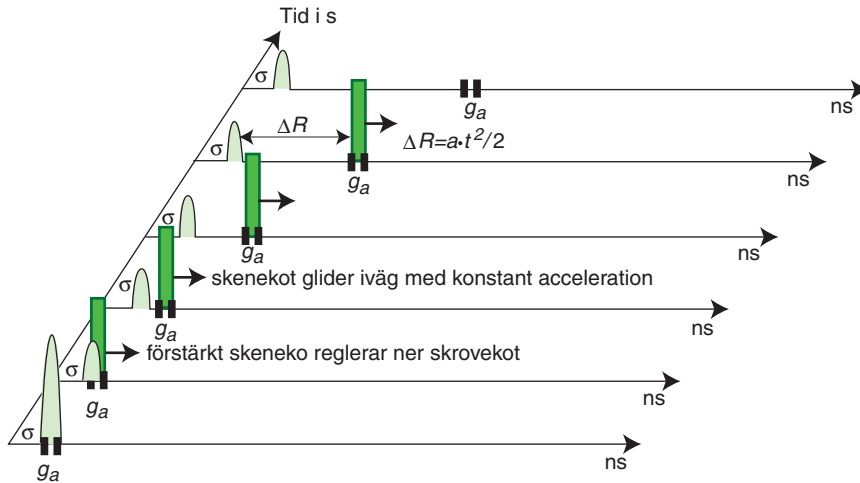


Bild 4:138. Princip avståndshakning (källa Per Hyberg).

g_a = avståndsskrid och σ = skroveko ΔR = avståndsskillnad.

Avståndsavhakning sker i tre steg.

1. Minska förstärkningen.

Störsändarens första uppgift blir att dölja det verkliga ekot för radarn. När radarns puls når flygplanet kommer störsändaren att skapa en stark puls som med så lite fördröjning som möjligt sänds tillbaka till radarn. Radarns AKR-kretsar kommer att uppleva det som den fick ett ovanligt bra ekosvar. AKR (Automatisk KänslighetsReglering) påverkar mottagarens förstärkning och kan jämföras med volymkontrollen på en hörapparat. AKR-kretsarna kommer då att minska förstärkningen vilket till slut får till följd att radarn inte längre kan uppfatta det svaga skrovekot. Eventuellt kan störsändaren lägga ut en bruspuls för att hjälpa till att dölja skrovekot.

När skrovekot inte längre syns är det dags för nästa steg.

2. Fördröj störpulsen.

Störsändaren skickar nu inte längre tillbaka sin störpuls samtidigt som radarpulsen anländer, utan den får istället gå in i störsändarens minne och fördröjas något före den sänds ut.

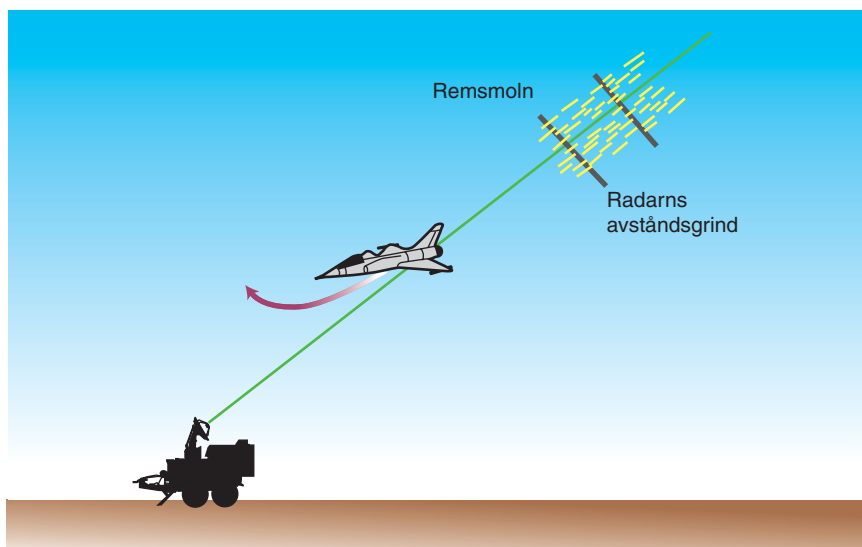


Bild 4:139. Avståndshakning och remsor. Flygplanet avståndshakar, släpper remsor samt gör undanmanövrer. Syftet är att radarn ska låsa över på remsmolnet så att radarn även tappar vinkelföljningen.

För varje ny puls ökar störsändaren fördröjningen mer och mer.

Radarn kommer tro att målet finns rakt bakom det verkliga målet på ett längre avstånd än vad det verkligen är.

3. Avbryt störsändningen.

Störsändaren avbryter slutligen störningen. Radarn kommer nu att tappa följningen helt eftersom den skruvat ner sin känslighet via AKR:en så mycket att den inte kan detektera skrovet. Radarn kommer nu gå i minnesföljning och leta efter ekot på det senaste (och felaktiga) avståndet. Minnesföljning pågår i ca 5-10 sekunder. Därefter måste radarn börja ett spaningsförlopp i avstånds- och eventuellt även vinkelled för att hitta målet. Troligtvis kommer detta att ta ytterligare ett antal sekunder. Flygplanet bör kombinera avståndsavhakningen med undanmanövrer så att när radarn börjar leta efter målet så finns inte flygplanet längre i samma riktning.

För att ytterligare fördröja radarns återlösning kan motståndaren lägga ut ett remsmoln på det avstånd där avståndsgrinden befinner sig då störsändaren stängs av. Radarn kommer då eventuellt att låsa över på remsmolnet.

Om radarn trots allt lyckas återfånga flygplanet kommer störsändaren att upprepa förloppet.

Skydd mot avståndsavhakning kan vara att

- signalbehandlingen inte accepterar att ett måleko accelererar onormalt fort

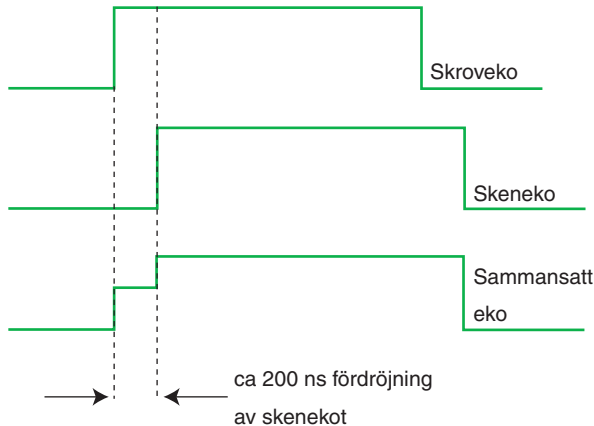


Bild 4:140. Framkanten av skrovekot kommer alltid fram först.

- radarn har hög upplösning och klarar av att upptäcka den mycket lilla tidsskillnaden mellan det verkliga målekoet och den alltid något fördröjda falska pulsen (bild 4:140)
- kretsar som larmar då ekostyrkan ökar onormalt fort (vilket sker i början av avhakningsförloppet)
- Staggered PRF, om Staggered PRF används blir det svårare att skapa avhakning inåt (dvs att det falska målet befinner sig på kortare avstånd än det verkliga)
- manuellt följa målekoet, det är svårare att lura en operatör än radarn
- dessutom bör systemet vara utrustat med möjligheter att använda annan avståndsinformation t ex från srr eller laser
- låta två radarstationer låsa på målet samtidigt.

Hastighetsavhakning (Velocity gate walk off)

Vissa typer av radarstationer t ex PE-542, och vissa jaktradar är dopplerföljande. De har alltså förmågan att följa på målets hastighet. Principen är att dessa stationer registrerar den frekvensändring (dopplerfrekvens) hos ekot relativt radarns sändfrekvens som ett rörligt mål ger upphov till. Ju större hastighet desto större förändring av ekosignalens frekvens. Fördelen med dessa typer av radarstationer är bl a att de har mycket bra förmåga att undertrycka markklotter.

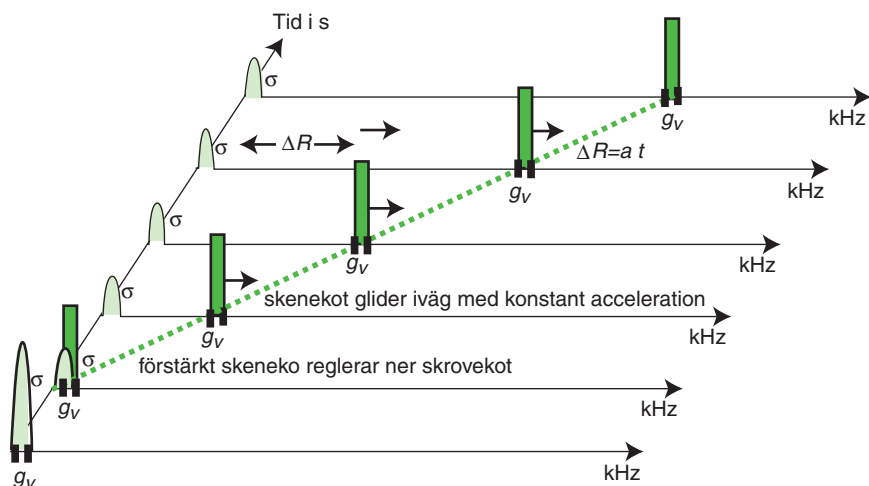


Bild 4:141. Hastighetsavhakning (källa Per Hyberg).
Där g_v = avståndsgrend ΔR = hastighetsskillnad och σ = skroveko.

Principen för hastighetsavhakning är snarlik den vid avståndsavhakning med den skillnaden att här påverkar störsändaren signalens dopplerfrekvens dvs ekots hastighet. Detta kan ske i tre steg.

- *Minska förstärkningen.* Först ska störsändaren ekoförstora (dvs skicka tillbaka en signal starkare än skrovekot) för att radarns AKR-kretsar ska minska mottagarens förstärkning.

Det bör ske så försiktigt som möjligt, så att varken radaroperatören eller någon störskyddskrets i radarn märker det.

- *Falsk dopplerfrekvens.* Därefter ska störsändaren på ett naturligt sätt förändra frekvensen i den återutsända störsignalen. Radarn kommer uppfatta detta som att flygplanet ändrar sin hastighet.
- *Avbryt störningen.* Slutligen när radarn följer på helt fel hastighet stängs störsändaren av. Radarns följekretsar går då över i minnesföljning några sekunder för att sedan på nytt försöka fånga målet. Härvid får flygplanet tid att göra undanmanöver så att även vinkelföljningen tappas.

Det är lämpligt att störsändaren försöker hastighetsavhaka mot lägre hastigheter. När nolldoppler nås (dvs samma hastighet som markekona) stängs störsändningen av och risken ökar då att radarn låser över på markekona.

Radarkonstruktören kan å sin sida motverka detta genom att vid mål-ekoförlust låta hastighetsgrinden svepa från den sist uppmätta dopplerfrekvensen mot högre frekvenser. På detta sätt kommer grinden relativt snart återlåsa på skrovekot om inte flygplanet hunnit göra undanmanöver. För att ytterligare försvåra kombineras ofta hastighetsavhakning med såväl undanmanöver och remsfällning.

Skydd mot hastighetsavhakning kan ske genom

- manuell hastighetsföljning
- accelerationsbegränsning, radarn följer inte med mål som accelererar onormalt fort
- hastighetsinformation från spaningsradar (vilken beräknar hastigheten genom att mäta tiden och målets läge vid minst två tillfällen).

Som tidigare nämnts är det viktigt att radarn inte tappar målet i vinkelled detta kan förhindras t ex med hjälp av någon form av TV-kamera som automatiskt eller med hjälp av operatören följer på målet.

Vinkelavhakning (Angle walk off)

Principer för vinkeluppföljning

Syftet med vinkelavhakning är att antennen ska vridas bort från målet.

De flesta eldledningsradarstationer måste hela tiden peka med antennen mot målet (undantag t ex Arthur som har en elektroniskt styrd antenn). Vid avstånds- och hastighetsavhakning kan oftast en robot ändå bekämpa ett mål även om det får fel information om hastighet eller avstånd. Om däremot antennen inte pekar mot flygplanet så har radarn definitivt tappat målet. Systemet har då inte någon vinkelinformation och därmed inte någon möjlighet att bekämpa målet.

För att kunna styra antennen måste radarn kontinuerligt få information om var målet befinner sig. Så snart målet inte befinner sig rakt framför antennen ska det i radarn bildas felsignaler som via servomotorer vrider tillbaka antennen mot flygplanet.

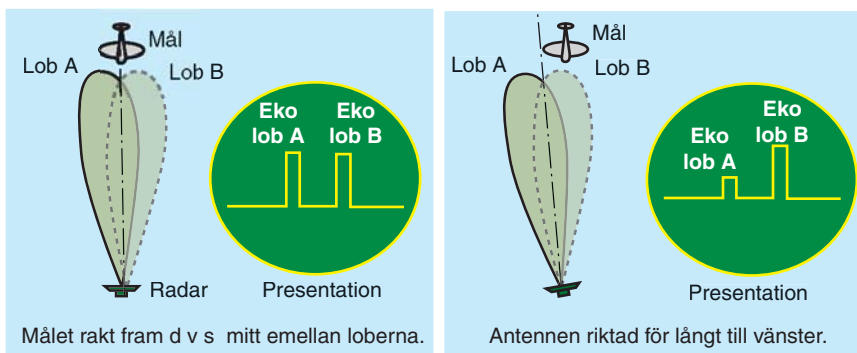


Bild 4:142. Vinkelavhakning.

För att skapa dessa felsignaler använder man sig normalt sett av någon form av amplitudjämförelse. Man riktar växelvis antennen lite över/under samt vänster/höger om målet (bild 4:142). Om alla dessa signaler är lika stora befinner sig målet rakt framför antennen. Om t ex "höger" är något

starkare än de övriga måste antennen vridas åt höger för att signalerna ska bli lika starka och målet hamna rätt. Felsignalerna påverkar ett servosystem som vrider antennen i önskad riktning.

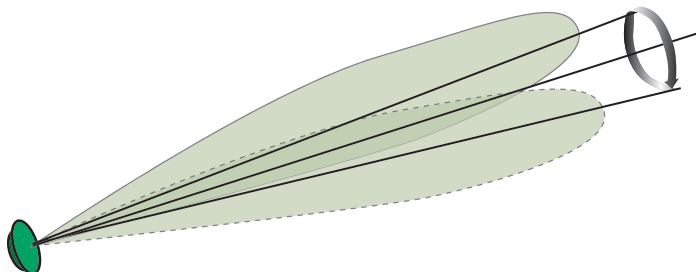


Bild 4:143. Loben nuterar runt antennens siktlinje.

De vanligaste typerna av vinkelföljningssystem är

- nuterande sändar- och mottagarlob t ex Cig 790
- nuterande mottagare t ex PE-542 (RBS 97)
- monopuls t ex RBS 23.

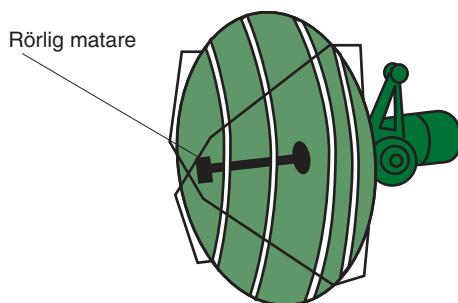


Bild 4:144. Antenn med nuterande sändar- och mottagarlob.

En antenmmatare sägs nutera om dess axel roterar med en liten vinkelavvikelse runt siktlinjen, med bibehållen polarisation.

Nuterande sändare- och mottagarlob är det äldsta systemet. Moderna system har numera ofta monopuls eftersom detta har visat sig vara relativt svårt att störa.

Nuterande sändare och mottagarlob (Conical scan)

Ett av de första metoderna för automatisk vinkelföljning var att använda en nuterande matarantenn (conical scan). I mitten av antenntreflektorn sitter den s k mataren ur denna sänds radarpulsen ut och studsar därefter mot antenntreflektorn. En motor nuterar mataren vilket får antenntloben att svepa runt målet (bild 4:143). Under ett varvs vridning av mataren hinner radarn sända ut hundratals radarpulser.

Exempel 4:11

Mataren nuterar med 50 Hz. Pulsrepetitionsfrekvensen är 5000 Hz.

För att radarn ska få komplett vinkelinformation krävs att mataren nuterat ett varv.

Ett varv för mataren tar $1/50$ s under denna tid sänds $1/50 \cdot 5000 = 100$ pulser.

En vinkelgivare håller reda på vart mataren pekar och lämnar en referensspänning som mått på matarens aktuella vridning.

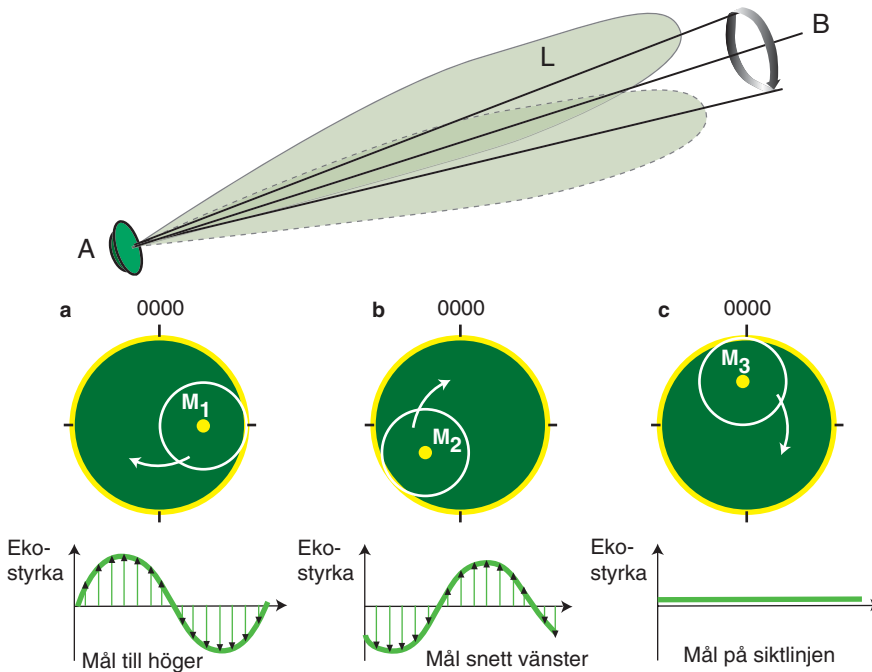


Bild 4:145. Beroende på målets läge kommer den amplitudmodulerade signalen att få olika utseende jämfört med en referensspänning.

Loben L roterar runt axeln AB så att en energikon erhålls. Bild 4:145 visar hur ekopulsstyrkan varierar beroende på var målet ligger i konen.

De större cirklarna motsvarar tvärsnitt av konen och de mindre cirklarna motsvarar tvärsnitt av loben. Målen indikeras med M_1 , M_2 och M_3 . Målet M_1 i bild a ligger 90° förskjutet från 0-läget. När loben roterar erhålls en större signal vid 90° vinkel och en mindre signal vid 270° (se kurvan). Målet M_2 (i bild b) ligger mellan 180° och 270° . Dess signalstyrka ändras som i kurvan. Målet M_3 i bild c ligger på antennens axel. Därigenom blir signalen lika stor för alla lobvinklar. Detta är det önskade tillståndet. Servosystemets uppgift är alltså att vrida antennen så att signalstyrkan är konstant oberoende av lobens vridningsvinkel.

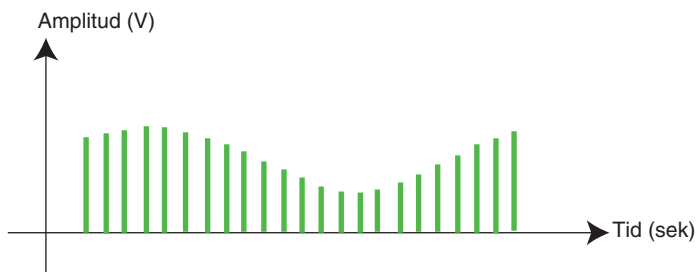


Bild 4:146. Om målet inte ligger på siktlinjen kommer ekoamplituden att variera då mataren vrids ett varv.

För att störsändaren ska kunna vinkelavhaka denna typ av system måste den först mäta upp med vilken hastighet antennens matare nuterar. Detta gör störsystemet genom att mäta frekvensen på de effektvariationer som uppstår i störsändarens mottagare, då antennloben sveper kring flygplanet. Typiska värden är att mataren nuterar med ca 50 varv per sekund.

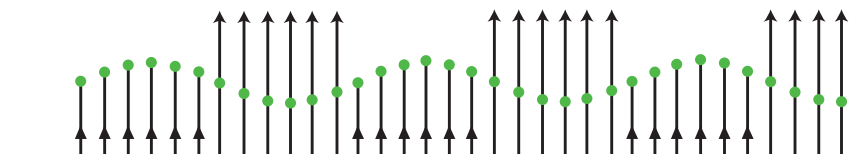


Bild 4:147. Störsändaren skickar tillbaka förstärkta ekopulser under en del av varje varv.

När störutrustningen fastställt varvtalet hos mataren, förstärker den de mottagna radarpulserna under en del av varvet. Radarn kommer då att motta en kraftigare signal varje gång mataren befinner sig i ett visst läge, exempelvis över målet. Radarn kommer då att anta att antennen ligger för lågt och kommer att börja höja antennen. Oavsett hur mycket radarn höjer antennen kommer störpulsen få radarn att tro att den ligger fel. Redan efter någon sekund kan detta leda till att radarn tappar målet.

Det bästa skydd mot vinkelavhakning är att stötta vinkelföljningen med någon form av manuell följning t ex via periskop (Cig-790) eller IR-kamera på antennen (EldE 23).

Nuterande mottagare (Conical Scan on Reciev Only, COSRO)

För inte störsändaren ska få information om med vilken hastighet mataren nuterar så kan man istället låta endast mottagarantennen nutera. Funktionen är i övrigt i stort sett den samma som vid nuterande matare. Systemet kräver att det finns en stillastående sändarlob och en nuterande mottagarlob.

I mottagaren nuteras mottagarantennen runt målet, om ekosignalerna är lika starka under ett varvs vridning av mottagaren så pekar antennen rätt. Om ekot är starkare vid något visst läge hos mataren bildas en felsignal som får vrida antennen till rätt riktning.

En störsändare får med den här lösningen ingen information om med vilken hastighet nutationen sker. Om störsändaren lägger ut en störpuls med felaktig frekvens, som inte stämmer överens med mottagarens varvtal, så kommer radarn att bli i stort sett opåverkad. Anledningen till detta är att om störpulserna första gången kommer då mottagaren pekar t ex under målet, så kommer vid nästa varvs störpulserna att komma då mataren befinner sig i något helt annat läge. Radarn reagerar inte på signaler under något enstaka varv utan det krävs ett antal pulser under ett antal varv som alla säger att antennen befinner sig t ex för lågt, för att vinkelföljningskretsarna i radarn ska börja reagera. Men eftersom inte störsändaren vet var mottagarloben befinner sig, kan den inte få störpulserna att "hamna på rätt ställe" varje varv. Radarn kan då bibehålla vinkelföljningen.

En möjlig störmetod mot den här typen av radar är att störsändaren börjar med att "gissa" med vilken frekvens som radarns mottagare nuterar, t ex mellan 10-50 Hz. Störsändaren börjar sedan sända ut ett pulståg med en frekvens på 10 Hz ökar efter en stund till 11 Hz osv. När den finner rätt frekvens kommer det att börja rycka i antennen. När störsändaren märker att radarns sändarlob börjar flytta på sig så har den funnit rätt varvtal hos mottagarantennen. Störsändaren stör sedan med ett pulståg med denna frekvens till dess att radarn tappar målet.

För att förhindra vinkelstörning mot COSRO-system kan radarn variera nutationshastigheten hos mataren slumpvis eller enligt något komplicerat mönster. Dessa radarsystem blir då svåra att vinkelavhaka.

Naturliga ekovariationer påverkar roterande system

Nuterande system är inte de mest exakta.

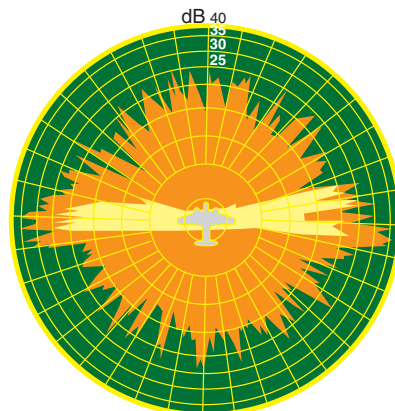


Bild 4:148. "Radarmålarean" från olika vinklar. Reflekterad effekt från ett bombplan, som belyses med en 10 cm radar.

Måleket fluktuerar kraftigt även naturligt. Detta medför att det uppstår amplitudskillnader mellan radarpulserna även om antennen egentligen pekar rätt. Detta leder till att antennen aldrig kommer att stå helt stilla. Fenomenet kallas *vinkelbrus*. För att antennen inte ska reagera på alla måleko-fluktuationer bildas ett medelvärde av ett stort antal mätningar i radarn innan antennen tillåts styra i någon riktning, trots detta finns alltid ett visst litet vinkelbrus kvar.

Vinkelavhakning av monopulsradar

Moderna radarstationer som t ex EldE23 och nosradarn i JAS 39 nyttjar fyra fasta lober s k monopulsteknik för att få vinkelinformation. Radar-energin sänds samtidigt ut genom fyra matare. Ett eko tas sedan emot i fyra mottagarkanalerna vilka är kopplade till matarantennerna. Man skiljer på två principer

- amplitudmonopuls
- fasmonopuls.

Vid en djupare analys av metoderna framgår att de egentligen mer eller mindre är samma sak.

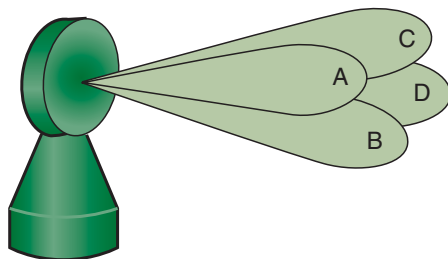
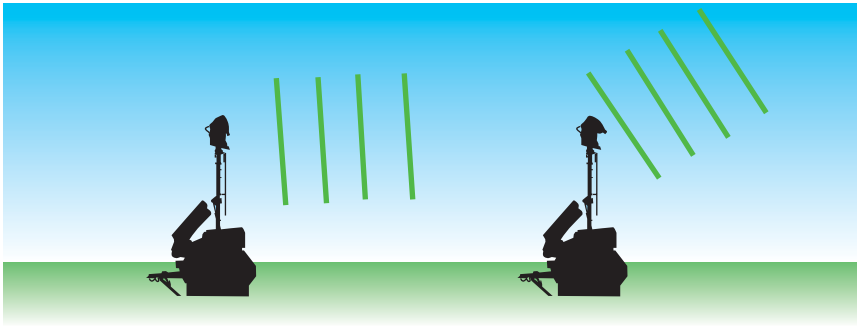


Bild 4:149. Monopulsradar princip.

Hos ett system med amplitudmonopuls är de fyra matarantennerna riktade i något olika riktningar. Antennen pekar rätt när signalen är lika stark i alla fyra mottagarkanalerna.

Vid fasmonopuls är alla fyra matarantennerna riktade i samma riktning. Om någon eller några av mottagarkanalerna nås av signaler där systemets fasläge ligger något före de andra kanalerna vrids antennen till dess att fasläget är samma i alla kanalerna.

Fördelen med monopulstekniken är att en enda radarpuls ger all vinkelinformation om målet. Som tidigare nämnts så kräver systemen med nuterande sändare eller mottagare ett stort antal ekopulser för att ge vinkelinformationen. Monopulssystemen är mer exakta eftersom de inte påverkas av målekovariationerna då all information finns i varje puls.



*Bild 4:150. Monopulsradarns princip.
Antenn vrider sig så att antennplanet är parallellt med vågfronten.*

Monopulsradarn är betydligt svårare att vinkelavhaka än övriga system även om det finns vissa metoder även för detta.

Den bästa metoden är troligen att använda någon form av offboard-störsändare t ex bogserad störsändare, vilken befinner sig i en annan vinkel i förhållande till målet.

Störning av vinkelföljning i monopulsradar, fasfrontstörning (Crosseye)

En av störmetoderna mot vinkelföljningen i ett monopulssystem kallas crosseye eller fasfrontstörning (fasfrontsdistorsion).

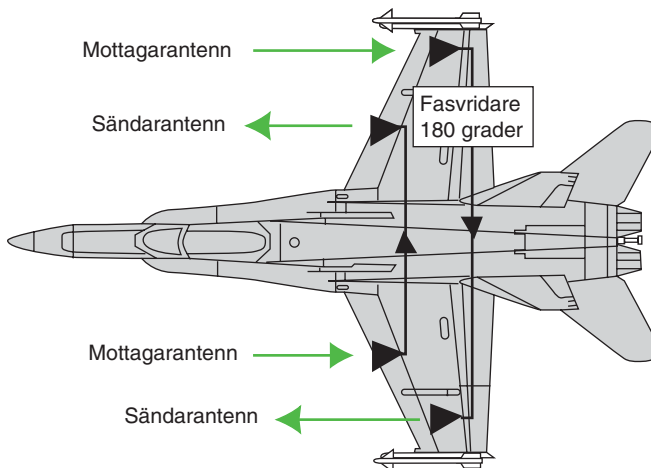


Bild 4:151. Fasfrontsvridning.

Utrustningen placeras i ett flygplan med de två paren sändar- och mottagarantenn placerade på så stort avstånd som möjligt från varandra, lämpligtvis i vingspetsarna.

4. Telekrigföring

Här är utrustningens antenner riktade åt samma håll och mottar därför samma radarsignaler. Signalerna förstärks och återutsänds via den motsatta antennen. I vissa riktningar kommer då signalerna från de båda antennerna att förstärka varandra och i vissa andra riktningar att försvaga varandra.

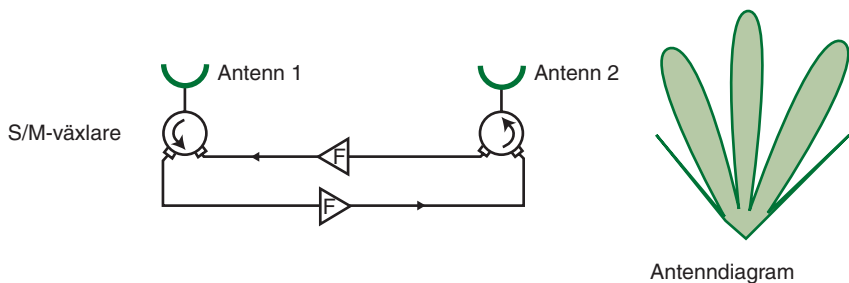


Bild 4:152. Utan fasvridare fås ett signalmaximum riktat mot radarn.

Det visar sig nu att ett maximum i störsändarens antennndiagram alltid kommer att vara riktat mot radarn. Om däremot den ena signalen fasvrides 180° före den återutsänds kommer alltid ett minimum uppstå i riktning mot radarn.

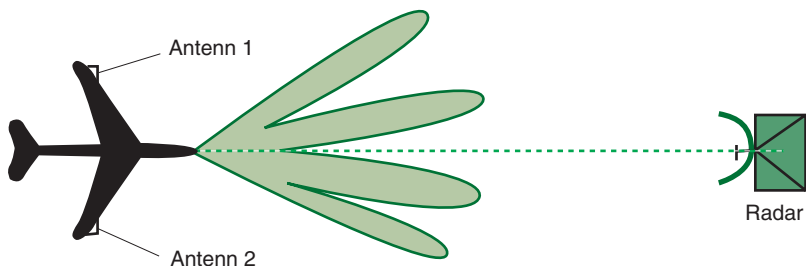


Bild 4:153. Signalminium i riktning mot radarn.

Den ena signalen dämpas något (i storleksordningen 10-20%), orsaken är att ett störsystem blir mindre känsligt mot inre störningar, detta kan stabilisera systemet om inte exakt 180° fasskillnad kan upprätthållas.

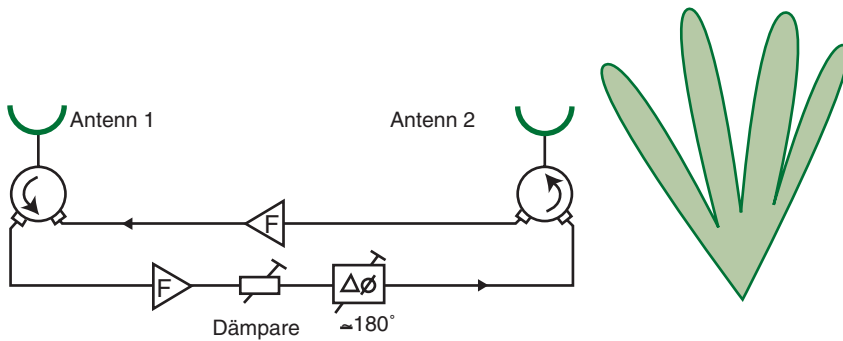


Bild 4:154. Fasfrontsvridare med dämpare. Ett signalminimum uppstår mot radarn.

Radarn strävar alltid att rikta in antennen parallellt med fasfronten. Radarns antenn kommer då att riktas vid sidan av målet. I praktiken kan felvinkeln bli högst 0.6 gånger radarantennens lobvinkel.

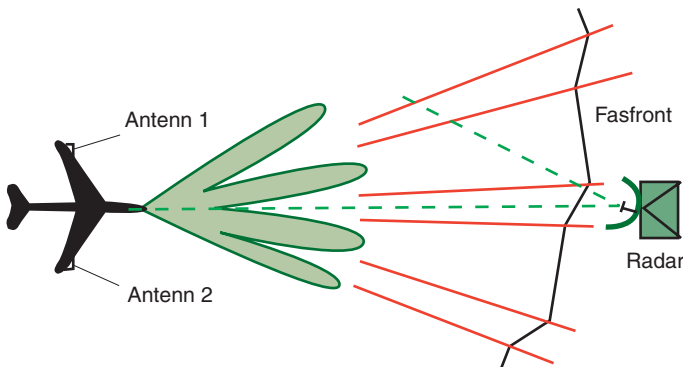


Bild 4:155. En sned fasfront uppstår. Antennen kommer att ställa in sig parallellt med fasfronten och vrids bort från målet.

Bild 4:155 visar fasfrontens utseende. En av nackdelarna vid fasfrontsdistorsion är att störsändarens effekt till största delen sprids i andra riktningar än mot störobjektet. Detta medför att den utsända effekten måste vara stor för att skrovet ska döljas. En annan nackdel är att störsändarens antenner sitter ganska nära varandra. På större avstånd, en mil eller mer, medför det att störsändaren uppfattas som punktformig och då kan inte någon distorsion av fasfronten åstadkommas.

Vinkelavhakning med fasfrontsdistorsion kan användas även mot en följeradar med lobnutation och andra vinkelföljande radarsystem. Metoden är inte effektiv mot robotar med semiaktiv målsökare.

Korspolarisationsstörning (Cross Polarization "Crosspol")

Cross Polarization "Crosspol" eller PECM (Polarization-Exchange Cross Modulation) har till syfte att få en eldledningsradar att tappa vinkelföljningen och kan vara effektiv mot radarstationer som använder paraboliska antenner. Korspolarisationsstörningens effektivitet är beroende på förhållandet mellan radarantennens fokallängd och dess diameter. Ju mindre detta förhållande är desto mer krökt är antennen. Korspolarisationsstörningens effektivitet ökar ju mer krökt antenntreflektorn är.

Störmetoden nyttjar den polarisationsdistorsion som sker hos en mottagen radarsignal. Alla antenner speciellt dubbelkrökta reflektorantenner har ett visst mått av polarisationsorenhet, vilket innebär att de sänder ut och även kan ta emot ett delfält med en E-vektor som är ortogonal (vinkelrät) mot den avsedda. Orsakerna till distorsionen är flera t ex krökningen hos en radom, difraktion vid kanterna av antennen, samt reflektorns krökning.

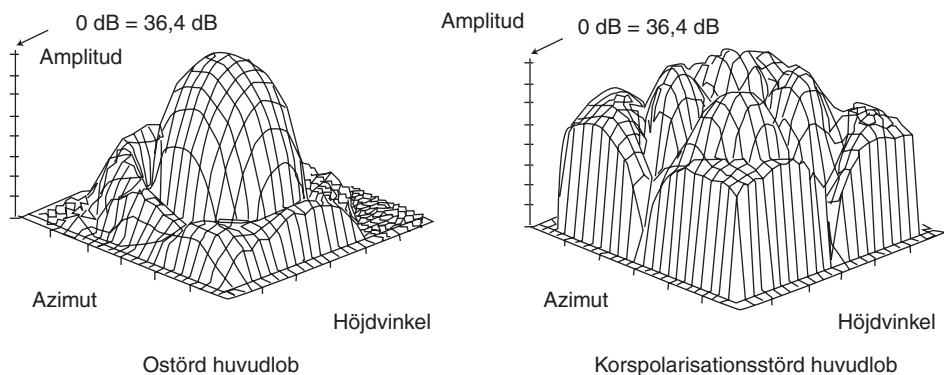


Bild 4:156. Följden av stark korspolarisationsstörning. Antenndiagrammets huvudlob, ersätts med fyra lobar vars styrka är undertryckt 25 dB jämfört med den ostöra huvudloben. Detta leder till att stora följefel byggs upp. (Stimson)

När en antenn belyses med en mycket stark signal vars polarisation är vriden 90° relativt antennens normala polarisation, så kommer antennens mottagningsdiagram att bli förvrängd (bild 4:156). Det ortogonala fältet har maxima där ursprungsfältet har minima och vice versa, vilket leder till att stora och oregelbundna följefel byggs upp.

Låt oss betrakta ett monopolssystem för sidvinkelstyrning som försöker följa på ett mål som befinner sig längs antennens siktlinje (origo i bild 4:158). Målet rör sig åt höger. Signalbehandlingen som förutsätter den ordinarie polarisationen förväntar sig då enligt bilden att en positiv felsignal uppstår. En sådan felsignal vrider därför antennen åt höger.

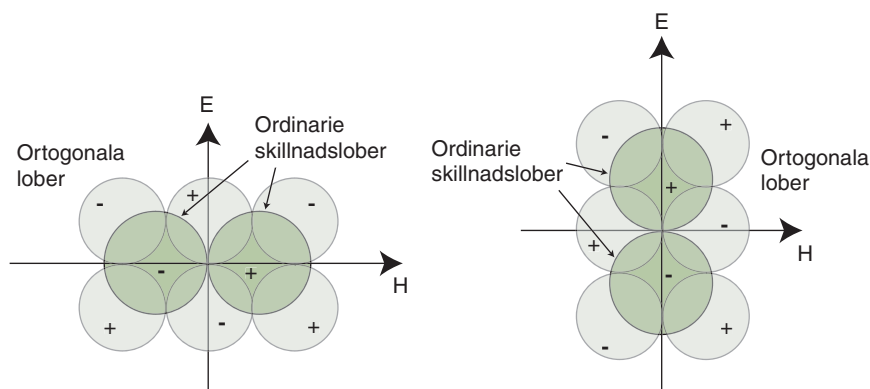


Bild 4:157. Skillnadsloberna i azimut (till vänster) och i elevation (till höger) med sina ortogonala motsvarigheter.

Om målet istället är starkare i den ortogonala polarisationen kommer, enligt bild 4:157, en ökande felsignal istället uppstå i elevationsservot, antennen vrids vinkelrät mot målets rörelse. Metoden fungerar mot radarstationer som nyttjar såväl fas- som amplitudmonopuls för sin vinkelföljning.

Ett "Crosspol"-system byggs upp med en repeterare innehållande ett TWT med hög förstärkning samt mottagar- och sändarantennerna med motsatt polarisation.

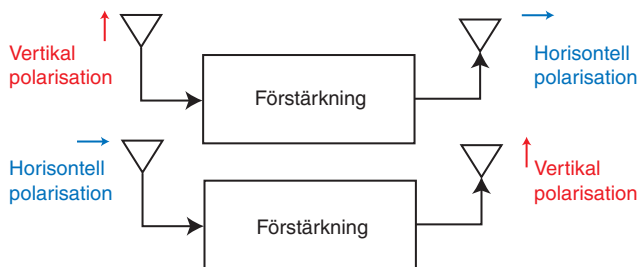


Bild 4:158. Princip korspolarisationsstörare. Genom att återutsända två ortogonalt polariserade signalkomponenter var och en med 90° polarisationsändring så skapar störsändaren en signal som är korspolariserad mot varje linjärt polariserad insignal.

Den största svårigheten med denna metod är att säkerställa att den ortogonala fältkomponenten verkligen dominerar. I mitten på huvudloben har de flesta parabolantennar 20–30 dB undertryckning av den ortogonala polarisationen. Gruppantennor och flate-plate antenner kan ha en undertryckning av 30–50 dB. Detta innebär att det krävs mycket kraftig störövertikt hos störsändaren för att lyckas. Om störsändaren själv har viss polarisationsorenhet så kommer detta istället att hjälpa radarn till vinkelföljning. Ett system för korspolarisationsstörning måste följaktligen ha mycket god egen polarisationsnoggrannhet.

Glimtstörsändning

De flesta eldledningsradarsystem kan när störsignalen blir alltför stark koppla över i en brusföljningsmod (Home On Jam, HOJ). Antennen riktas då mot den starkaste signalkällan, rakt mot störsändaren. Vapensystemet utgör därmed fortfarande ett hot mot störsändaren även om det inte direkt ser flygplansekot och kan bestämma avstånd och hastighet. En robot blir med detta system en enkel form av SSRB.

Om två flygplan utrustade med störsändare växelvis brusstör så kommer radarn omväxlande att riktas på de båda flygplanen. På så sätt uppstår ”pendlingar” i systemet så att målet tappas i vinkelled och t ex en robot går mellan flygplanen. Störsignalen från det flygplan som för tillfället störsänder bör vara så stark att den maskerar även det andra flygplanet annars finns risk att radarn/roboten endast låser över på det andra flygplanets skroveko.

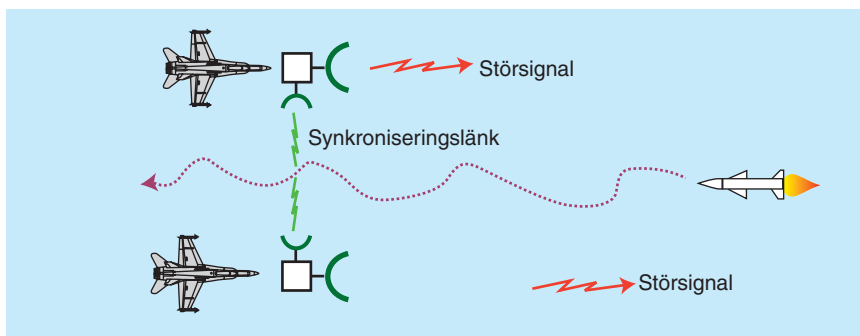


Bild 4:159. Brusglimt mellan två flygplan. Bruset måste vara så starkt att det tvingar in målsökaren i brusmod (HOJ). Synkroniseringen av störsändarna sker med en länk mellan flygplanen.

Sändväxlingarna måste ske med rätt periodicitet. Dock inte fortare än att målsökaren hinner reagera, men inte heller för långsamt. Ett riktvärde är ca 1 Hz. För att synkronisera störutrustningarnas sändning används någon form av radiolänk mellan störsystemen. Flygplanen måste dessutom flyga med vissa inbördes avstånd i förhållande till hotriktningen för att metoden ska fungera optimalt.

Markreflexstörning (terrain bounce, markstuds)

Vid vinkelavhakning med reflexstörning är flygplanet utrustat med en repeterstörsändare. Mottagarantennen är riktad i hotriktningen och sändarantenn är riktad snett nedåt. Den utsända (förstärkta) repeterpulsens studsar mot marken och får roboten att styra mot målets spegelbild.

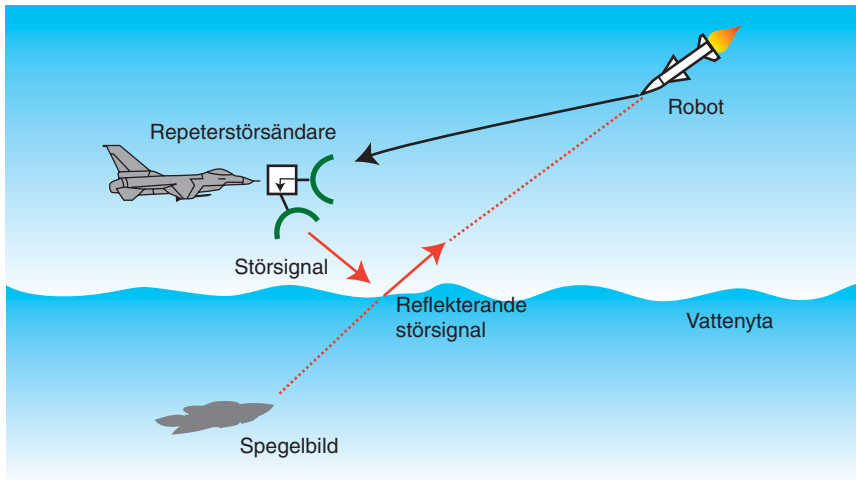


Bild 4:160. Markreflexstörning.

För att metoden ska fungera måste roboten ha höjdvärläge dvs anfalla uppifrån.

Reflexstörning fungerar i praktiken bäst över vatten, eftersom markens dämpning ofta är alltför stor.

Offboard jammers

För att förhindra att vapensystem med HOJ-funktion låser på störsändaren och därmed kan skjuta ner flygplanet samt för att haka av monopulsradar används s k offboard jammers. Exempel på sådana system är släpade störsändare samt fritt fallande störsändare. Försök har även gjorts med störsändare som skjuts ut framåt med hjälp av raketer.

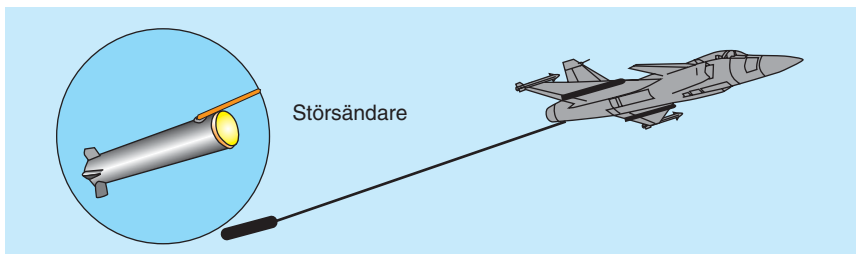


Bild 4:161. Släpad störsändare.

Släpad störsändare är en störmetod som ger ett bra skydd under lång tid. Störsändaren släpas något hundratal meter efter flygplanet. En robot som styr mot storkällan ska förhoppningsvis missa flygplanet och istället gå mot störsändaren.

4. Telekrigföring

Den skyddande verkan blir störst då flygplanet flyger på tvärskurs i förhållande till hotet. Skyddet blir dock bra redan vid 30 graders vinkelskillnad mellan störsändare och flygplan. När flygplanet flyger rakt mot hotet blir skyddet mindre, eftersom vinkelskillnaden mellan flygplanet och störsändaren då är försumbar. Flygplanet måste i detta fall gira för att öka vinkeln till störsändaren när varnarsystemet anger att en radar låst på planet.

De enklaste bogserade störsändare innehåller bara en ekoförstorare, vilken alstrar ett förstärkt eko med betydligt större ”målarea” än flygplanets. I mer avancerade system såsom brittiska Ariel, (6–20 GHz) och amerikanska ALE-50 kan störsändaren även lägga till viss modulering på störsignalen.

Som slutförstärkare används sk mini-TWT som vanligen strömförsörjs via en kabel i bogserlinan eller med batteri.



Bild 4:162. Släpad störsändare LENA.

Två skilda typer av system kan särskiljas

- endast slutförstärkaren bogseras. I detta system bogseras bara slutförstärkaren, resten av störsystemet är placerat ombord på flygplanet. Som mottagare kan flygplanets befintliga radarvarnare eller VMS-system användas. När styrdatorn skapat en lämplig störform så sänds denna över till slutförstärkaren via en optofiber som finns i bogservajern.

Den här lösningen kan innebära att störsystemet blir billigare, eftersom endast förstärkaren är placerad i den mest utsatta delen.

- hela störsystemet släpas. I den här lösningen placeras hela störsystemet dvs mottagare, hotbibliotek, styrdator och slutförstärkare, i den bogserade delen. Detta är en betydligt dyrare lösning.

Efter slutfört uppdrag är det vanligt att störsändaren släpps. Orsaken är att en vinschanordning ofta skulle ta alltför stor plats i flygplanet eller den pod som störsändaren är ansluten till.

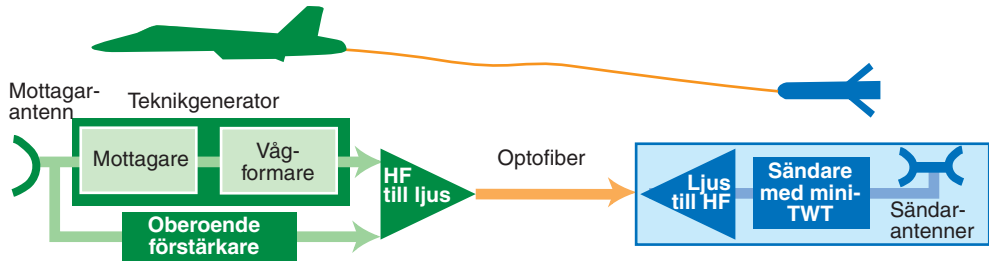


Bild 4:163. Blockschema släpad störsändare, enl principen att endast slutförstärkaren bogseras.

Släpade störsändare torde vara ett allvarligt problem för system som nyttjar robotar med inbyggd målsökare, t ex Amraam, Hawk och Patriot. Även om man via optisk stöttning i ett semiaktivt system kan styra eldledningsradarn att följa på målet återstår frågan: vart styr robotens målsökare?

Till möjliga motåtgärder hör

- Robotar med kompletterande slutfasstyrning med hjälp av bildalstrande IR.
- Robot utrustad med en målsökarantenn med liten lobvinkel och god sidolobsundertryckning för att i slutskedet kunna separera skrovesignalen från störsignalen.

Optiska system som RBS 70 och RBS 90 påverkas ej av släpande störsändare. RBS 23 Bamse är kommandostyrd via radar. Roboten saknar målsökare varför roboten styrs av skytten. Eftersom skytten förutom eldledningsradarn även har hjälp av en IR/TV-kamera så kommer detta system ej heller att påverkas av en släpad störsändare (förutsatt att det finns optisk sikt). Vissa typer av släpande störsändare innehåller en värmekälla för att dra till sig IR-robotar. Dessa typer av störare kan utgöra ett problem för IR-robotar som t ex Sidewinder, Sa-14, Sa-16.

Fritt fallande störsändare

En annan metod för att öka vinkelskillnaden mellan flygplan och störsändare är att använda fritt fallande störsändare s k engångsstörsändare.

Exempel på sådana system är de amerikanska Poet och Gen-X (Generic expendable decoy).

Mottagarantennen hos Gen-X är en konisk spiralantenn och sitter inbyggd i nosen. Efter utskjutning söker mottagare igenom frekvensområdet

4. Telekrigföring

enligt ett sökmönster som programmerats in på marken eller i fällaren (ALE-47). När radarsignalen hittats genererar en signalgenerator signaler för att förmå målsökaren i hotradarn att följa Gen-X. Ett Lithiumbatteri svarar för strömförsörjningen.

Nackdelen med fritt fallande störsändare är att den snabbt försvinner från flygplanets närhet och nya måste släppas ut för att inte radarn ska återlåsa på flygplanet.

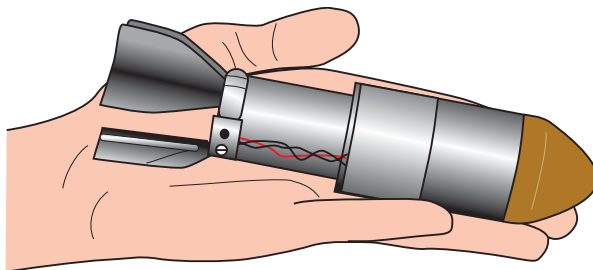


Bild 4:164. Gen-X engångsstörsändare.

En radarkonstruktör kan vidta liknande skyddsåtgärder som mot bogserade skenmål.

- Framkantsföljning, vilket innebär att radarn försöker följa på det främsta målet, inte det starkaste. Metoden är dock svår att lyckas med eftersom flygplansekot kanske inte alls syns på grund av störningen.
- Använda andra sensorer, exempelvis en TV-kamera på radarantennen så att operatören kan övervaka att rätt mål följs.
- Radarmålsökaren i roboten kompletteras med t ex en IR-målsökare som kan användas i robotens slutfas.

Högeffekt pulsad mikrovågsstrålning (HPM)

Detta avsnitt avseende text och bilder baseras främst på "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

Elektromagnetiska fält kan orsaka störning av elektronik. Detta kan gälla allt från att tv-bilden störs av en bormaskin till att en radarstation störs av stationens egna radioapparater. Mycket kraftig elektromagnetisk strålning kan skada elektronik genom att t ex bränna sönder de mycket tunna ledningarna i en integrerad krets. (Jämför urladdning vid statisk elektricitet). Luftvärnet har mycket elektronisk materiel t ex datorer, radioapparater, datorer som skulle kunna vara mål för denna typ av störning. Den här störformen brukar kallas HPM.

Den första insikten att HPM har störande verkan på elektronik dateras till 1960-talet. Detta ledde till att HPM-källor började utvecklas.

USA och Ryssland dominerar idag forskning och utveckling av kraftfulla och stationära HPM-källor. Beträffande skydd mot HPM bedrivs omfattande verksamhet i många länder.

Huvudsyftet med HPM-vapen är att störa eller förstöra funktionen hos elektronikberoende system. Även en kortvarig störning kan innebära att ett kvardröjande fel uppstår, t ex att en bil eller dator måste startas om. För ett flygplan eller en robot kan ett sådant fel vara förödande. För oskyddad elektronik uppträder störning vid måttliga fältstyrkor, jämförbara med den som finns intill en sändande mobiltelefon. Permanent skada uppstår då den av elektroniken absorberade energin är så hög att den förmår smälta eller på annat sätt förstöra halvledarmaterial eller ledningsmönster. För detta fodras fältstyrkor, jämförbara med de i närheten av en kraftig radarsändare.

Enligt uppgift användes Tomahawkrrobotar med HPM-stridsdel i Gulfkriget och Kosovokriget. Det förekommer även uppgifter om att HPM-vapen och lågfrekventa pulsvapen har använts som sabotage och terroristvapen mot civila system.

Viktiga orsaker till att HPM utgör ett hot mot militära och civila system är

- den allt flitigare användningen av elektronik, också för säkerhetskritiska funktioner
- den ökade och allt mer miniatyriserade och därmed känsligare elektroniken
- minskad skärmverkan på grund av användning av oledande plaster i de höljen som omger elektroniken.

Konventionella mikrovågskällor, såsom radarkällor har pulseffekter på upptill ca 100 MW. Denna effekt brukar användas som en undre gräns för vad som betecknas som en HPM-källa. Någon allmänt erkänd gräns finns

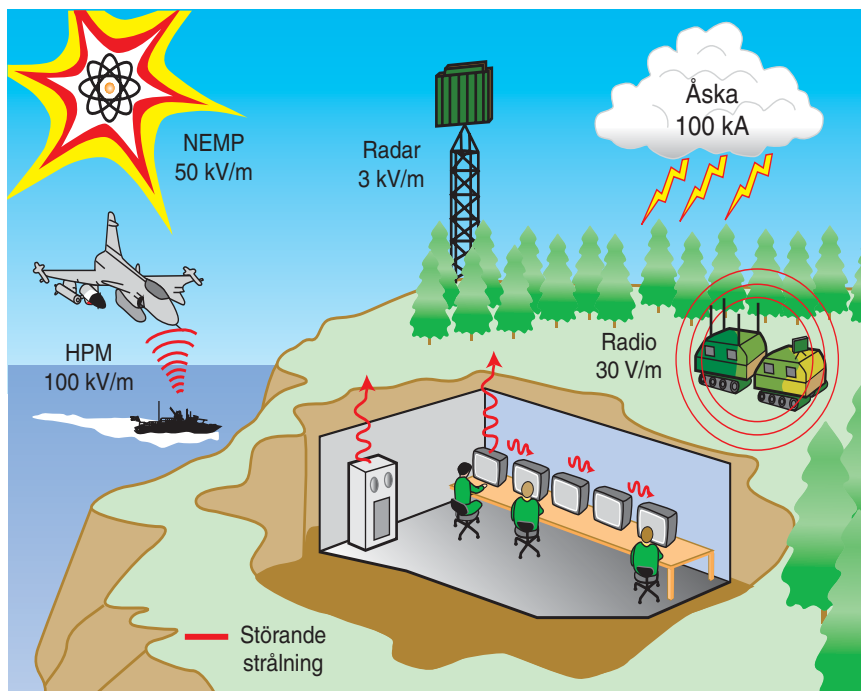


Bild 4:165. Högeffektpulsad mikrovågsstrålning (HPM) är en delmängd av den totala elektromagnetiska miljön som kan delas upp i naturligt betingad såsom statisk elektricitet (ESD) och åska samt mänsklig betingad såsom nukleär-EMP (NEMP), HPM, radio- och radarfrekventa fält. Den mänskligt betingade strålningen kan vidare delas upp i den som uppstått (helt eller delvis) avsiktligt t ex HPM och sådana vars eventuellt störande inverkan (EMI) är en oavsiktlig bieffekt av dess nyttofunktion (radio, radar, strålning från datorutrustning m m). Från ”FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)”.

dock inte. Men ett försök till karakteristik över HPM- vapen skulle kunna vara att HPM betecknar relativt smalbandig elektromagnetisk strålning med följande egenskaper

Frekvens: 0,3-300 GHz

Pulseffekt: 100 MW och större

Puls längd: 100-tals pikosekunder till 10-tals mikrosekunder

Ett HPM-vapen kan helt enkelt sägas fungera som en radar med hög utteffekt. Det finns även andra typer av elektromagnetisk strålning som används i samma syfte som HPM. Anordningar för att alstra dessa brukar ofta för enkelhetens skull räknas in bland HPM-vapnen. Dessa typer av strålning är

- Non-nuclear EMP (NNEMP). Det är en NEMP-liknande elektromagnetisk puls alstrad på annat sätt än genom en kärnvapenexplosion.

Denna är artificiellt alstrad, och ska ej förväxlas med den puls som blixten skapar – LEMP. Dess frekvensinnehåll är bredbandigt och kan innehålla frekvenser upp till tiotals GHz, det vill säga väl in i mikrovågsområdet.

- High-power Ultra Wide Band (UWB), Högeffekt ultrabredband. Härmed avses här momentant bredbandiga pulser vars huvudsakliga frekvensinnehåll ligger inom mikrovågsområdet. Man kan helt enkelt säga att detta är bredbandig HPM.

Här räknas hädanefter NNEMP och givetvis även högeffekt-UWB in bland HPM vapnen.

HPM-verkan

HPM-vapnen kan användas för att förstöra ett system eller för att störa driften eller produktionen vid en anläggning. Höga effekter kan till och med få stridsdelar i roboten och vissa typer av granater att explodera.

Verkan på en systemkomponent sker genom att denna antingen förstörs, degraderas eller störs. Förstörelse eller degradering orsakas oftast av



Bild 4:166. De ekonomiska och tekniska infrastrukturerna är i första hand målen för HPM. Dessa kan vara elproduktion och -distribution, tele- och datakommunikation, radio/TV-kommunikation etc. Havererade banksystem kan innebära kaos för samhällets ekonomiska funktioner. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

4. Telekrigföring

att höga temperaturer uppstår som en direkt eller indirekt följd av bestrålningen, vilket resulterar i att materialet smälter. På så sätt kan t ex en diod kortslutas. För en modern halvledarkrets kan det räcka med 1 ps för att värma upp ledningsbanorna.



Bild 4:167. En svepelektronikmikroskop bild av skadad integrerad krets. Leda-rens bredd är ca 10 μm . Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

Störning beror på att falska signaler uppstår i elektronikkretsarna som resultat av bestrålningen ger ofta upphov till bestående fel. Detta kan exempelvis ske i form av att innehåll i minneskretsar ändras eller att en bilmotor stannar. Kvarstående fel kan ibland ta åtskillig tid att åtgärda även om den ingående elektronikens hårdvara inte fysiskt behöver bytas ut. HPM mot datorer och datormätverk kan vara ett effektivt sätt att passera de normala sk logiska skydden som brandväggar och färister.

Störningar av oskärmat system brukar regelmässigt uppträda vid en fältstyrka på någon eller några 100-tal V/m. För att åstadkomma förstörelse fordras fältstyrkor av storleksordningen 10 kV/m eller mer. Mycket kraftfulla HPM-vapen kan förstöra mål på kilometeravstånd vid fri sikt. En oskyddad radiolänkstation där parabeln fungerar som mottagarantenn för HPM-strålningen, kan troligen förstöras på tiotals kilometers avstånd. Verkan av HPM avtar med kvadraten på avståndet, utom i sändarantennens närområde.

HPM-vapen

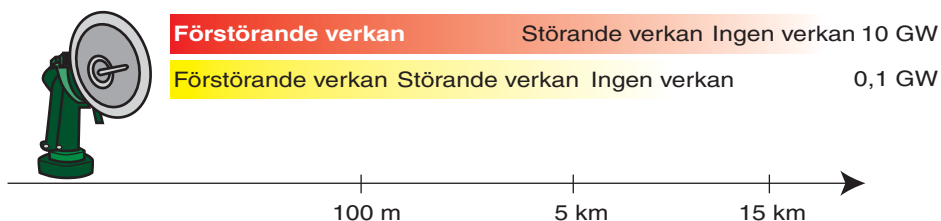


Bild 4:168. Verkansavståndet för ett större HPM-vapen mot skyddad elektronik. Mot oskyddad elektronik kan verkansavståndet öka minst 10 gånger. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

HPM-strålning kan typiskt bestå av en enkelpuls eller skurar av pulser, pulståg. Om avsikten är att orsaka permanent skada hos elektronik är det bättre att koncentrera energin till ett fåtal pulser.

HPM-vapen

HPM-vapen är inte dödliga och kan sättas in i inledningsfasen av en konflikt för att lamslå motståndaren, eventuellt som en del i en strategi för informationskrigföring.

Fördelar med HPM-vapen är

- angrepp kan ske i alla väder
- strålningen når målet med ljusets hastighet
- flera mål kan angripas utan detaljerad förhandsinformation om systemet som angrips
- motståndaren kan ha svårt att skydda sig mot denna vapentyp
- förenklad riktning och följdning
- hög tillgänglighet
- angripa sofistikerade (elektronikberoende) mål med enkla medel
- ”*Verka utan att märkas*”. Om man inte använder explosivämnesdrivna verkansdelar så kan man skada materiel utan att det initialt varken syns eller hörs.

Några nackdelar med HPM-vapen är

- svårt att utvärdera och konstatera skadeeffekten
- risken för att slå ut egna system
- skadeverkan är statistisk
- volym och vikt kan vara stora
- påverkar endast elektronikbaserade system
- begränsad räckvidd hos strålningen
- HPM-källan kan lokaliseras genom strålningsdetektion.

HPM-vapen kan vara stationära eller plattformsburna större system, kompakta system i form av granater eller stridsdelar för robotar eller lågfrekventa pulsvapen.

Ett HPM-vapen, som kan förstöra skyddad elektronik på åtminstone några hundra meters avstånd, behöver uppskattningsvis generera HPM-pulser med ca 10 GW pulseffekt under någon eller några tiondels mikrosekunder. Ett komplett sådant system kräver idag en totalvolym på åtminstone ett par kubikmeter, motsvarande en vikt på flera ton inklusive riktantenn. Systemet blir därför av praktiska skäl stationärt eller plattformsburet.



Bild 4:169. Exempel HPM-vapen.

HPM kan även genereras av kompakta HPM-vapen i form av stridsdelar i viktclassen från något kilo till några hundra kg. För att kunna göra stridsdelarna tillräckligt små används explosivämnesdrivna generatorer. Dessa används för att alstra den höga elektriska effekten som behövs för att driva strålkällan. Sådana generatorer kan fungera enligt olika principer. Den sprängämnesdrivna piezoelektriska generatoren samt den sprängämnesdrivna magnetflödeskomprimeraren (EMG) är två viktiga exempel. HPM-stridsdelen kan levereras till målets närhet med konventionella utskjutningsanordningar t ex robotar eller artilleri.

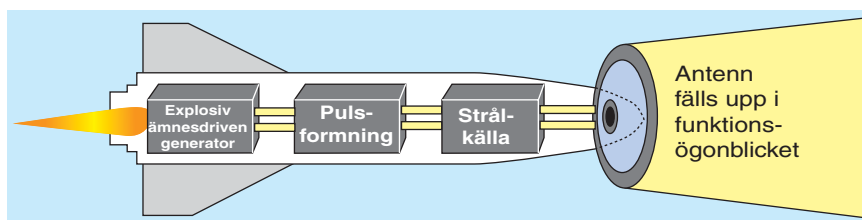


Bild 4:170. Robottransporterad HPM-stridsdel. God riktverkan på strålningen uppnås genom att en relativt stor antenn kan användas kombinerad med målsökare. Antennen kan vara en dynamisk typ som fälls upp under någon millisekund när mikrovågspulsen genereras och sedan blåser bort av fartvinden. Stridsdelen kan då få förstörande verkan med HPM på flera hundra meters avstånd även skyddad elektronik. Roboten i sig kan ha en räckvidd på flera 100-tal km. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

HPM-källor

En HPM-källa kan uppdelas i beståndsdelarna

- kraftaggregat
- pulsgenerator
- mikrovågsrör
- antenn.

Som exempel på pulsgeneratorer kan den pizelektriska generetorn och den elektromekaniska strömgeneretorn (Explosive Magnetic field Compression Generator – EMG) nämnas.

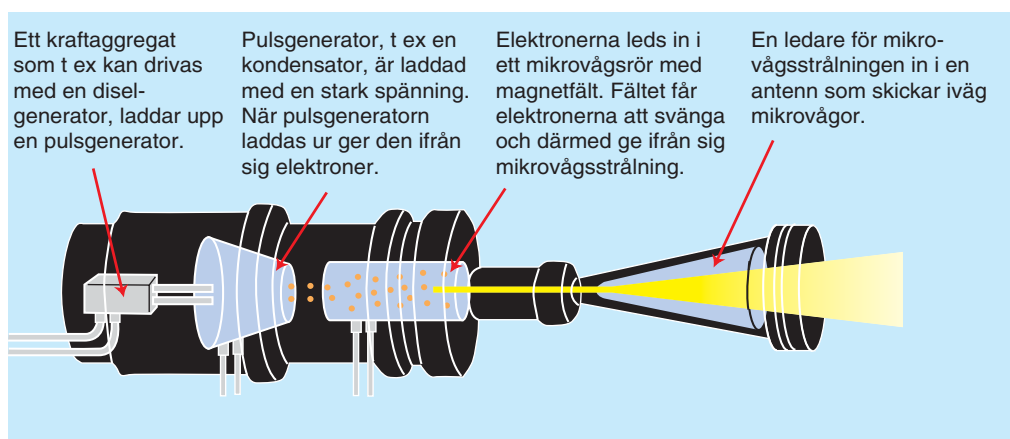


Bild 4:171. Principskiss över en HPM-källa. Källan kan delas in i pulsgenerator, mikrovågsrör och antenn. Exempel på mikrovågsrör är magnetron och virkator. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

Vissa fasta material har molekyler som är elektriska dipoler. Dessa ligger slumpmässigt orienterade så att det elektriska fältet över ett större område blir noll. Genom speciell behandling kan man få dipolerna att ställa in sig i önskade riktningar så att ett resulterande dipolmoment erhålls i materialet. Om materialet utsätts för tryckbelastning via t ex en stötvåg deformeras den mekaniskt vilket ger upphov till ett resulterande elektriskt fält i materialet. Vi har nu en form av kondensator som kan "laddas" på någon eller några mikrosekunder genom stöbelastning. En mycket kompakt HPM-stridsdel kan bygga på en sprängämnesdriven piezoelektrisk generator som alstrar korta spänningspulser då sprängämnet exploderar. Pulserna matas ut via antennen.

EMG har en rörlig del bestående av ett metallskal som accelereras av ett sprängämne och en fast del i form av en spole (induktor). När sprängämnet detonerar accelereras metallskalet till hög hastighet och rör

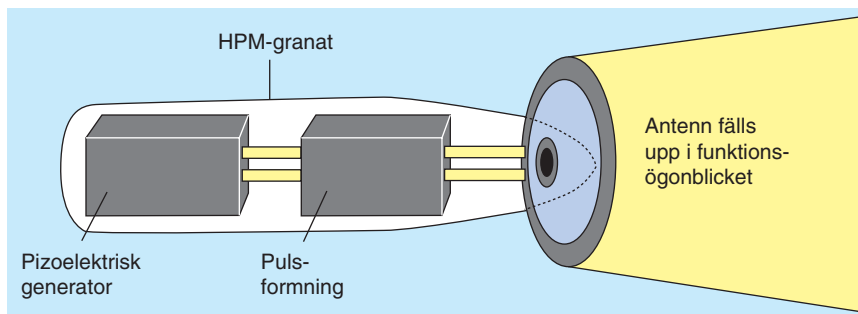


Bild 4:172. Principskiss på HPM stridsdel i granatform med explosiv ämnesdriven elektrisk pulsgenerator baserad på piezoeffekt. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

sig genom det magnetfält som tidigare alstrats inne i induktorn genom att leda en ström genom spolen, t ex från ett batteri. När metallskalet rör sig i magnetfältet omvandlas rörelseenergin till elektromagnetisk energi genom att en ström induceras i strömkretsen bestående av metallskalet i serie med induktorn. Den genererade energin lagras upp induktivt dvs i form av det ökade magnetfältet som genereras av strömmen genom induktorn. Några tiotal mikrosekunder efter att strömmen nått maximum i generatoren spränger den sig själv i småbitar.

En typisk EMG lämplig för användning som strömgenerator till HPM-vapen är spiralgeneratoren. Den har stor energiförstärkning, enkelt initieringssystem för sprängämnet och kan lätt inrymmas geometriskt i ett cylindriskt skal (robot eller granat). En spiralgenerator kan typiskt omvandla ca 5% av sprängämnets energi till elektrisk energi och kan förstärka den initiala energin som "injicerats" som magnetfält från t ex kondensatorbanken 50-100 gånger.

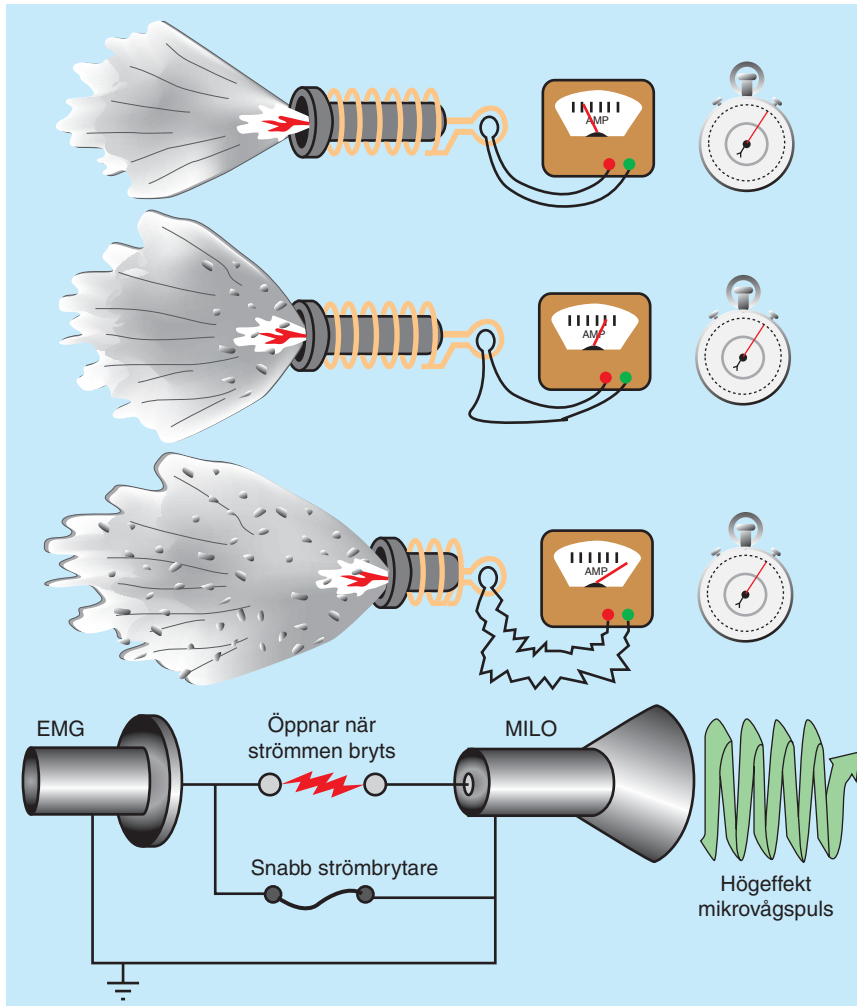


Bild 4:173. Överst: Principskiss på en elektromagnetisk strömgenerator (EMG). När sprängämnet detoneras acceleras metallskalet och rör sig i ett magnetfält, varvid rörelseenergin omvandlas till elektromagnetisk energi genom att en ström induceras i strömkretsen. Underst: Genom exempelvis en snabb strömbrytare kan en EMG verka som en högspanningsgenerator för en virkator eller MILO. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

HPM-skydd

Inträngning i målet kan ske via

- framvägskoppling eller
- bakvägskoppling.

Benämningen framvägskoppling används då strålningen tränger in genom öppningar avsedda att ta emot elektromagnetisk strålning, t ex antenner

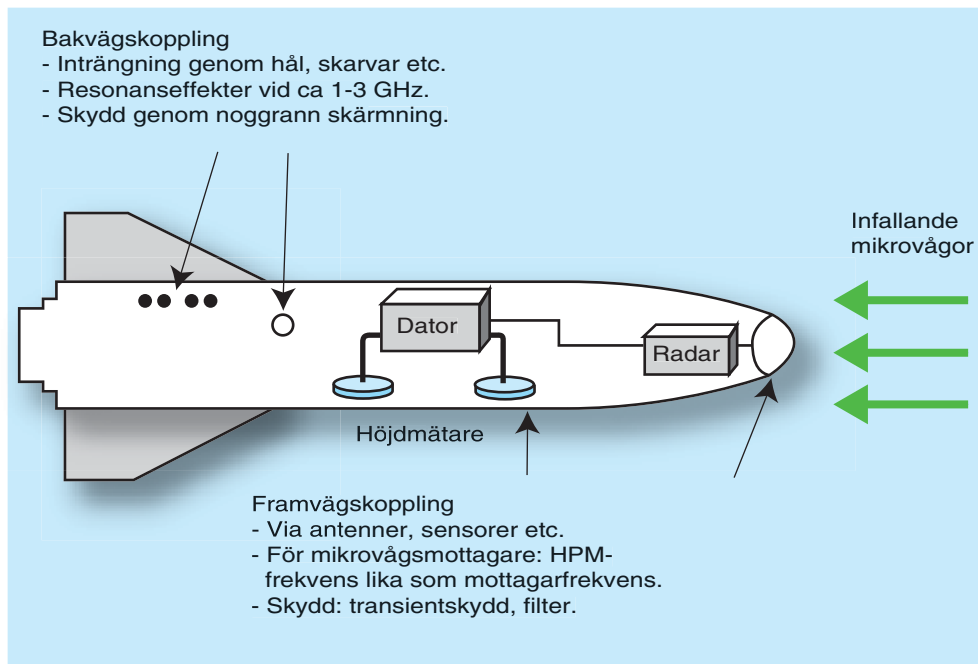


Bild 4:174. Bakvägs- och framvägskoppling. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

eller sensorer bild 4:174. I detta fall då arbetsfrekvensen för denna sensorn är samma som HPM-strålningens frekvens används benämningen framvägskoppling av första slaget, i annat fall används beteckningen av andra slaget. Ett exempel på framvägskoppling av första slaget är då man använder HPM för att slå ut en radiolänk (förutsatt att HPM-strålningen ligger inom radiolänkens frekvensband).

För framvägskoppling i militära sammanhang, t ex skydd av radar- eller optiska målsökare på robotar, måste för varje objekt specifika skyddsmetoder tas till. För radarmålsökare har de självskydd som finns mot den egna strålningen i form av radarns TR-rör visat sig ge ett visst skydd mot HPM. Snabba brytare kan användas för skydd av viss utrustning.

Benämningen bakvägskoppling används då strålningen efter att ha trängt in genom de ofullkomligheter som nästan alltid finns i en avskärmning, kopplar till ledningar och kablage och sedan går vidare till elektronikkomponenterna. För oskärmade föremål sker kopplingen direkt till kablage och ledningar. Exempel på ofullkomligheter i en skärmning är oledande packningar, skruv och nitförband, ventilations och dräneringshål, display-fönster etc.

För bakvägskoppling gäller att elektroniken för att skyddas, måste byggas in i väl skärmade utrymmen och att till elektroniken anslutna led-

ningar och kablage skärmas eller filtreras. Kraven på dessa åtgärder kan mildras beroende på elektronikutrustningens placering. Betong, jord berg etc ger ett visst skydd. Det är viktigt att påpeka att en skärm, oavsett om det är ett metalliskt apparthölje eller en tjock betongvägg inte får ha några större öppningar. Om en öppning i någon riktning har en dimension i samma storleksordning som strålningens våglängd ger öppningen inte någon dämpningseffekt alls. Istället kan t o m en förstärkning av det infallande fältet fås, vilket innebär att all den strålningsenergi som träffar öppningen också tar sig in genom öppningen. Detta är motivet till att använda mikrovågsvapen då våglängden för dessa är av decimeter- eller centimetervåglängd, vilket också är typiska storlekar på skruv- och nitavstånd, display-fönster m m. Vad gäller bakvägskoppling rent praktiskt har det visat sig att man för ett HPM-vapen inte bör gå högre än 1-3 GHz, max 6 GHz p g a att verkan drastiskt minskar för högre frekvenser p g a atmosfärens dämpning. Detta innebär då att mindre hål/öppningar inte är så farliga eftersom riktigt små våglängder ej används. Teoretisk skulle man annars kunna komma in var som helt om riktigt små våglängder användes.

Skärmverkan för ett skärmat utrymme är oftast starkt frekvensberoende. Detta är orsaken till att skydd mot NEMP (nukleär EMP) i allmänhet inte ger skydd mot HPM. När det gäller ledande material fås normalt en förhöjd skärmverkan då frekvensen ökar. För millimetertjock metall fås, på grund av dess höga elektriska ledningsförmåga, en god skärmverkan ända ner till kHz-området. Detta innebär återigen att skärmverkan för en metallisk skärm i praktiken inte begränsas av metallens egenskaper utan av ofullkomligheter i skärmen såsom kontaktdon, skruvskarvar etc. Olika delsystem bör förbindas med optofiber istället för metalledningar. För att ge en uppfattning om vilken skärmverkan som krävs för att skydda mot HPM-vapen kan konstateras att en skärmverkan på 60-70 dB torde vara tillräckligt även mot mycket kraftfulla militära HPM-vapen (klassen 10 GW). Med denna skärmverkan elimineras praktiskt taget risken för förstörande verkan och verkansavståndet för störning torde nedbringas till tiotalet meter.

Man kan förenklat säga att skärmskyddet i skalskyddet för militär materiel ligger mellan 0-25dB. Det kan dessutom finnas ett inre skärmskydd som förbättrar bilden betydligt. Civil materiel (datorer) har ofta dåligt eller inget skydd alls (0-10dB) och kan skadas vid mycket låga värden på den elektriska fältstyrkan. Militär materiel som har ett EMP-skydd och ett radarskydd (t ex flygplan och de robotar de bär) har ett skydd på i storleksordningen 20-40dB.

4. Telekrigföring

Tabell 4:7. Uppskattning av verkansavstånd för HPM. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

AVSTÅND EFFEKT	15 meter	500 meter	15 km
10 MW	Permanent skada	Störning	–
10 GW	Permanent skada	Permanent skada	Störning
10 GW, skärmverkan 30 dB	Permanent skada	Störning	–
10 GW skärmverkan 60 dB	Störning	–	–

Tabellen avser bakvägskoppling för föremål med olika grad av skärmverkan. Med en HPM-källa på 10 GW avses en stor militär källa som ett mark- eller fartygsbaserat HPM-vapen eller en stor HPM-bomb.

Tabell 4:8. Uppskattning av verkansavstånd för HPM-sabotage. Från "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd (2001)".

HPM-källa	AVSTÅND			
	Omedelbar närhet	15 meter	50 meter	500 meter
Bilburen (medels. källa)	Ej relevant	Permanent skada	Störning	Störning
Handburen (liten källa)	Permanent skada	Störning	Störning	Ingen effekt

Med handburen HPM-källa avses t ex en resväska.

I USA pågår projekt som syftar till att ta fram självskyddssystem för flygplan baserade på HPM. Systemet ska störa inkommande luftvärnsrobot. Mot andra typer av störsystem skulle ett sådant system kunna påverka alla typer av robotar vilket t ex laserstörsystem som bara kan påverka optiska målsökare inte gör (om det inte är en strukturförstörande laser). Systemet bedöms kunna vara operativt 2015.

En intensiv sektretessomgärdad forskning kring HPM-vapen har pågått under lång tid och det kan sägas att HPM-vapen nu är på väg att ta steget till operativa vapen från att förut endast varit prototyper. Vad gäller

användning mot luftvärn kan HPM-vapen komma att användas för att skydda flygfarkoster från inkommande vapen samt för SEAD. För SEAD bedöms främst vapen försedda med HPM-stridsdel användas men på UCAV kan det även användas från själva flygfarkosten. Inom militär fackpress finns idag en stark koppling mellan HPM-vapen och UAV:er som bärare av dessa. HPM-vapen är inte enbart användbara inom telekrig utan USA har även färdigutvecklat vapen inom 94 GHz-området som ska användas mot människor. Denna vapentyp orsakar stark smärta och ska kunna användas vid exempelvis kravallsituationer.

En bedömning är att HPM-vapen är fullt operativa inom 3–5 år. Redan idag finns i Tyskland en operativ störare inom sambandsområdet. Denna är dock avsedd för polisiär användning.