

Radarlära

3

Ordet radar är en förkortning av det engelska uttrycket ”Radio detection and ranging”, vilket fritt översatt innebär att med hjälp av radiovågor upptäcka ett föremål och bestämma avståndet till det. Radarprincipen innebär att en elektromagnetisk våg sänds ut och studsar på målet. Genom att mäta tidsdifferensen till ekot kommer tillbaka kan avståndet bestämmas. Hastighet på föremålet kan bestämmas genom att mäta frekvenskillnaden mellan utsänd och mottagen signal (den så kallade dopplereffekten). Detta var känt redan i slutet av 1800-talet men av praktiskt användbara radaranläggningar blev inte möjligt att konstruera förrän strax före andra världskriget.

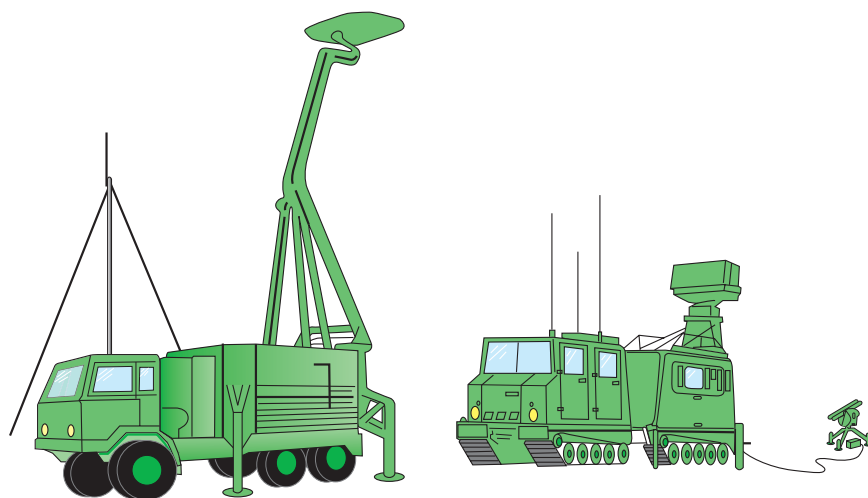


Bild 3:1. PS-70 och PS-91.

De elektromagnetiska vågor som används i radarsammanhang ligger betydligt högre i frekvens än de man oftast använder i radioutrustningar. Frekvensen brukar ligga någonstans i området 1-30 GHz, vilket ger våglängder mellan 30 och 1 cm. Dessa högfrekventa signaler brukar vanligtvis kallas mikrovågor.

3. Radarlära

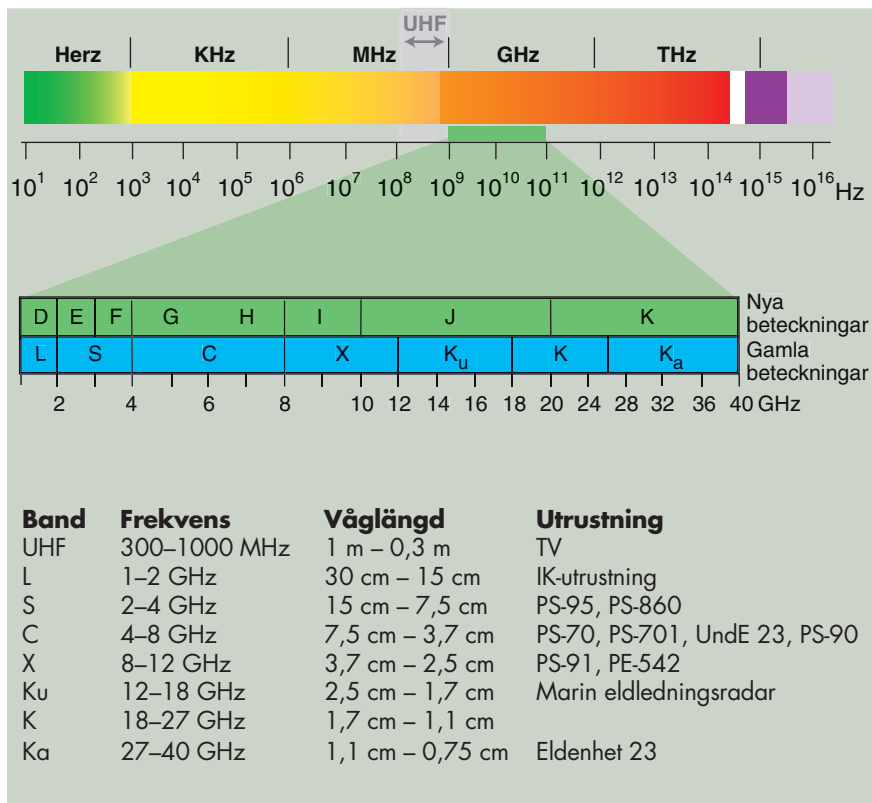


Bild 3:2. Radarns frekvensband.

Militära radarsystem används för många olika ändamål för att mäta avstånd, närmandehastighet och riktning till ett målobjekt t ex vid

- spaning
- inmätning- och eldledning
- belysningsändare för t ex semiaktiva robotar
- artillerilokalisering
- väderobservation
- navigering
- målsökning
- zonrör.

Det finns två olika huvudtyper av radar

- pulsradar
- CW-radar (continuous wave).

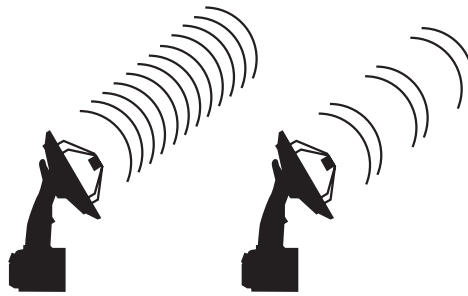


Bild 3:3. CW-radar och pulsradar.

Pulsradarn mäter vinkel och avstånd till målet. CW-radarn sänder en kontinuerlig signal och kan i sitt grundutförande mäta vinkel och hastighet på målet men inte bestämma avståndet. Det finns varianter såsom FM CW-radar som använder en frekvensmodulerad CW-signal vilket ger den viss förmåga att även mäta avstånd.

Faktorer som påverkar radarns räckvidd

Mikrovågor utbreder sig i atmosfären ungefär på samma sätt som ljus. Signaldämpningen är väderberoende och en radars räckvidd kan därför variera kraftigt mellan olika tidpunkter. Generellt påverkas mikrovågor betydligt mindre av vädret än vad ljus gör.

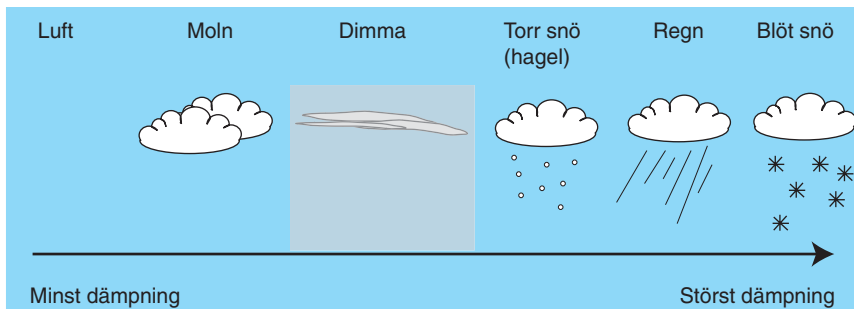


Bild 3:4. En radarsignal dämpas i atmosfären av vatten, vattenånga och gaser i luften.

Hög luftfuktighet ger högre dämpning än torr luft. Dämpningen är även våglängdsberoende, ju större våglängd, ju mindre är dämpningen. Ser man bara till räckvidden är en radar på S-bandet (10 cm) att föredra framför en på X-bandet (3 cm).

Vid vågutbredning i fri rymd kan radarräckvidden beräknas med hjälp av den så kallade radarekvationen. Den uttrycker hur mycket olika parametrar

som t ex effekt, antennvinst och våglängd inverkar på utbredningen. Att utföra en absolut räckviddsberäkning med hjälp av ekvationen är inte meningsfullt då alltför många ingående faktorer är svåra att uppskatta och den gäller i princip endast under ideala förhållanden. Vad den bör användas till är att se vilken inverkan exempelvis byte av pulslängd får på räckvidden under vissa givna förhållanden.

Radarekvation

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot SNR_{min} \cdot k \cdot T_{ekv} \cdot B_{br} \cdot L}} \Rightarrow$$

För en matchad mottagare gäller att $B_{br} = \frac{1}{t_p} \Rightarrow$

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot t_p \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot SNR_{min} \cdot k \cdot T_{ekv} \cdot L}}$$

R_{max} = radarns maximala räckvidd (m)

P_s = radarns uteffekt (W)

t_p = pulstid (s)

G = antennförstärkning (ggr)

λ = våglängd (m)

σ = radarmålarea (m²)

SNR_{min} = minsta signalbrusförhållande för att signalen ska detekteras (ggr)

k = Boltzmannskonstant $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)

T_{ekv} = ekvivalenta brustemperaturen (K)

B_{br} = Mottagrens bandbredd (Hz)

L = förluster (ggr)

Några slutsatser av ekvationen:

- För att fördubbla radarns räckvidd så måste uteffekten ökas 16 gånger.
- Radarns räckvidd kan ökas genom att öka sändpulsens längd men även här krävs 16 gånger så lång sändpuls för att fördubbla räckvidden.
- Att halvera minsta erforderliga signalbrusförhållande har samma inverkan som att fördubbla uteffekten.
- För att fördubbla räckvidden behöver antennförstärkningen öka 4 gånger.

Notera att

- ekvationen gäller för en puls i vakuum.
- med bibehållen antennstorlek så påverkar en ändring av våglängden direkt radarns antennförstärkning.
- atmosfärsförluster är starkt beroende av våglängden.

Antenn- och målhöjd

Mot föremål på låg höjd bestäms räckvidden till största delen av det som kallas radarhorisonten. På grund av jordytans krökning finns det en horisont som man inte kan se bortom. Hur långt bort den ligger beror dels på hur högt upp man befinner sig, dels hur högt det föremål man vill se befinner sig. Man brukar i dessa sammanhang tala om tre olika horisonter, den geometriska, den optiska och slutligen radarhorisonten.

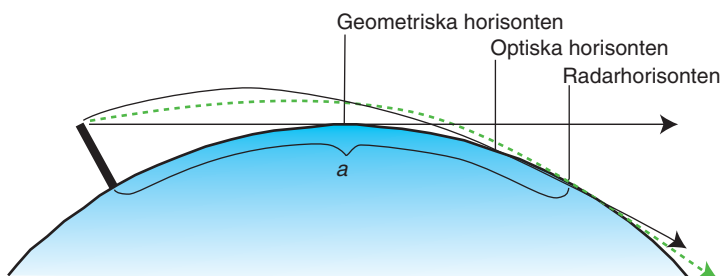


Bild. 3:5. Radarhorisonten jämförd med övriga horisonter.

Den geometriska horisonten kan beräknas rent matematiskt beroende på jordens omkrets. Både ljus- och mikrovågor bryts i atmosfären. Atmosfären har ett med höjden avtagande brytningsindex. Ett lägre brytningsindex medför högre hastighet för den elektromagnetiska vågen. Brytningen får till följd att de övre delarna av en vågfront som utbreder sig längs jordytan färdas fortare än de lägre delarna. Vågfronten ”tippar” framåt, utbredningsriktningen tycks följa jordytans krökning. Brytningsindex är frekvensberoende, därför kommer inte radarhorisonten och den optiska horisonten att hamna på samma ställe. Radarhorisonten ligger ca 15% längre bort än den geometriska horisonten, den optiska ligger ungefär mitt emellan de båda andra.

Avståndet (a) till radarhorisonten kan beräknas med formeln

$$a = k \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \text{ [km]} \text{ där}$$

k = konstant (Om konstanten sätts till 4,12 fås avståndet i kilometer.)

h_1 = radarantennhöjden i meter

h_2 = flygplanets höjd i meter

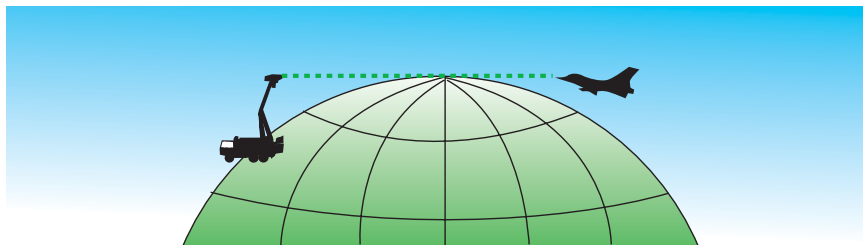


Bild 3:6. Radarhorisont.

Dessa beräkningar gäller vid ett tänkt normalförhållande som kallas standardatmosfär. I verkligheten är förhållandena annorlunda beroende på årstiden. Radarvågorna bryts oftast mer än i det teoretiska fallet och ger därmed helt andra räckvidder än i teorin. Hur lång räckvidden blir bestäms av luftens brytningsindex som bestäms av luftfuktighet, lufttryck och temperatur.

Konstruktionsprincip

En pulsradar kan konstrueras på olika sätt beroende på en mängd olika faktorer men den består i grunden av följande beståndsdelar: antenn, sändare, mottagare, sändning/mottagningsväxel (S/M-växel) och en eller flera indikatorer.

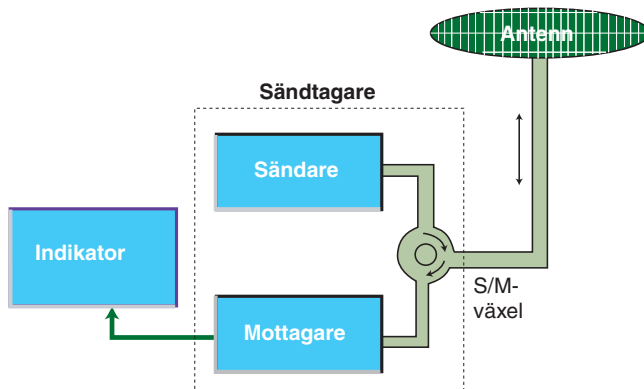


Bild 3:7. Pulsradarns principiella uppbyggnad.

S/M-växeln ser till att den utsända signalen går till antennen och att den mottagna signalen går från antennen till mottagaren. Sändare, mottagare och S/M-växel sitter oftast monterade tillsammans i en enhet som kallas sändtagare. Mellan antennen och sändtagaren leds mikrovågorna i en s k vågledare, oftast i form av rektangulära rör. Vågledare används eftersom de dämpar signalerna mindre än kablar.

CW-radar och bistatisk radar har ingen S/M-växlare utan använder separata sändar- och mottagarantenner.

Radarns arbetsprincip

Avståndsmätning

Den vanligaste radartypen är pulsradarn. Som namnet antyder skickar den ut mikrovågor i form av pulser i luften. Vågorna reflekteras mot föremål och studsar tillbaka som ett eko. Hastigheten hos elektromagnetiska vågor är samma som ljusets (c). Genom att mäta tiden (t) från det en utsänd puls lämnar radarn tills den kommer tillbaka, kan man avgöra avståndet (a) till det föremål den reflekterats mot med hjälp av formeln:

$$a = \frac{c \cdot t}{2} \quad [\text{m}]$$

där c = ljusets hastighet ($3 \cdot 10^8$ m/s).

För att med säkerhet kunna upptäcka ett föremål krävs att det träffas av flera pulser. Radarn sänder därför kontinuerligt ut pulser med ett visst tidsintervall, som benämns radarns pulsrepetitionsintervall (PRI) och mäts i sekunder. Ofta används benämningen pulsrepetitionsfrekvens (PRF) där man istället anger antal pulser per sekund. Det är bara ett annat sätt att uttrycka samma sak. De olika tidsbegreppens inbördes förhållanden visas i bild 3:8.

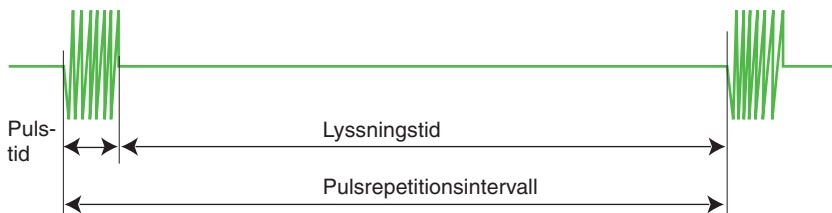


Bild 3:8. Definition av olika pulsparametrar.

Pulstiden är den tid själva sändpulsens varar. Pulsrepetitionsintervallet definieras som tiden från en pulsstart tills nästa puls börjar, dvs en arbetscykel hos radarn. Förhållandet mellan dessa båda tider är inte skalenligt ritat i bild 3:8. I verkligheten är pulstiden ungefär en tusendel av pulsrepetitionsintervallet. Begreppet lyssningstid är den tid under vilken mottagaren kan samla in information.

Två sätt att variera tiden mellan sändpulserna benämns PRF-växling och staggered PRF.

PRF växling



Samma avstånd mellan pulserna. PRF byts varje antennvarv eller efter ett bestämt antal pulser.

Staggered PRF



Avståndet mellan pulserna varierar mellan varje puls.

Bild 3:9. PRF-moder.

Upptäcktssannolikhet

När ett eko kommer tillbaka till radarns mottagare sker signalbehandling och förstärkning. Om signalnivån når över en detekteringströskel så kommer det att presenteras på radarns indikator som ett eko. Ju närmare mottagarbruset som tröskeln kan placeras desto känsligare blir radarn.

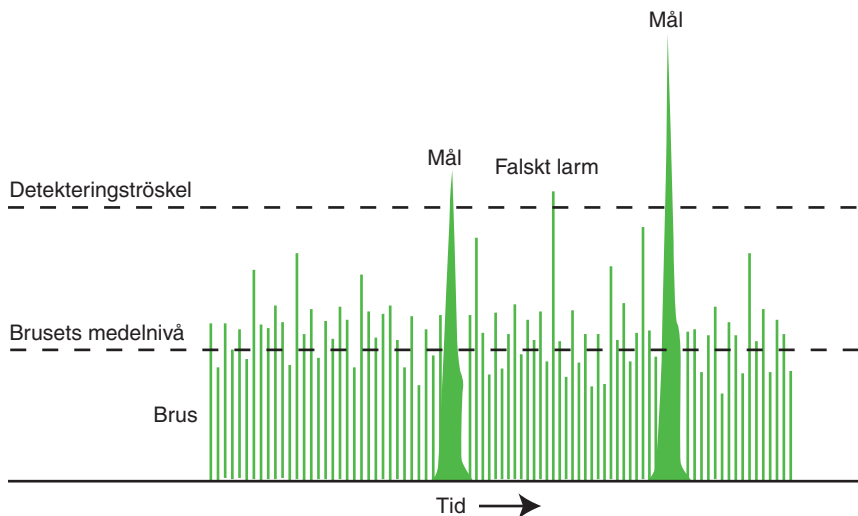


Bild 3:10. För att en signal ska presenteras måste den komma över radarns detekteringströskel.

Nackdelen med att sätta tröskeln alltför nära brusets medelnivå är att brus-toppar kommer att ge upphov till falska ekon.

Var tröskeln ska placeras beror dels på vilken upptäcktssannolikhet (P_d) och vilken falsklarmssannolikhet (P_{fa}) som kan accepteras. Vad som är acceptabla nivåer beror på vilken typ av radar det är och till vad den används. I luftvärnets radarstationer kan detekteringströskelns höjd påverkas genom funktionen KFA. Denna funktion styr avståndet mellan brusets medelnivå och tröskeln.

Upptäcktssannolikhet anger sannolikheten i procent för att ett mål inom radarns räckvidd ska upptäckas av operatören. Upptäcktssannolikheten påverkas av flera parametrar bl a utsänd energi, hur radarekona presenteras, målets storlek, utrustningens skick och inte minst operatörsfaktorn, vanligen definierad som skillnaden mellan en ideal och en verklig operatör. En dåligt inställd mottagare eller indikator ger dåliga prestanda och därmed både låg upptäcktssannolikhet och kort räckvidd.

Automatisk måluppfångning och följning används i modern utrustning. Hög upptäcktssannolikhet ger tyvärr också hög risk för falsk målfångning av störekon och överbelastning av datorer eller operatör.

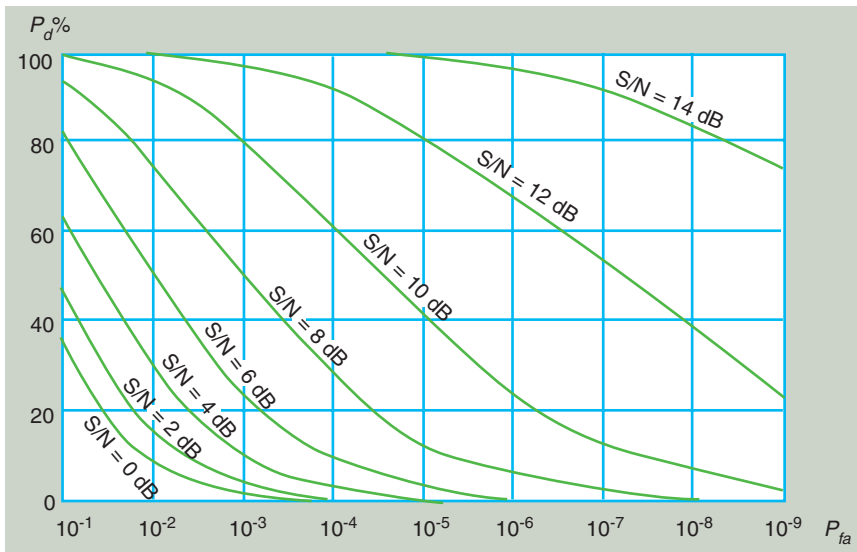


Bild 3:11. Upptäckts sannolikheten (P_d) och falsklarmssannolikheten (P_{fa}) påverkas av radarns minsta signalbrusförhållande (S/N).

Radarmålarea

Radarmålarean (σ) anger i genomsnitt hur stor skenbar yta som återutsänder radarsignalen i riktning mot radarantennen. Radarmålarean beror på målets storlek, form, reflektivitet och i vilken riktning signalen reflekteras (direktivitet). Ett mål, t ex ett flygplan, består av en stor mängd delreflektorer. Vågor som reflekteras mot olika delar kommer interferera konstruktivt i vissa riktningar och destruktivt i andra, radarmålarean varierar därför kraftigt i olika riktningar. Radarmålarean påverkas även av radarns våglängd.

Man kan aldrig ange en radars räckvidd eller upptäckts sannolikhet utan att ange mot vilken radarmålarea som avses.

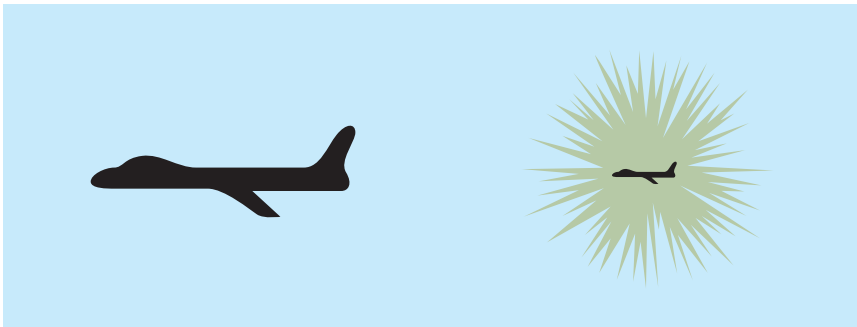


Bild 3:12. Ett mål består av en stor mängd delreflektorer. Radarmålarean i olika riktningar beror på hur signalerna interfererar med varandra.

Att skilja mellan rörliga och stillastående mål

Ett flygplan som rör sig mot radarn kommer vid varje puls att möta radarvågen på ett nytt ställe. Ibland möter den vågen där den går uppåt, i andra fall när vågen sjunker. Man säger att signalen får olika faslägen (bild 3:13.)

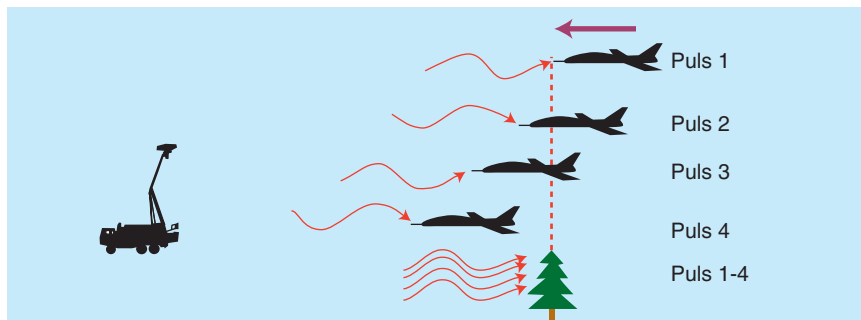


Bild 3:13. Ett rörligt mål träffas hela tiden av olika faslägen hos signalen. Ett stillastående mål träffas alltid av samma fasläge.

Avståndet mellan ett stillastående föremål och en radar är ett visst antal våglängder. Det får då vid varje mätning (på samma frekvens) alltid bara plats ett visst antal våglängder mellan radarn och föremålet. Föremålet kommer vid varje puls att träffas av samma del av vågen, t ex vågtoppen och får därmed samma fasläge vid varje puls.

I MTI-filtrets skillnadskrets (bild 3:14) subtraherar man fasläget för puls 1 med fasläget för puls 2. Fasläget för puls 2 subtraheras med puls 3 osv. Ett markeko har alltid samma fasläge. Man upptäcker då att signalen från skillnadskretsen blir noll eftersom fasläget från puls 1 minus puls 2 blir noll, $2-3=0$ osv.

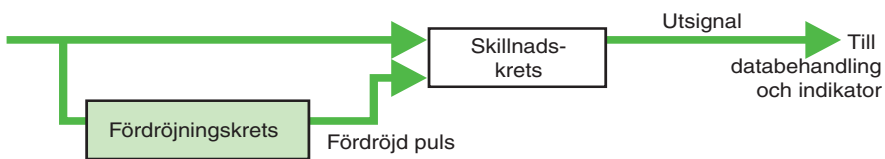


Bild 3:14 MTI-filter.

Från skillnadskretsen kommer det rörliga ekots signaler att vara skilda från noll, eftersom fasläget hela tiden varierar. På detta vis kan radarn ta bort markekona och bara presentera rörliga ekon.

Det beskrivna filtret kan endast sålla bort ekon med nollhastighet. Så snart ett träd vajar i vinden skulle det presenteras. Genom att kaskadkoppla (seriekoppla) flera filter och återkoppla utsignalen kan man få en bättre filterkaraktistik (bild 3:15). Detta gör det möjligt att undertrycka alla ekon som färdas under en viss skänshastighet, exempelvis 10 m/s.

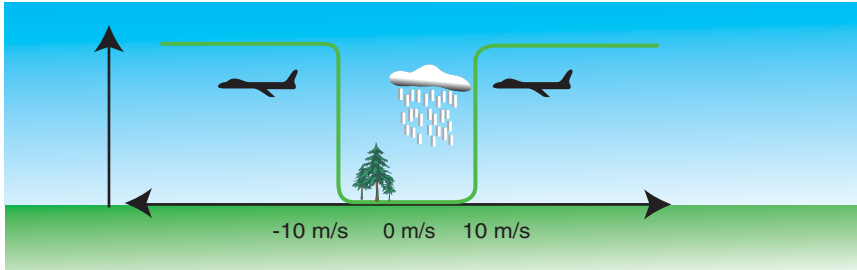
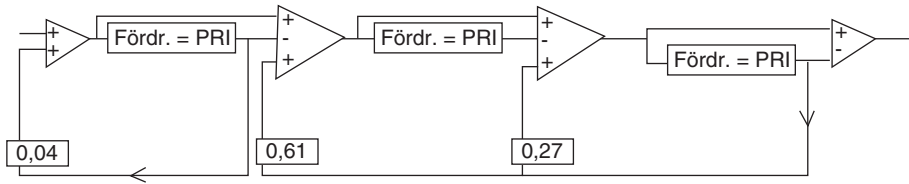


Bild 3:15. Verkligt MTI-filter kan undertrycka ekon som färdas med en fart under filtrets gränshastighet.

Hastighetsmätning

Ett måls hastighet mot eller från radarn kan mätas genom att man bestämmer den frekvenskillnad som uppstått hos ekot från ett rörligt eko p g a den s k dopplereffekten med hjälp av formeln

$$f_d = \frac{2 \cdot V_r}{\lambda}$$

f_d = frekvenskillnaden mellan utsänd och mottagen signal [Hz]

V_r = radiell hastighet [m/s]

λ = våglängden [m]

Den minsta hastighetsförändringen som kan detekteras beror på hur länge målet belyses, den s k integrationstiden. Ju längre integrationstid (t_{int}) desto mindre dopplerrörelser (Δf_{dmin}) kan detekteras.

$$\frac{1}{t_{int}} = \Delta f_{dmin}$$

Detta kan jämföras med när man fotograferar, ju längre slutartid desto tydligare syns det om ett föremål rör sig men i gengäld svårare att bestämma dess exakta position.

Entydig avståndsmätning

Pulsreplikationsintervall (PRI) väljs beroende på hur lång räckvidd man vill att radarn ska ha. Från det att en puls sänts ut tills nästa sänts iväg, hinner signalen färdas en viss sträcka. Med hjälp av ljusets hastighet och PRI kan den totala gångsträckan mellan två pulser beräknas. Genom att halvera

3. Radarlära

värdet får man fram det maximala avståndet som sändpulsen hinner nå ut till och tillbaka före nästa puls sänds ut. Det avståndet kallas radarns entydighetsavstånd (R_{entyd}) eller instrumenterad räckvidd.

$$R_{entyd} = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad [\text{m}]$$

Begreppet entydighetsavstånd kan kräva en närmare förklaring. Då flera pulser sänds ut efter varann kan det vara svårt att avgöra från vilken sändpuls ett eko härrör. Det förutsätts att en ekopuls är resultatet av den senast utsända pulsen och radarn kan alltså inte skilja mellan ekon från olika sändpulser. Ett eko från en tidigare puls kommer därför att registreras på ett kortare avstånd än det verkliga och sådana falska ekon kallas andragångs-ekon. Radarn kan bara presentera sann information inom sitt entydighetsavstånd men signalerna kan ofta nå betydligt längre. Det kan därför uppstå avståndstvydigheter.

Entydighetsavståndet kan ses som radarns maximala avståndsgräns men det finns även ett minsta mätavstånd (R_{min}). Detta är beroende av sändpulsens längd. Så länge en puls är på väg ut från sändaren kan inga ekopulser nå mottagaren p g a S/M-växeln. Vilket avstånd detta motsvarar kan beräknas med hjälp av pulslängden eller pulstiden (t_p).

$$R_{min} = \frac{c \cdot t_p}{2} \quad [\text{m}]$$

En kort puls ger följaktligen ett kort minsta mätområde. En vanlig pulslängd hos en luftvärnsradar är tre mikrosekunder vilket ger ett minsta mätavstånd på 450 meter.

Radarns instrumenterade räckvidd bestäms av pulsrepetitionsintervallet. När det gäller radarns verkliga räckvidd är den bl a beroende av sändarens uteffekt. Man talar här om två olika effektbegrepp, pulseffekt (toppeffekt) och medeleffekt. Deras inbördes förhållanden visas i bild 3:16.

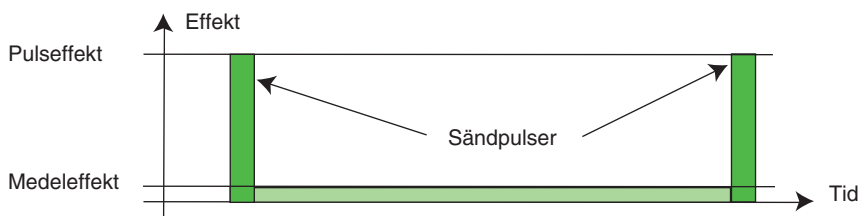


Bild 3:16. Begreppen pulseffekt och medeleffekt.

Varje puls har ett visst energiinnehåll som representeras av den ritade pulsens yta. Den beräknas som pulseffekten (P_{puls}) multiplicerat med pulslängden (t_p). Det är den utsända energin som bestämmer radarns maximala

räckvidd. Den utsända energin kan också uttryckas som medeleffekt vilket är pulsens energi utslagen över hela pulsrepetitionsintervallet. Medeleffekten (P_{medel}) kan beräknas med följande formel:

$$P_{medel} = \frac{t_p \cdot P_{puls}}{PRI} \quad [\text{W}]$$

Medeleffekten brukar vara ungefär en tusendel av pulseffekten. Det är inte i första hand toppeffekten som bestämmer radarns räckvidd utan medeleffekten. Vill man ha stora räckvidder väljs långa pulser och låg PRF för att inte överstiga sändarens maximala medeleffekt.

Avståndsupplösning

En radarpuls kan ses som ett energipaket med en viss längd som färdas genom luften. Pulsen har en fram- och en bakkant och varje del av pulsen reflekteras successivt mot målet. Ekopulser kan därför aldrig bli kortare än sändpulsens (bild 3:17). Ligger två mål nära varann i avstånd kan framkanten av ekopulsen från bortre målet hinna före bakkanten på ekopulsen från det mål som ligger närmare. Ekopulserna flyter då samman i luften och när de kommer tillbaka till radarn kan mottagaren inte skilja dem åt, utan de uppfattas som ett enda långt eko.

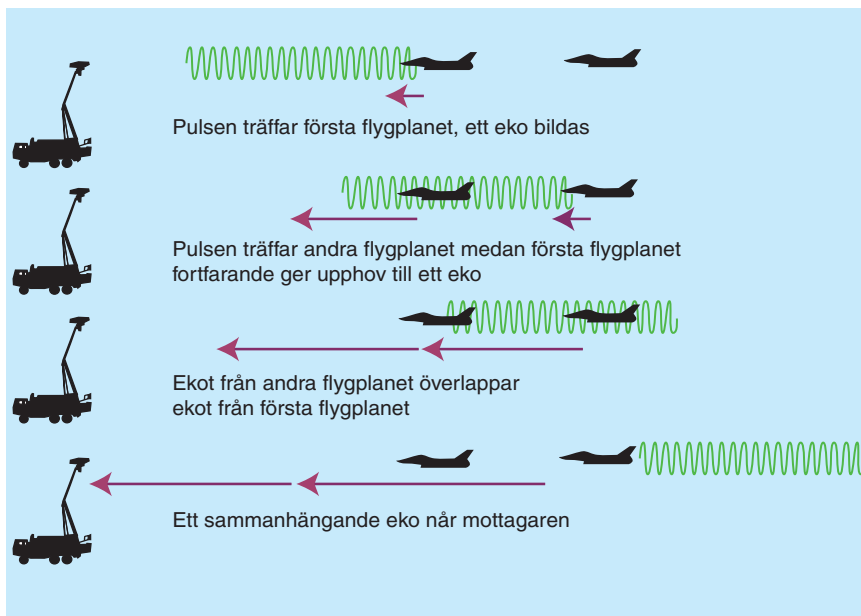


Bild 3:17. Avståndet mindre än halva pulslängden. Ekona kan inte särskiljas i radarn.

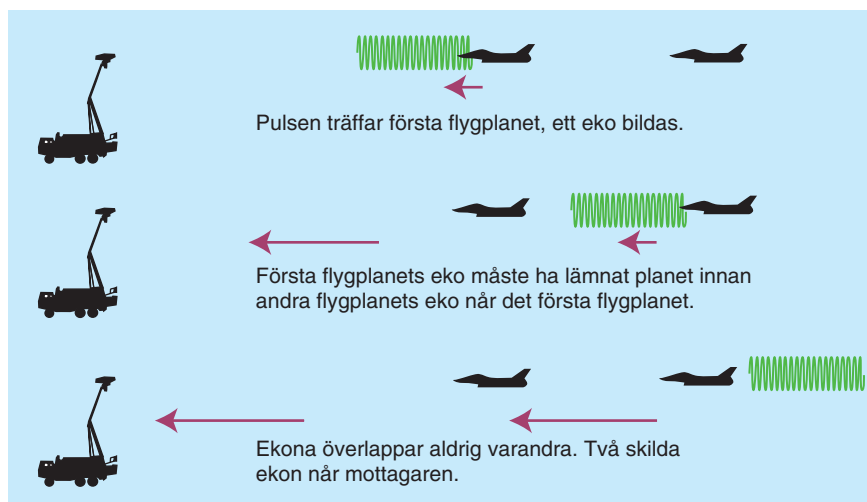


Bild 3:18. Avståndet större än halva pulslängden.

Den minsta avståndsskillnad mellan två mål som radarn kan uppfatta kallas radarns avståndsupplösning (jämför bild 3:17 med bild 3:18). Två föremål kan särskiljas om ekot från det främre flygplanet har slutat att bildas då ekot från det bakre flygplanet når det främre planet. Ekona överlappar således inte varandra. Föremålen kan särskiljas då avståndsskillnaden är större än halva pulslängden.

Exempel 3:1 Minsta mätavstånd PS-70 mod 40 km

Pulsens längd i meter fås som ljushastigheten (m/s) multiplicerat med pulstiden (s).

Med en pulstid på tre mikrosekunder fås en pulslängd på 900 m. Radarns avståndsupplösning blir då 450 m.

Kort puls används främst på små avstånd där upplösningen är viktig och man vill ha ett litet minsta mätavstånd. Om man minskar pulslängden minskar pulsens energiinnehåll. För att få starkare och tydligare ekon brukar därför PRF ökas för att bibehålla samma medeleffekt. Vill man ge radarn bättre räckvidd genom ökning av pulslängden måste också pulsintervallet göras längre. Dels för att inte få avståndstvetydigheter och dels för att inte sändarens maximala medeleffekt ska överskridas.

Långa pulser ger större ekon vid presentation på råvideo och på äldre typer av indikatorer och gör det därmed lättare för operatören att upptäcka mål men i gengäld blir det svårare att särskilja närliggande radarekon. Det är därför mycket viktigt att radarns inställningar väljs beroende på vilken information man önskar.

Pulskompression

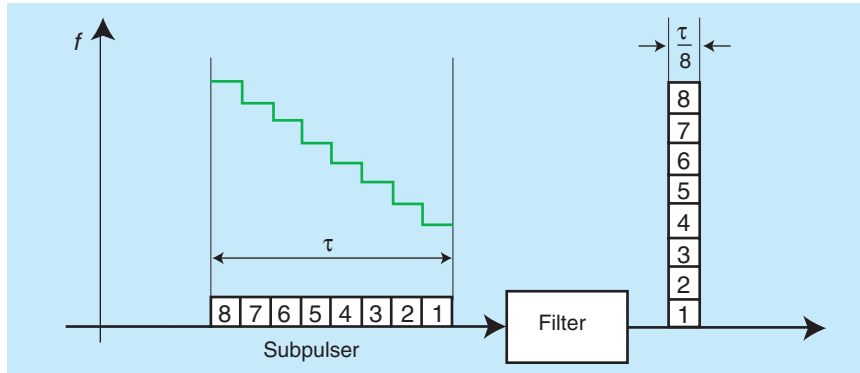


Bild 3:19. Princip pulskompression. Frekvensen ökas stegvis när pulsen sänds ut. Ekot kommer tillbaka till mottagaren. I filtret fördröjs subpulsen med frekvens 1 mest, subpulsen med frekvens 2 hinner då ifatt 1, 3 hinner ifatt 2 osv. Efter filtret fås en utsignal med längden av en subpuls. Amplituden hos utsignalen kommer att bestå av summan av de åtta subpulsernas amplitud.

Pulskompression är en metod för att få god avståndsupplösning trots att radarstationen använder långa pulser för att få stor räckvidd. Principen är att en lång modulerad puls sänds ut. När ekot kommer tillbaka så fördröjs framkanten av pulsen mer än bakkanten. Detta leder till att pulsen komprimeras. Avståndsupplösningen kommer på detta vis att bli att uppgå till halva pulslängden hos *den komprimerade* pulsen.

En fördel med pulskompression är att radarstationerna inte behöver använda så höga topp effekter vilket gör att den blir svårare att upptäcka för motståndarens radarvarnare och signalspaningsmottagare.

Två huvudsakliga metoder används för pulskompression

- linjär frekvensmodulation (FM)
- binär fasmodulering.

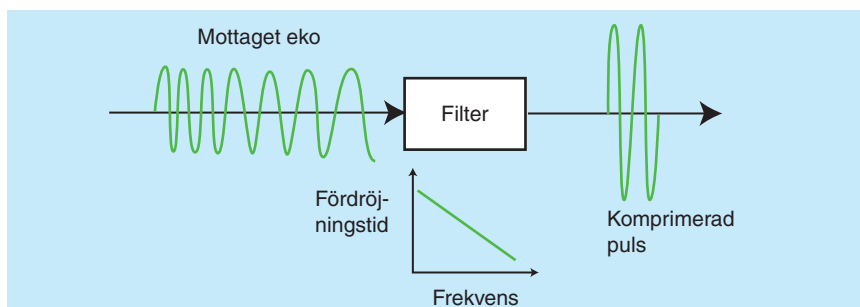


Bild 3:20. Pulskompression med linjär frekvensmodulation (chirp). Filtret fördröjer den först anlända lågfrekventa delen av pulsen mest. Pulsens högfrekventa bakre del hinner nästan ifatt den främre delen – pulsen komprimeras.

Linjär frekvensmodulation

Linjär frekvensmodulering eller varianter därav (chirp) används i LvKv samt i JA 37 Viggen och många andra typer av jaktflygplan. Principen är att när den långa pulsen sänds ut ökas frekvensen successivt (bild 3:20). Den först utsända delen av pulsen har följaktligen lägst frekvens. Eftersom signalen färdas lika fort oberoende av frekvens så kommer den först mottagna delen av pulsen fortfarande att ha lägst frekvens.

I mottagaren får ekopulsen passera det sk pulskompressionsfiltret. Detta har den egenskapen att det fördröjer låga frekvenser mycket medan höga frekvenser fördröjs lite. Detta innebär att bakkanten på pulsen nästan hinner i fatt framkanten då pulsen passerar igenom filtret, pulsen komprimeras (bild 3:21). Den komprimerade pulsens amplitud ökar när pulsen komprimeras så att energin före och efter filtret är konstant. Den komprimerade pulsens högre amplitud kommer sedan att vara lättare att detektera i signalbehandlingen.

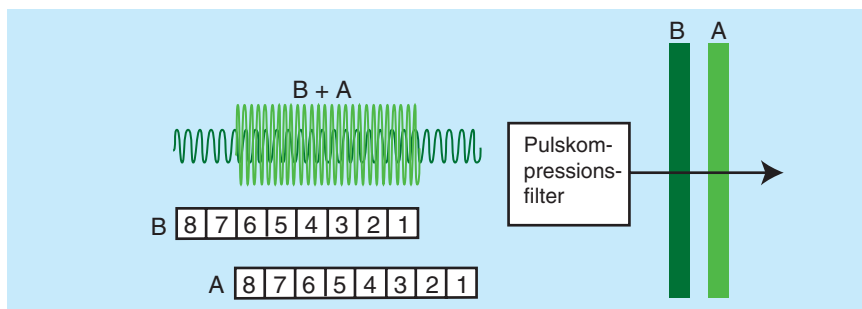


Bild 3:21. Pulskompression och avståndsupplösning. Två mål med ett inbördes avstånd av en subpuls blir belyst av en lång frekvensmodulerad puls. Efter filtret kan de åtskiljas.

Avståndsupplösningen kommer att vara halva den komprimerade pulsens längd. Därför kommer två mål att kunna särskiljas även om de samtidigt har belysts av den långa sändpuls.

Binär fasmodulering

Binär fasmodulering är en annan vanlig metod för pulskomprimering. Metoden används av PS-90, PS-91 och UndE 23. Principen för en sändpuls indelad i tre subpulser visas i bild 3:22. I verkligheten kan sändpulsens bestå av hundratals subpulser. Vid sändning fasvänder den långa sändpuls 180° på vissa ställen som bestäms av en kod. Man säger att den långa pulsen delas in i subpulser. När ekot kommer tillbaka till mottagaren så får det gå in i ett pulskompressionsfilter. Filtret består av ett skiftregister, seriellt in och parallellt ut. På vissa av utgångarna sitter en fasvridning (betecknas med R) som fasvänder signalen 180°. Signalerna från de olika ”facken” i filtret summeras

slutligen och bildar en summasignal. Steg för steg skiftas pulsen in i filtret. Efter varje steg läses summasignalen av på utgången.

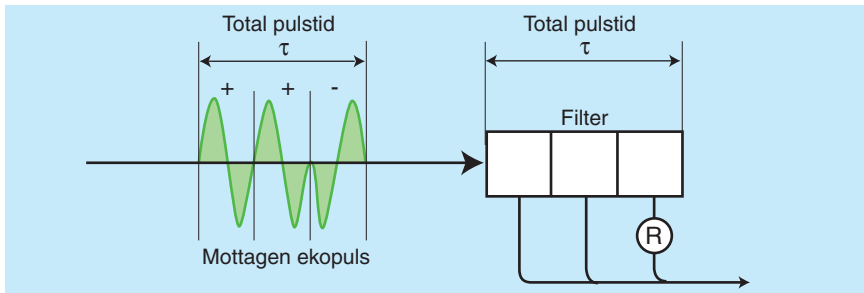


Bild 3:22. Pulskompression med binär fasmodulering. Pulsen består av tre stycken subpulser. Minustecknet anger att signalen i denna subpuls är fasvriden. Bokstaven R anger att utsignalen från denna del av filtret kommer att fasvridas 180° före den summeras.

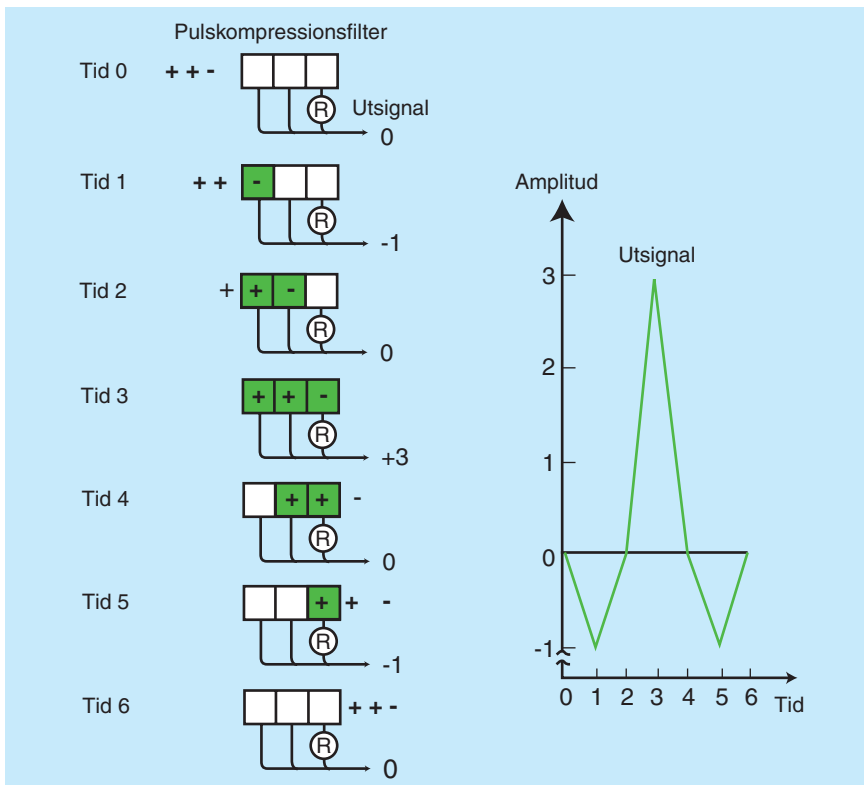


Bild 3:23. Binär fasmodulering. Förloppet visar då en mottagen puls steg för steg skiftas in i pulskompressionsfiltret. Endast vid ett tillfälle kommer pulsens kod samverka med filtrets fasvridare (R) så att en kraftig puls erhålls som utsignal. Denna komprimerade puls kommer förhoppningsvis att vara betydligt kraftigare än bruset varvid målet kan detekteras.

När den långa pulsen steg för steg skiftas in respektive ut ur registret fås olika utsignaler ur filtret. Utsignalen är låg utom vid ett kort tillfälle då hela pulsen befinner sig i filtret då en kort kraftig puls erhålls under en tid som motsvarar längden av en subpuls. Vid de andra tillfällena kommer de olika fasvridningarna hos subpulserna att motverka varandra.

När pulsen komprimeras kommer dess amplitud att öka i motsvarande grad som pulsen förkortas så att energin i pulsen är konstant. Ekot kommer på detta vis att höja sig över bruset.

Längden på subpulserna är konstant. I radarstationerna varierar däremot antalet subpulser beroende på vilken mod radarn använder. Många subpulser behövs då man vill ha lång räckvidd. Då radarn använder ett kort mätområde så används ett mindre antal subpulser för att inte få ett alltför långt minsta mätområde eftersom mottagaren måste vara avstängd då pulsen sänds iväg. I PS-90 varierar antalet subpulser mellan 13 och 35 beroende på radarmod.

Radaranterner

För att kunna avgöra ett radarekos position måste man förutom avståndet känna till i vilken riktning sändpulsens skickats iväg. Radaranterner har till skillnad från t ex radioanterner en större riktverkan, dvs strålningen koncentreras i främst en riktning. Det kan jämföras med en strålkastares förmåga att koncentrera ljuset åt ett visst håll. På samma sätt som strålkastarens reflektor ger en ljuskägla samlas mikrovågorna från radaranterner i något som kallas lob. Lobens form har stor betydelse för radarns prestanda. En viktig egenskap hos antennen är dess riktverkan (direktivitet). Som ett mått på riktverkan används begreppen antennvinst eller antennförstärkning. Med detta avses hur mycket antennen koncentrerar signalen jämfört med en rundstrålande antenn s k isotropantenn. Antennvinsten är proportionell mot förhållandet mellan dess storlek och våglängden

$$G = 4\pi \frac{A_e}{\lambda^2}$$

G = antennförstärkning

A_e = effektiv antennarea (m²)

λ = våglängd (m)

Ju större antennen är i förhållande till våglängden desto högre antennförstärkning har den. Ett typiskt värde för en spaningsradar är 30 dB (1000 gånger).

Det går inte att skapa en antenn som koncentrerar all effekt i en riktning eftersom vågor alltid ger upphov till diffraktionsfenomen bl a vid kanten av reflektorn. Det finns inte heller några absoluta avgränsningar för radarloben.

För att kunna ange lobvinklarna mäts den maximala effekten ut från antennen på ett visst avstånd. Antennen vrids därefter och lobvinkeln anges som vinkeln mellan de antenneriktningar där maxvärdet sjunkit till hälften (-3 dB).

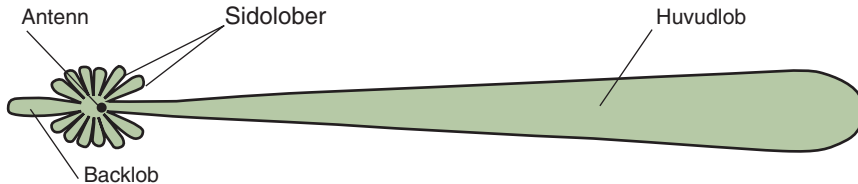


Bild 3:24. Exempel på ett lobdiagram sett i horisontalplanet.

Antennen är riktad åt höger i bild 3:24. Den riktning dit större delen av effekten koncentreras kallas huvudloben. Effekten sprids även i andra riktningar, så som sekundära lobber. Den kraftigaste uppträder normalt i motsatt riktning mot huvudloben och kallas backlob. De övriga är av varierande storlek och brukar kallas sidolober. Radarn har ingen möjlighet att avgöra från vilken av loberna en ekopuls härstammar, utan förutsätter alltid att det är från huvudloben. Om en stark signal kommer in från en annan riktning än huvudloben kan det ge upphov till falska ekon.

Ju mindre lobvinkel desto bättre riktverkan har antennen och ger därmed ofta längre räckvidd.

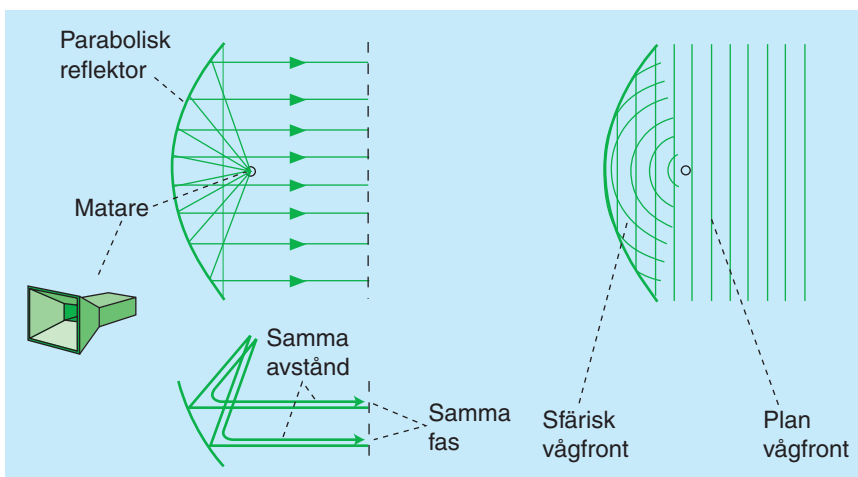


Bild 3:25. Mataren är placerad i parabolens fokus. Utanför det så nära fältet finns en plan vågfront där alla vågor är i fas.

En typisk antenn består av ett vågledarhorn en s k matare placerad i reflektorns fokus och belyser reflektorn med en sfärisk vågfront (bild 3:25). Matarens strålningsvinkel är avpassad så att den täcker hela reflektorytan. Parabolens geometriska egenskaper är sådana att avståndet från fokus (mataren) via en reflektion mot reflektorn och till ett tänkt tvärställt plan framför reflektorn är det samma oavsett vilken punkt på reflektorn som används. Det innebär att delreflektionerna från reflektorns alla punkter ligger i fas i detta plan. Vidare sker reflektionen så att ett parallellt "strålknippe" bildas på samma sätt som vid en optisk strålkastare.

Omvänt förlopp sker vid mottagning varvid ekoeffekten koncentreras mot reflektorn till mataren där den kommer att fasriktigt summeras. Det är värt att notera att en antens egenskaper uppstår genom interferens mellan vågorna. Samma princip gäller oavsett vilken typ av elektromagnetiska vågor det är. Liknelsen med en ljusstrålkastare är därför helt korrekt. Vad som är avgörande för antennens egenskaper är förhållandet mellan våglängd och aperturens storlek.

$$\Theta \sim \frac{\lambda}{L} \quad \text{där}$$

Θ = lobvinkeln [rad]

λ = våglängd [m]

L = aperturens längd [m]

Radarns förmåga att särskilja två föremål i vinkelled bestäms av antennens lobvinkel. För att radarn ska kunna särskilja två föremål som befinner sig på samma avstånd, måste de vara separerade minst en lobbredd i sidled.

När loben träffar ett föremål kommer en ekopuls att skickas tillbaka till radarn. Förloppet upprepas för varje sändpuls så länge föremålet befinner sig inom loben. Radarn kan inte avgöra var i loben ekot befinner sig utan förutsätter att det är i huvudlobens centrum. Därför kommer ett ekos utbredning i sida alltid att vara minst lika brett som loben vid presentation på råvideon. Antennens horisontella lobvinkel tillsammans med rotationshastigheten och PRF bestämmer hur många sändpulser som träffar ett radareko. Ju fler träffar, ju kraftigare blir ekot och därmed lättare att upptäcka. Typiska värden är att målet träffas av 15–30 pulser varje gång en spaningsradars lob sveper över det. Dessutom gäller att ju längre tid målet belyses desto bättre kan målets dopplerhastighet bestämmas. Detta är särskilt viktigt då man vill kunna detektera en hovrande helikopter.

Detta medför också att det inbördes avståndet mellan två ekon på samma avstånd från radarn måste vara större än lobvinkeln. Är det mindre än så kommer ekona att flyta samman till ett enda eko vid presentationen.

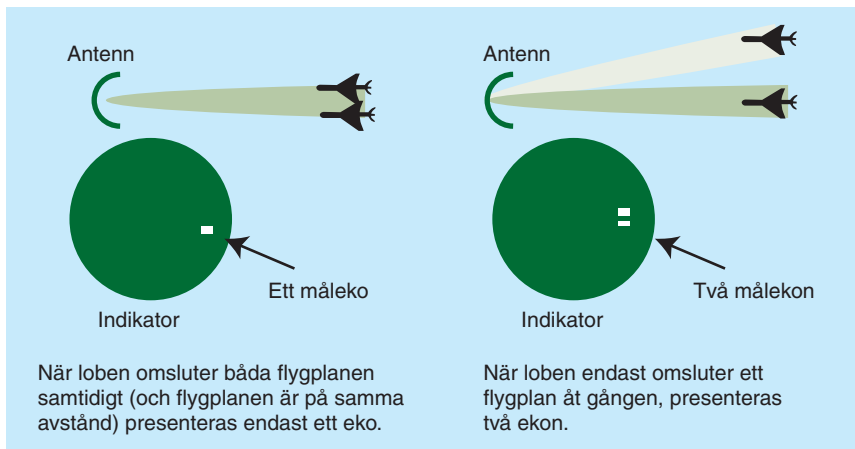


Bild 3:26. Vinkelupplösning.

Lobvinkeln är en konstant vilket i sin tur innebär att lobens bredd uttryckt i meter blir större ju längre bort från antennen man kommer. Två radar-ekon som sammanfaller på ett visst avstånd från radarn, kommer därför att kunna särskiljas då de kommer närmare radarn, även om deras inbördes avstånd inte förändrats. Vad som ofta bestämmer valet av våglängd är dess påverkan på antennstorleken. I ett jaktflygplan eller en robot måste våglängden vara kort annars blir vinkelupplösningen allt för dålig.

Exempel 3:2

Kan PS-90 med $1,9^\circ$ lobvinkel särskilja två flygplan som flyger på samma avstånd (40 km) separerade 1 km i sida?

Lösning

Antennloben är $1,9^\circ$ vilket motsvarar $17,5 \cdot 1,9 = 33,25$ streck. $33,25$ streck $\cdot 40$ km = 1330 m

Svar

Nej, det hade krävts att flygplanen befunnit sig minst 1 330 meter separerade i sida. Observera att om två flygplan flyger på skilda avstånd (>100 m) i PS-90 så kan radarn skilja dem åt även om de samtidigt finns inom radarloben. Se avsnittet om avståndsupplösning.

Störskyddsegenskaper

Antennens förmåga att förstärka ekosignalen och undertrycka oönskade signaler är det kanske viktigaste störskyddet i en radar.

En spaningsradarantenn konstrueras så att den utsända/mottagna loben blir en smal skiva med så tydligt markerade gränser som möjligt.

Trots detta läcker antennen en viss mängd energi även i andra riktningar. Dessa riktningar benämns sido- och backlober.

3. Radarlära

Bild 3:27 visar, sett uppifrån, exempel på ett typiskt antenndiagram för en spaningsradar och visar hur mycket sido- och backloberna dämpas i förhållande till huvudloben.

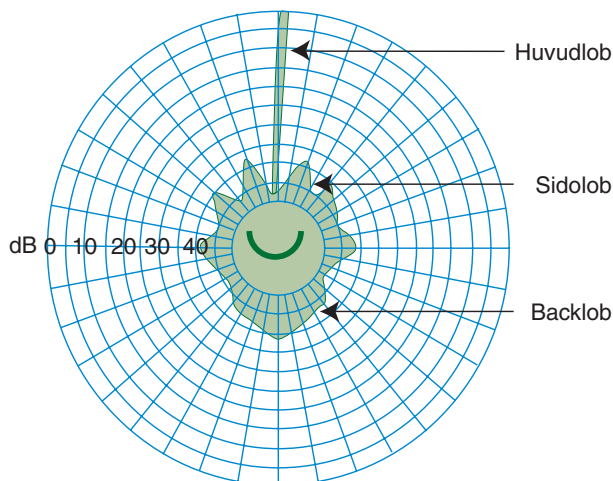


Bild 3:27. Exempel på antenndiagram sett uppifrån.

Ur antenndiagrammet (bild 3:70) fås följande slutsatser:

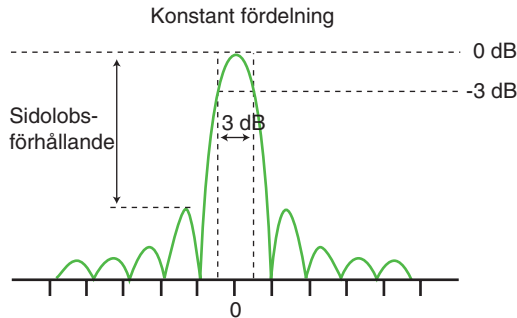
- Radarns vinkelupplösning är 2° . Den bestäms av huvudlobens bredd. Huvudloben får inte omsluta båda planen samtidigt.
- Hur mycket energi som läcker i sido- och backlob i förhållande till huvudlobens styrka $-10 \text{ dB} = 1/10$, $-20 \text{ dB} = 1/100$, $30 \text{ dB} = 1/1000$ osv.
- Signaler som kommer in via sido- och backloberna förstärks 10 000 till 100 000 gånger mindre än en signal i huvudloben. En störsändare som stör från dessa riktningar måste vara tiotusen till ett hundratusen gånger så stark för att uppnå samma verkan som en störsändare som befinner sig inom huvudloben.

För att kunna inse hur telestörning påverkar en radarstation är det viktigt att förstå vilka egenskaper en radarantenn har.

En antenn som vid sändning läcker mycket energi åt sekundära riktningar är också mottaglig för störning från dessa bäringar.

Om en viss del av effekten läcker åt sidorna blir det möjligt att med signalspaning fastställa radarns läge med hjälp av energin från sido- och backloberna oberoende av i vilken riktning huvudloben pekar. Sido- och backloberna används även av anfallande SSARB för att styra mot radarn. En optimal radarantenn bör följaktligen sända all sin energi i en smal lob, så att ingen energi går förlorad i någon annan riktning. Elektroniskt styrda

antennor (t ex PS-91) består egentligen av en stor mängd mindre antenner vilka tillsammans bildar en resulterande lob. I dessa antenner har konstruktören stor möjlighet att bestämma hur antenndiagrammet ska se ut beroende på hur antennelementen placeras. Elektroniskt styrda antenner uppvisar därför ofta mindre sidolober än reflektorantennor (t ex PS-70).



Strålningsfördelning	Konstant		Parabolisk		Taylor	
	Rekt	Cirk	Rekt	Cirk	Rekt	Cirk
Ant. format	Rekt	Cirk	Rekt	Cirk	Rekt	Cirk
Sidolobsförhåll (dB)	13,2	17,6	20,6	24,6	30	30
Lobvinkel 3 dB (grader)	$51\lambda/L$	$58\lambda/L$	$66\lambda/L$	$104\lambda/L$	$64\lambda/L$	$67\lambda/L$
Lobvinkel vid 60 cm apertur och 3 cm våglängd	$2,55^\circ$	$2,90^\circ$	$3,30^\circ$	$5,02^\circ$	$3,20^\circ$	$3,35^\circ$

Bild 3:28. Hur jämnt antennens apertur utstrålar/mottar signalen påverkar sidolobsförhållandet och lobvinkeln. (Rekt = rektangulär antenn. Cirk = cirkulär antenn.)

Antennens sidolober kan minskas kraftigt om strålningseffekten minskas gradvis mot aperturens kanter, s k tapering. I mottagningsfallet svarar det mot att känsligheten hos de yttre elementen är reducerad. För en reflektorantenn innebär detta att mataren belyser mitten av reflektorn mer än dess kanter. Nackdelen är att hela aperturens yta inte används lika effektivt, en minskning av sidoloberna får därför belastas med en något bredare huvudlob.

Några olika antenntyper

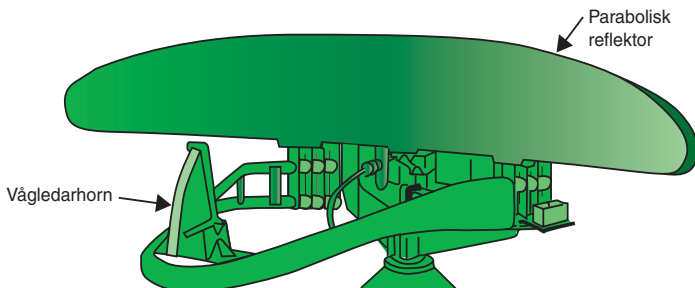


Bild 3:29. Reflektorantenn till en militär spaningsradar.

Det finns flera olika typer av radarantennerna t ex reflektorantennerna, slitsantenn och elektroniskt styrda antenner. Reflektorantennen består av ett vågledarhorn, en skåpmat, som med hjälp av en reflektor koncentrerar loben i önskad riktning. Funktionen kan närmast jämföras med de parabolantennerna som används för satellitmottagning av TV-kanaler även om reflektorn har en annan form.

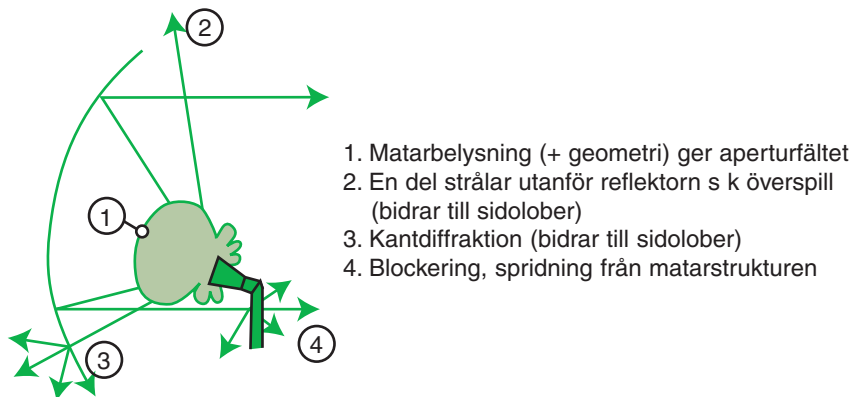


Bild 3:30. Matarens placering har stor påverkan på reflektorantennens egenskaper.

För reflektorantennen är det av stor betydelse hur mataren är konstruerad och placerad. Om små sidolober önskas ska så lite energi som möjligt hamna utanför reflektorn eller vid dess kanter. Alla matare har nackdelen att de i någon mån också skymmer (blockerar) reflektorn. Detta minskar antennens effektiva area något.

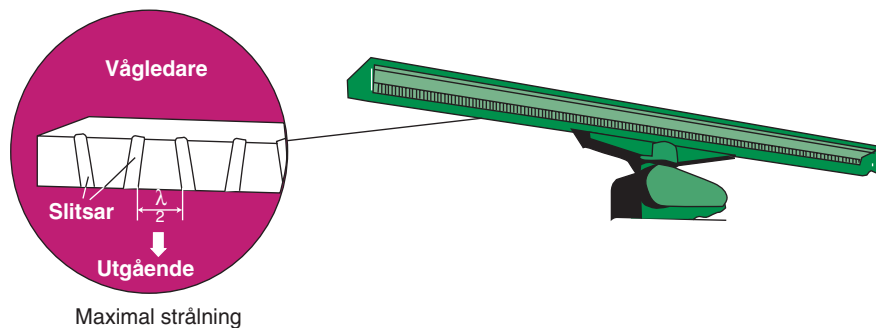


Bild 3:31. Slitsantenn med detalj av den slitsade vågledaren.

Slitsantennen består av en horisontell vågledare som man skurit upp en serie slitsar i där mikrovågorna kan passera. Varje slits utgör en egen liten antenn och när de utsända vågorna interfererar erhålls en koncentration av strålningen i en bestämd riktning.

Höjdmätning

Eldledningsradar, t ex PE 542 och eldenhet 23, använder en smal pennlob. Antennen kan vinklas i höjded. Genom att bestämma höjdvinkeln då loben pekar mitt på målet och bestämma avståndet så kan höjden beräknas.

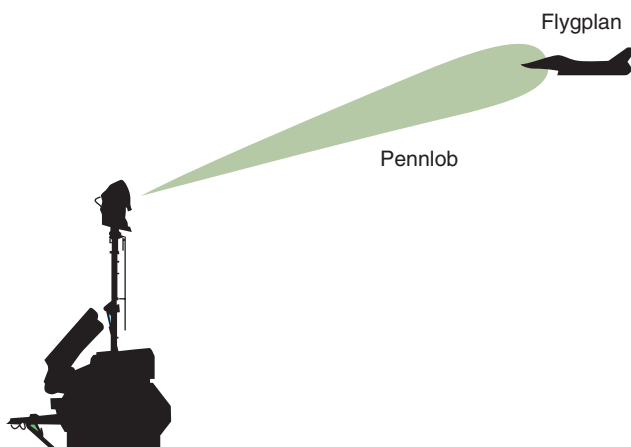


Bild 3:32. Eldledningsradarns antenn sänder ut energi i en sk pennlob.

Spaningsradarns antennlob sedd från sidan

Spaningsradarstationer använder en sk skivlob. En spaningsradar som t ex PS-70 vet normalt sett inte på vilken höjd som målet befinner sig. Den kan endast avgöra att målet finns i loben och på vilket avstånd. Man brukar säga att det är en 2D- radar (två dimensioner-sidvinkel och avstånd).

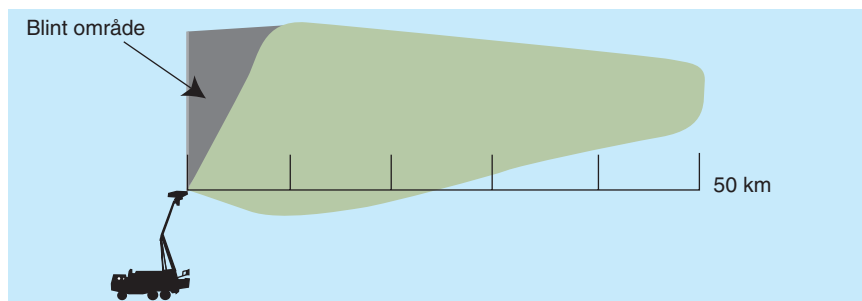


Bild 3:33. Skivlob hos en spaningsradar.

Den typ av antenn som t ex PS-70 och de flesta spaningsradar använder kallas cosec²-antenn ("cosekant kvadratantenn") efter det matematiska uttrycket $\text{cosec} = 1/\sin$, som antenndiagrammet beskriver i bild 3:33. Med en cosec²-antenn fås samma ekostyrka för ett mål, på en viss höjd, oberoende av avståndet mellan mål och antenn, radarn får med andra ord konstant höjdtäckning oberoende av avstånd. Antennen bör konstrueras så stationen både har god låg- och höghöjdstäckning. Antennloben bör därför gå nära marken samt ha en stor sköppningsvinkel så att loben snabbt når höjd.

I antenndiagrammet i bild 3:33 ser man att loben delvis går under horisontlinjen. Antennen konstrueras på detta vis för att man vill kunna gruppera stationen högt utan att flyget ska kunna smyga sig under antennloben. Nackdelen med att loben riktas nedåt är att det kan uppstå fler markekon.

Höglob/Låglob

Det är svårt att konstruera en antenn som samtidigt kan belysa mål både på låg och på hög höjd (bild 3:34). I PS-90 är detta löst genom att använda två olika antennlobar, höglob och låglob. Detta ger också möjligheter att få viss höjdinformation ifall målet syns i låglob och/eller höglob.

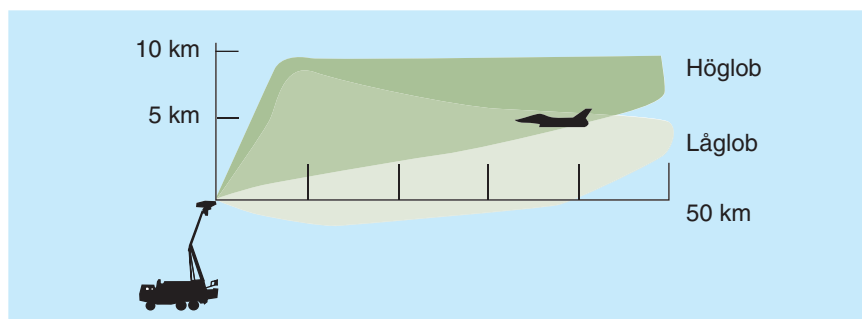


Bild 3:34. PS-90 höjdmätning.

Radarn sänder vartannat varv i låglob, vartannat i höglob. Om målet endast syns de varv då radarn sänder i låglob flyger målet lågt, om det både syns

då radarn sänder i låg- och- höglob så befinner det sig på medelhöjd o s v. I bild 3:34 finns flygplanet i båda loberna. Man brukar säga att PS-90 är en 2,5D radar, dvs den har en viss uppfattning om målets höjd.

De två antennloberna skapas genom att stationen matar ut effekten till antennen från två olika sk matare, vartannat antennvarv. Omkopplingen mellan de två loberna sker med hjälp av en lobomkopplare som finns placerad på baksidan av antennen.

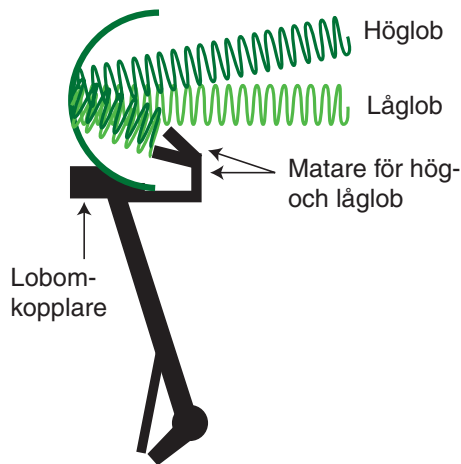


Bild 3:35. PS-90 lobstyrning

Elektroniskt styrda antenner

För att radarstationerna ska kunna ange målets position i tre dimensioner måste loben kunna styras i höjddled. Detta har sedan länge gjorts i eldledningsradarstationer genom att antennen kunnat vridas så väl i sidvinkel som i höjdvinkel. Genom att peka på målet med en smal lob och mäta avstånd samt antennens sidvinkel och höjdvinkel har målet positionsbestämts i x-, y- och z-led.

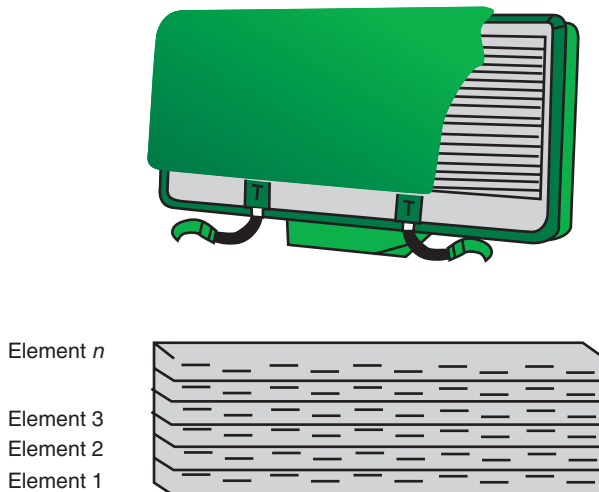


Bild 3:36. PS-91 antennen består av ett antal antennelement staplade ovanpå varandra (vågledarkombinat).

3. Radarlära

En modernare metod än att vrida hela antennen är att elektroniskt styra antennlobens riktning. Detta används i PS-91 och UndE 23. Dessa radarstationer har en antenn som roterar i sida på traditionellt vis. Men antennloben styrs elektriskt i höjddled. Principen är att antennen består av en mängd mindre antennelement.

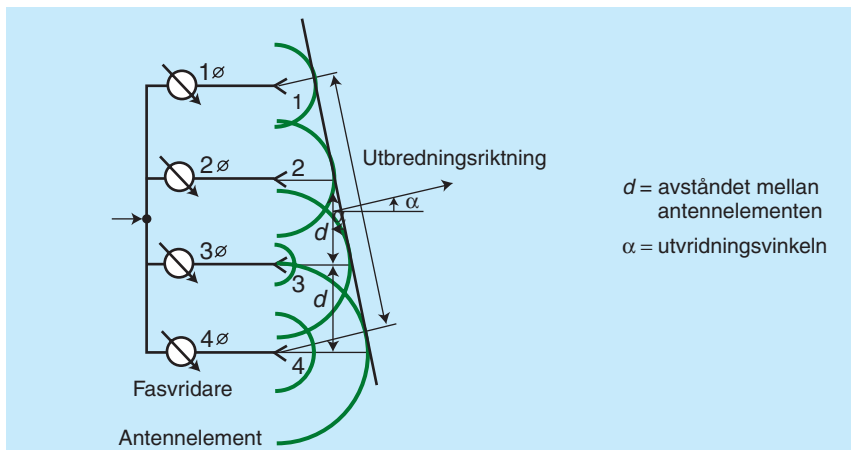


Bild 3:37. Princip elektroniskt styrd antenn.

I höjddled kan man individuellt påverka utsignalerna från de olika antennelementen så att det uppstår en fasskillnad mellan de olika signalerna. Genom interferens mellan de olika signalerna kommer de att förstärkas varandra i en riktning och det blir i denna riktning loben pekar.

Loberna behöver inte tvunget skapas vid sändning. Man kan också skapa loberna vid mottagning genom att bilda en summasignal från de olika antennelementen. Före summeringen fasvrider man signalerna olika mycket från de olika mottagarna. I PS-91 skapas en lob i en viss höjdvinkel redan vid sändning (nio lober).

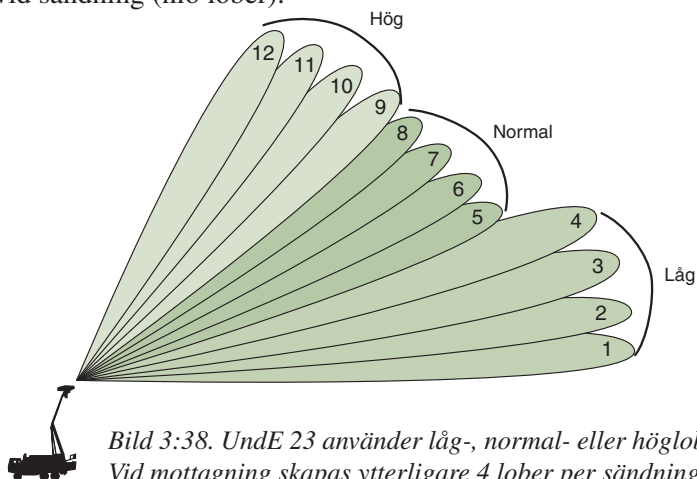


Bild 3:38. UndE 23 använder låg-, normal- eller höglob vid sändning. Vid mottagning skapas ytterligare 4 lober per sändningslob.

I UndE 23 däremot bildar man vid sändning en lob som kan ha någon av tre lägen, låg-, normal- eller höglob. Vid mottagning delas denna lob sedan i flera mindre lobber för att få en avsevärt exaktare höjdmätning.

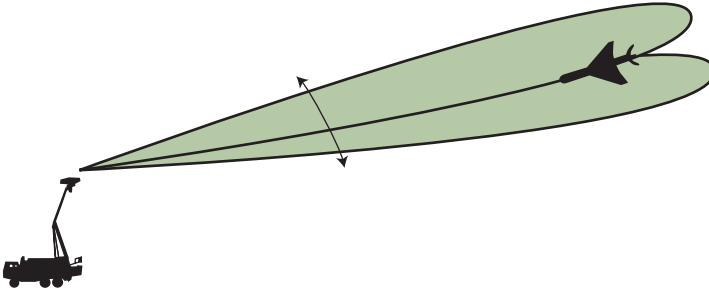


Bild 3:39. Finföljning. Loberna justeras så att målet placeras i skärningen mellan två lobber.

För att ytterligare förbättra höjdmätningen så kan ett antal av målen finföljas. Detta görs genom att radarn styr två lobber så att målet finns i skärningen mellan dem. Målet ger då upphov till lika stark signal i båda mottagarloberna. På det här viset kan målet följas mycket exakt i höjddled.

Fördelen med att ha bred lobvid sändning och dela upp loben vid mottagning är att målet kommer att belysas under längre tid vilket ökar radarns känslighet. Särskilt ökar förmågan att upptäcka små dopplerförändringar vilket är ett krav för att detektera helikoptrar.

Det finns även radarstationer som elektriskt kan styra antennloben i både höjd och sida. Ett exempel på detta är artillerilokaliseringsradarn ARTHUR.

Helikopterkanal

Helikopterkanalens uppgift är att detektera hovrande helikoptrar. Problemet med helikoptrar som står still och hovrar är att dopplerfiltren riskerar att sorterar bort dem som markekon.

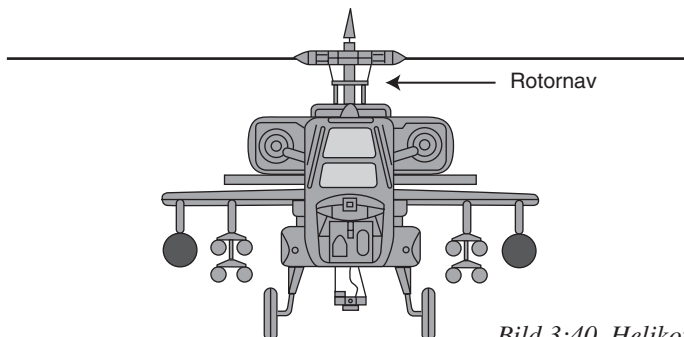


Bild 3:40. Helikopterdetektering

Helikopterkanalen har förmågan att känna igen de visserligen små men karakteristiska dopplerförändringar hos ekot som de roterande delarna i rotorn ger upphov till.

Det är inte själva rotorbladen som är enklast att detektera, utan de vertikala stängerna i rotornavet. PS-701, PS-90, PS-91 och UndE 23 har helikopterkanaler som ska hitta de roterande delarna i rotornavet. Spaningsradarn PS-95 i luftvärnskanonvagnen (LvKv) har både förmågan att hitta rotornavet och de svagare signalerna från rotorbladen. För att hinna belysa rotorbladen tillräckligt länge så använder denna radar en betydligt bredare lob än vad de andra stationerna gör.

Helikopterdetektering

Rotornavets radarmålarea är storleksordningen $0,3 \text{ m}^2$ d v s tio gånger mindre än det "normalmål" mot vilket radarns räckvidd är specificerat (3 m^2). Denna minskning av radarmålarean avspeglar sig i räckvidden hos hkp-kanalen (minskning med tio gånger ger 56% av ordinarie räckvidd).

Ett praktiskt exempel på detta är PS-90 där helikopterkanalen är verksam ut till 25 av maximalt 50 km.

På helikoptrar som utvecklats på senare tid och "stealth-anpassats" ses också tydligt hur rotornavet i möjligaste mån byggts in eller täckts med olika kåpor för att undgå de radarstationer vilka är utrustade med rotornavsdetektion.

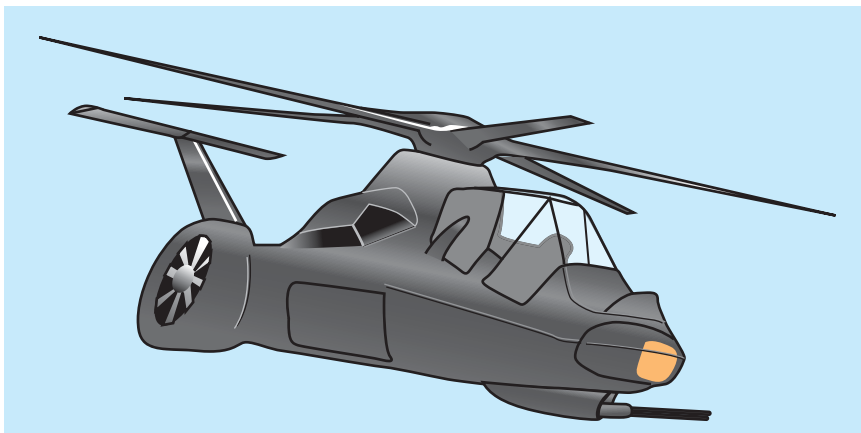


Bild 3:41. AH-66 Commanche.

Detektion av hovrande helikoptrar är även möjlig genom att nyttja de korta och kraftiga ekon som rotorbladen ger upphov till typisk radarmålarea för rotorblad 10 m^2 . Dessa ekon uppträder dock enbart i det ögonblick då något eller några av rotorbladen står exakt vinkelrätt mot den belysande radarn.

Periodiciteten hos dessa ekon kommer alltså att direkt bero på antalet rotorblad samt den hastighet med vilken rotern roterar.

Två exempel på tidsperiod mellan de ögonblick då rotorbladen står i ”rätt” läge är 35 ms (hkp 9) och 26 ms (Mi-24), vilka kan ses som normalfall.

Dock förekommer extremer som hkp 3 och MD-500 med 99 respektive 12 ms mellan bladekona. Detta motsvarar alltså 10 resp 83 ekon per sekund.

Varaktigheten för rotorekon är ca 0,2 ms. Tiden ökar med ökande våglängd hos den belysande radarn varför en lägre sändfrekvens är att föredra hos den radar vilken avses att utrustas med bladekodetektion. S-band är lämpligt med hänsyn till våglängd och att även antennens storlek ökar med ökande våglängd.

Detektionen av rotorbladsekon kräver således att rotorbladet står vinkelrätt mot den mätande radarn en eller flera gånger under den tidsperiod då helikoptern befinner sig inom radarns antennlob samt att en eller flera utsända pulser hinner träffa rotorbladet innan det hinner rotera vidare. Detta kräver en radar med *lång övermålningstid* och en *hög PRF*.

Den långa övermålningstiden löses genom antingen en långsam antennrotation hos den aktuella radarn (ger lång uppdateringstid) eller en, i sidled, bred antennlob. Det senare försämrar vinkelnoggrannheten/vinkelupplösningen.

Den höga PRF:en som krävs kan i sin tur ge begränsningar för det maximala entydighetsavståndet (jmf avsnittet Andragängenruntekon).

Ett exempel på tillämpning av rotorbladsdetektion återfinns hos PS-95, vilken förutom den vanligt förekommande rotornavsdetektionen (PS-701, 90, 91 och UndE-23), även har en speciell signalbehandlingskanal för detektion av rotorbladsekon.

PS-95 har en övermålningstid på 60 ms och PS-90 har 5,3 ms. PS-95 längre tid åstadkoms genom att en bred antennlob nyttjas.

För att åtgärda nackdelen med den sämre vinkelupplösningen delas den mottagna signalen upp i två mottagarlobber vilkas huvudriktningar är skiljda några grader i sida. De mottagna signalerna kan sedan, med monopulsprincipen (jämförelse av amplituden i de olika loberna), ge en exaktare riktning till den hoverande helikoptern.

PS-95 har en PRF på ca 9 kHz vilket teoretiskt begränsar det maximala entydighetsavståndet till drygt 16 km. Instrumenterad räckvidd för PS-95 är 14,1 km.

3. Radarlära

I bild 3:42 ses tydligt vilken av radartyperna som har möjlighet/är lämplig att detektera ekon från rotorblad. Dessutom framgår att helikoptrar med enbart två rotorblad och en långsam rotorhastighet, i ogynnsamma fall, kan undgå att detekteras av bladkanalen hos PS-95.

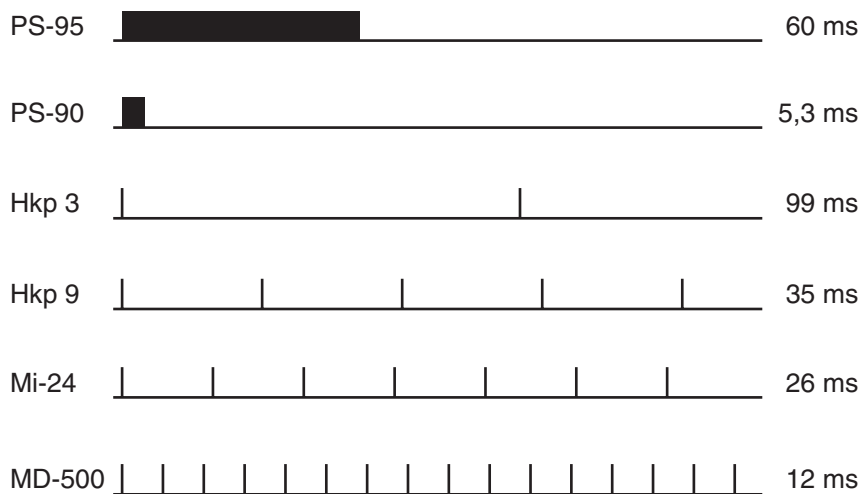


Bild 3:42. Övermålningstider för PS-95 och PS-90 samt periodiciteten för bladekon hos några utvalda helikoptertyper.

Faktorer som påverkar radarns prestanda

Störningar och falska radarekon

På grund av yttre omständigheter kan radarbilden ibland störas av falska ekon som försvårar tolkningen av informationen. Det finns olika typer av störningar men har man väl lärt sig känna igen dem är de ofta relativt enkla att skilja från verkliga ekon. Flera av störningarna beror på olämplig placering av radarantennen, varför det är viktigt att ta hänsyn till bl a träd, master och skorstenar.

Blinda sektorer och falskekon beroende på reflektion i närliggande objekt

Blinda sektorer uppstår då en radarantenn sitter placerad lägre än t ex en höjd. Allt bakom höjden kommer då att ligga i radarskugga och inga ekon presenteras. Genom att hålla reda på var de blinda sektorerna finns kan man få en god bild av radarns verkliga täckningsområde.

Vissa falska ekon dyker ibland ändå upp i de blinda sektorerna. Detta beror på att en kraftig signal kommit in via en av antennens sidolober.

Sidolobsekon

Radarantennerna är inte ideala utan sprider effekten även utanför huvudloben. Kraftiga ekon i närområdet kan därför detekteras i de svagare sidoloberna. Indikatorn förutsätter att alla ekon härrör från huvudloben och de presenteras därför i den riktningen. Av sidoloberna är den sk backloben ofta kraftigast. Det är vanligt att falska ekon uppträder just där.

Mycket kraftiga ekon kan också detekteras i de något svagare sidoloberna och presenteras som en serie ekon runt den egna positionen på samma avstånd. Bästa sättet att ta bort dem är med hjälp av funktionen närekodämpning.

Andragångenrunt ekon (andrasvepsekon)

Ett eko som egentligen härrör från en sändpuls kan tas emot under nästa lyssningstid. Följden blir att ekot presenteras under ”fel” radarsvep och på fel avstånd, betydligt närmare än det verkliga ekoavståndet. Sådana andragångenrunt ekon kan vara svåra att skilja från verkliga ekon i närområdet.

Bästa sättet att avgöra om ett eko är äkta eller härrör från tidigare sändpulser är att byta PRF. Verkliga ekon ligger då kvar på samma avstånd medan andragångenrunt ekon flyttas. Luftvärnets radarstationer har en PRF som ständigt varierar, vilket medför att andrasvepsekon alltid presenteras på varierande avstånd från svep till svep vilket gör att de oftast sällas bort i radarns signalbehandling.

Interferens

När flera radaranläggningar som arbetar på samma frekvensband befinner sig nära varandra kan de utsända pulserna från en radar gå in i en annan radars mottagare och presenteras som ekon. Anläggningarnas PRF är sällan lika så dessa falska ekon kommer hela tiden att visas på varierande avstånd i takt med antenntrotationen. Resultatet blir en störning i form av ett antal streckade linjer i ett spiralformat mönster från centrum till bildrörskanten. Även egen radioutrustning kan ibland orsaka samma typ av störningar.

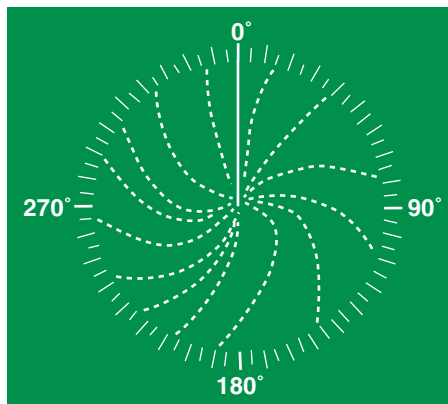


Bild 3:43. Interferens.

Att helt ta bort interferensstörningar är svårt på äldre anläggningar men genom att ändra PRF kan man få störningsmönstret att byta utseende och kanske minska problemen. En modern indikator med raster scanteknik har ofta en svepkorreleringsfunktion. Eftersom störekona hela tiden varierar i avstånd kan den funktionen ta bort dem nästan fullständigt.

Radarns funktion – PS-70

PS-70 används här som exempel på olika funktioner hos en radar. PS-70 är visserligen en äldre radar utan pulskompression och elektroniskt styrd antenn. Men trots detta har den många principer gemensamt med de moderna radarstationerna.

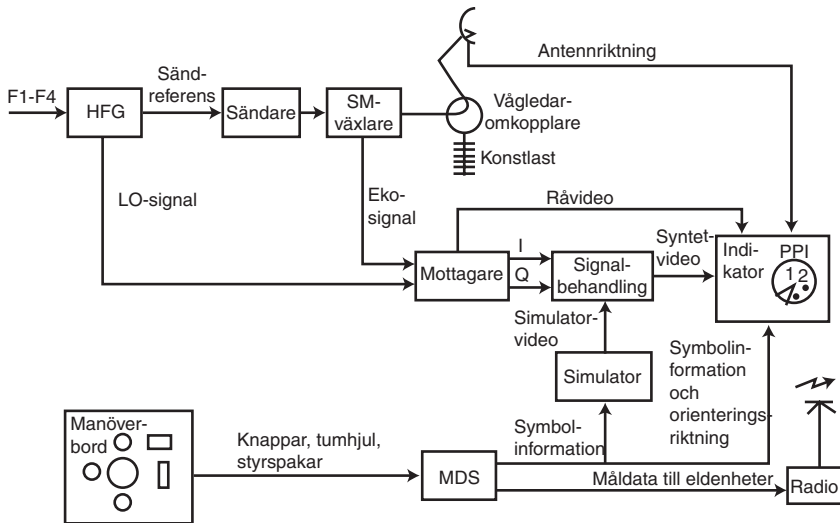


Bild 3:44. Blockschemat över PS-70-funktionen i stort.

Sändning

På manöverbordet väljs en av de fyra sändfrekvenserna F1-F4 (bild 3:44).

I högfrequensgeneratoren (HFG) börjar då en av fyra oscillatorer att svänga och alstrar en högfrekvent signal. Signalen har en frekvens i området 5,4-5,9 GHz men den har låg effekt. Signalen leds därför vidare till SÄNDAREN* där den förstärks mycket kraftigt. I sändaren bildas en puls med ca 12000 W toppeffekt och med den frekvens som signalen från HFG har.

Sändaren kan kopplas från med knappen RRTY på manöverbordet.

På väg mot antennen passerar pulsen först S/M-VÄXLAREN vars uppgift är att skydda mottagaren från att skadas av den mycket kraftiga sändpulsens. Om VÅGLEDAROMKOPPLAREN står i läge ANTENN kommer pulsen att ledas upp till antennen och sändas ut i luften. Om vågledaromkopplaren står i läge KONSTLAST skickas pulsen inte ut i luften utan blir i stället till värme i den sk konstlasten.

* Ord skrivna med versaler syftar på beteckningar i schemabilderna eller fysiska knappar/vred i radarstationen.

Mottagning

En ekopuls når radarns MOTTAGARE via antennen, vågledaromkopplaren och S/M-VÄXLAREN. I mottagaren sker en första förstärkning av ekot. Eftersom det innebär vissa nackdelar att signalbehandla mycket högfrekventa signaler omformas ekosignalen först till en lägre frekvens med hjälp av en LO- signal (lokaloscillator) från HFG:en. Signalerna till RÅ-VIDEON leds sedan direkt till INDIKATORN.

För att sälla bort markekon och minska påverkan av störning leds ekosignalen till SIGNALBEHANDLINGEN. I signalbehandlingen finns bl a MTI kretsarna som tar bort stillastående ekon, KFA-kretsarna med vars hjälp man kan minska mängden falsk ekon samt kretsar för att presentera störbäring. Från signalbehandlingen leds den s k SYNTETVIDEON till INDIKATORN. På indikatorns syntetvideo presenteras rörliga målekon och störbäringar.

Måldatasändaren - MDS

MDS har till uppgift att känna av läget hos bl a styrspakar och knappar för att via radio eller tråd sända ut korrekta målkoordinater till eldenheterna. Det ska observeras att MDS inte vet var det finns ekon utan kan bara känna av läget på de symboler som operatörerna lägger ut. MDS ska alltså betraktas som ett system skilt från den egentliga radarn.

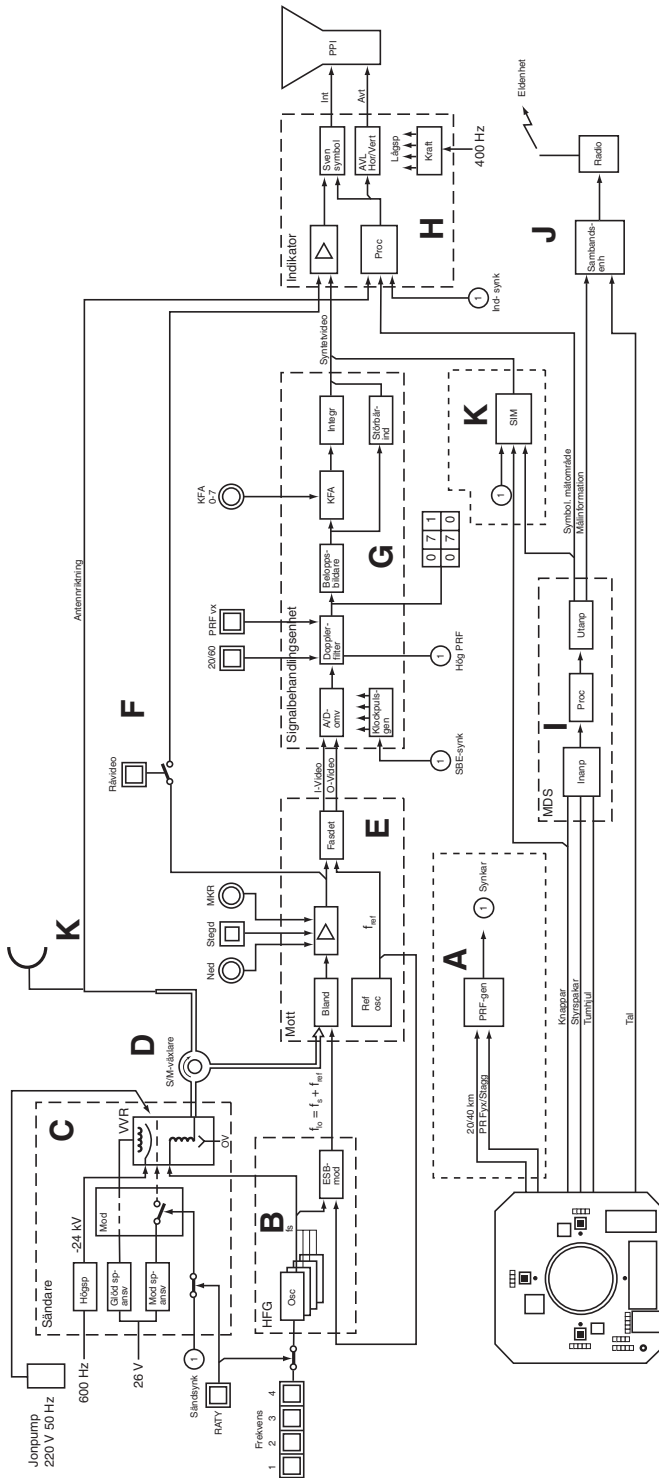
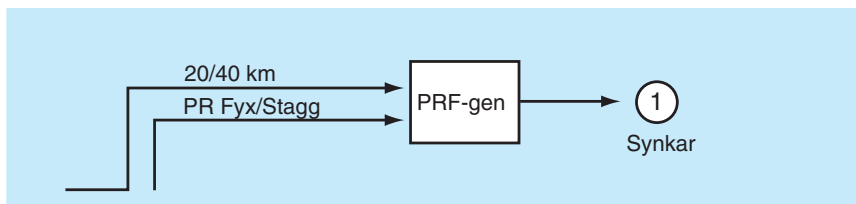
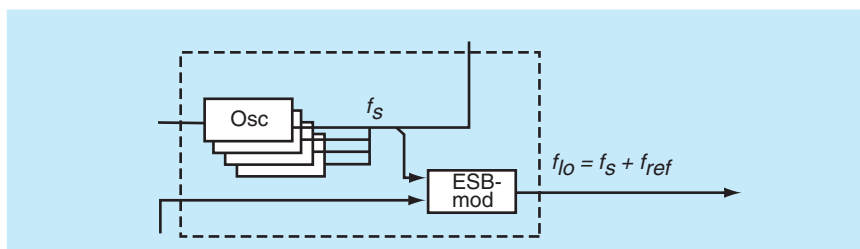


Bild 3:45. Schema över PS-70 funktion.

Funktion PRF-generator – A



När radarn sänder skapas i PRF-generatorn (A) synkroniseringssignaler ("synkar") vilka styr radarns verksamhet t ex när sändpuls ska skickas iväg. PRF-generatorn påverkas dels av avståndsområdet och dels av om PRF-vx eller STAGG är valt. Vid 20 km mod används en dubbelt så hög PRF som vid 40 km mod. När STAGG används ändrar PRF-generatorn tiden mellan varje sändpuls. PRF-generatorn kan vid STAGG välja mellan 16 olika tider. Då PRF-vx är valt ändras PRF en gång per antennvarv mellan två olika tider vid 20 km mod och mellan tre tider vid 40 km området.

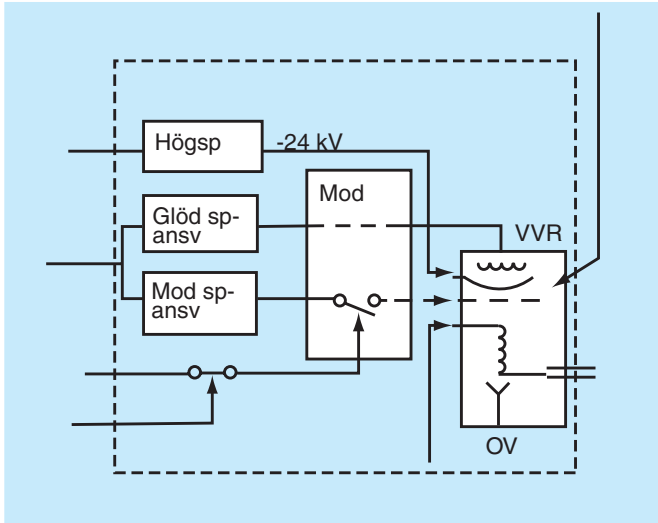


Hörfrekvensgenerator HFG – B

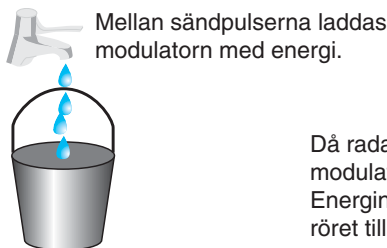
I HFG finns fyra oscillatorer som kan väljas med frekvensknapparna F1-F4. Den typ av oscillator som används i PS-70 skapar en högfrekvent signal på en enda frekvens. Eftersom det i PS-70 bara finns fyra oscillatorer kan stationen följaktligen bara använda fyra olika frekvenser. Frekvenserna från oscillatorerna ligger någonstans i området 5,4-5,9 GHz dvs på det s k C-bandet. Det finns ett antal olika oscillatorer monterade i PS-70. Risken är därmed liten att två stationer använder exakt samma frekvenser. Detta är gynnsamt ur störskyddssynpunkt.

Signalen från oscillatorerna är svag och måste förstärkas före den sänds ut. I HFG skapas även en s k LO-signal (lokal oscillatorsignal) genom att signalen från oscillatoren adderas till en annan signal. LO-signalen kommer sedan att användas i radarns mottagare.

Sändaren – C



Sändaren har till uppgift att förstärka signalen från oscillatorerna i HFG. Sändaren består av ett s k vandringsvåg-rör VVR (eng. Travelling Wave Tube, TWT). Energin till sändaren levereras från en s k modulator (Mod). I modulatore lagras energi mellan det att radarn sänder och det den ”lyssnar”. Eftersom tiden mellan pulserna är mycket större än pulstiden hinner betydande energimängder lagras i modulatore.



Då radarpulsen skapas töms modulatore hastigt på energi. Energin används i vandringsvåg-röret till att kraftigt förstärka signalen.



Bild 3:46. Modulatorens princip för energilagring.

När en puls ska sändas iväg skickar PRF-generatorn en sändsynk till modulatore. Modulatore skickar då sin upplagrade energi till VVR som då kan förstärka oscillatorns signal. Utsignalen från sändaren kommer nu ha en effekt av ca 12000 W. Pulstiden bestäms av signaler från PRF-generatorn till modulatore och är vid 20 km mod ca 3,2 μ s och vid 40 km avstånds-område 6,4 μ s detta innebär att pulsen har en längd av 980 resp 1960 m.

S//M-växlaren och antenn – D

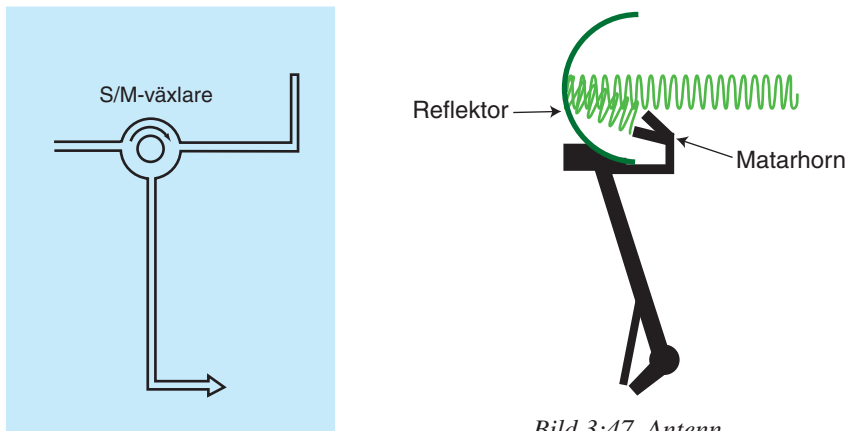


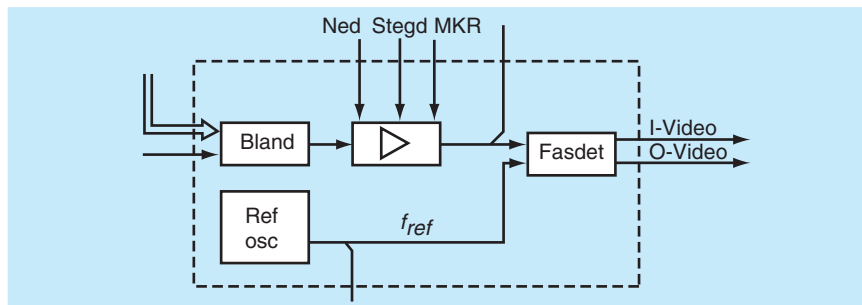
Bild 3:47. Antenn.

Efter sändaren kommer pulsen till S/M-växlaren. Den har till uppgift att skydda radarmottagaren från de mycket kraftiga sändpulsens. Mottagaren är konstruerad för att förstärka mycket svaga signaler (miljarddels watt) och skulle förstöras om sändpulsens direkt fick påverka den.

Sändpulsens når slutligen via vågledaren matarhornet vid antennen, studsar mot antennens reflektor och sänds ut i luften.

En ekopuls som når radarn koncentreras av antennens reflektor till matarhornet passerar därefter genom vågledaren via S/M-växlaren till mottagaren.

Mottagaren – E



Mottagaren och den efterföljande signalbehandlingen har bl a till uppgift att förstärka signalen men det finns vissa nackdelar att signalbehandla signaler med så hög frekvens som en radarstation sänder med. Bland annat måste man ha mycket höga samplingsfrekvenser i A/D-omvandlarna, dessutom får man problem att göra filter med tillräckligt branta flanker. Därför vill man skapa en signal med betydligt lägre frekvens, detta görs i mottagarens BLANDARE.

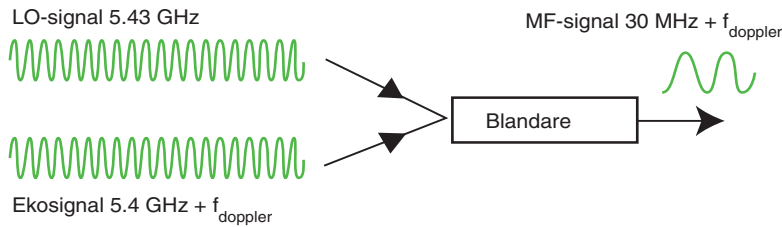


Bild 3:48. Blandare.

I blandaren blandas ekopulsen med LO-signalen. LO-signalen har skapats i HFG samtidigt som sändsignalen. LO-signalen har en frekvens som är något lite högre än sändfrekvensen. När ekosignalen och LO-signalen blandas samman fås en signal som består av skillnaden mellan de båda signalerna.

Exempel 3:3

En radarstation har sändfrekvens 5,4 GHz och LO-signal 5,43 GHz. Ekot har 5,4 GHz plus målets dopplerfrekvens, f_{doppler} . Signalen efter blandningen får då frekvensen $5,43 - (5,4 \text{ GHz} + f_{\text{doppler}}) = 0,03 \text{ GHz} + f_{\text{doppler}} \approx 30 \text{ MHz}$. 30 MHz -signalen benämns mellanfrekvens (MF).

En mottagare som arbetar med ett system med en mellanfrekvens benämns Superheterodyn-mottagare. Huvuddelen av alla radarstationer och radioapparater arbetar enligt denna princip. Då man på en transistorradio vrider frekvensratten påverkar man i själva verket bl a en lokaloscillator för att få rätt mellanfrekvens för den station man vill lyssna på.

Efter blandaren förstärks signalen i en förstärkare. Hur mycket signalen ska förstärkas bestäms bl a av NED (närekodämpning), STEGD (stegdämpning) och MKR (manuell känslighetsreglering). Närekodämpningen kommer att minska förstärkningen av signalen i området närmast radarn för att slippa starka markekon. Stegdämpning minskar förstärkningen ca 1000 ggr i hela avståndsområdet för att man ska kunna få entydig störbäring.

Resterande del av signalen måste signalbehandlas ytterligare för att bl a få bort markekona. Första steget i denna process sker i mottagarens FAS-DETEKTOR.

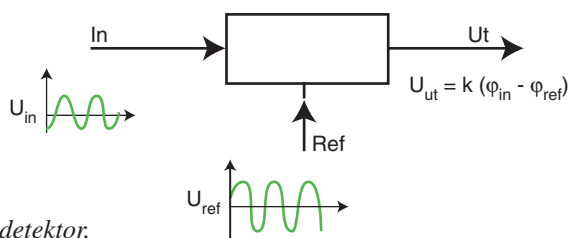


Bild 3:49. Fasdetektor.

Fasdetektorn lämnar en utspänning som är beroende av fasskillnaden mellan insignalen och referensen. Ju större fasskillnaden är desto större blir utsignalen.

Vid vissa faslägen blir utsignalen noll, det leder då tyvärr till att man inte skulle ha någon signal till den efterföljande signalbehandlingen. För att gardera sig mot detta problem finns två fasdetektorer där den ena använder en referenssignal som är fasförskjutet 90°. Vitsen med detta är att signalerna från de båda fasdetektorerna inte samtidigt bli noll. Signalerna från fasdetektorerna kallas I-video och Q-video och ger både signalens fas och amplitud.

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\varphi = (\arctan \frac{Q}{I}).$$

Råvideo – F

Efter förstärkaren leds den del av signalen som ska bilda RÅVIDEON till indikatorn.

Råvidosignalen kommer att innehålla obehandlad information dvs både riktiga ekon och markekon.

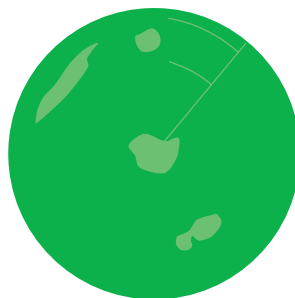
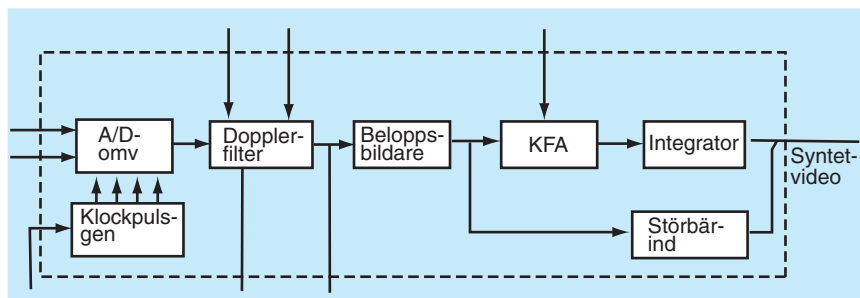


Bild 3:50. Råvideo.

Signalbehandlingsenhet (SBE) – G

Signalerna från mottagaren vilka består av ekots fasinformation leds därefter till SBE, Första steget i SBE består i att omvandla de analoga signalerna till digital information. Anledningen till A/D-omvandlingen är att de digitala signalerna är lättare att spara i minnen vilket bl a behövs då markeko-signalerna ska filtreras bort. A/D-omvandlarens samplingsfrekvens bestäms av antalet avståndsfällor.



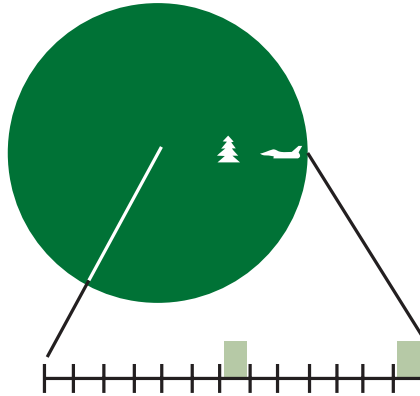


Bild 3:51. Princip avståndsfällor. Fasinformationen från de mottagna ekona sparas i ett minne med 64 olika fack eller fällor. Varje eko hamnar i den fällan som motsvarar det avstånd det befinner sig på.

I SBE läggs sedan den digitaliserade fasinformationen in i ett stort minne. Man delar härvid upp avståndsområdet i 64 s k fällor. Om man har ett eko längst ut på indikatorn kommer fasinformationen om detta eko läggas i fälla 64, ett annat eko i samma bäring men på halva avståndet hamnar i fälla 32.

DOPPLERFILTRET, även benämnt MTI-filter (Moving Target Indication), har till uppgift att sälla bort stillastående markekon så att endast de rörliga ekona presenteras.

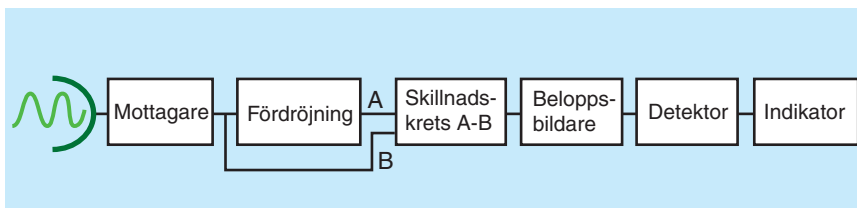


Bild 3:52. Doppler- eller MTI-filter

Det fungerar på så vis att man för en viss fälla tar fasläget från förra pulsen minus den nya pulsens fasläge. Om faslägena är lika blir svaret noll vilket betyder att det är ett stillastående eko. Om de inte är lika, vilket är fallet då det är ett rörligt eko, fås ett svar som är skilt från noll. Man får då en signal som senare kan presenteras på indikatorn.

Det stillastående ekot får alltid samma fasläge medan det rörliga föremålet ger olika faslägen vid varje ny puls.

I MTI-kretsarna subtraheras fasläget i varje avståndsfälla med fasläget från den senaste mätningens fallor. Ett stillastående eko (Eko 1) har alltid samma fasläge, skillnaden blir därför noll. För ett rörligt mål (Eko 2) varierar fasskillnaden.

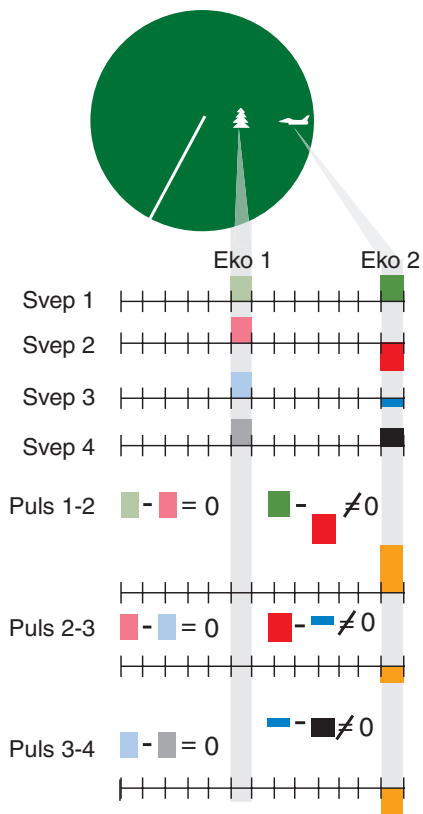


Bild 3:53. Princip MTI-filtrering.

Det rörliga ekot kommer efter MTI-filtret att ge upphov till en signal med varierande fasläge (bild 3:54). Fasläget förändrar sig med målets dopplerfrekvens.

Bild 3:54. Det rörliga ekot. Signalen ut från MTI-filtret före beloppbildaren.

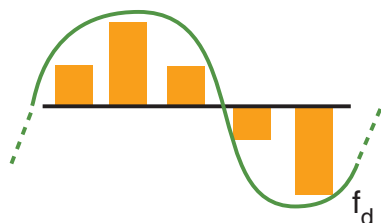
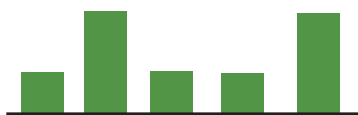


Bild 3:55. Beloppsbildaren likriktar signalerna som kommer ut från MTI-filtret.



Nästa enhet i kedjan är BELOPPSBILDAREN där likriktas ("vänds") de signaler ut från dopplerfiltren som fått "negativt" fasläge till "positiva".

KFA-KRETSARNA har till uppgift att minska mängden falska ekon som bruset kan ge upphov till. Bruset varierar slumpvis och kommer inte att tas bort av dopplerfiltren.

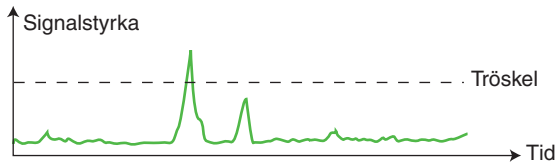


Bild 3:56. Detekteringströskel. Endast signaler som når över detekteringsströskeln kommer att presenteras.

I alla typer av radarstationer finns en s k detekteringströskel, ett eko måste ha en amplitud som är högre än detekteringströskeln för att presenteras. Om brusnivån ökar i styrka kan även bruset komma att passera detekteringströskeln, bruset presenteras då som en stor mängd målekon på indikatorn.

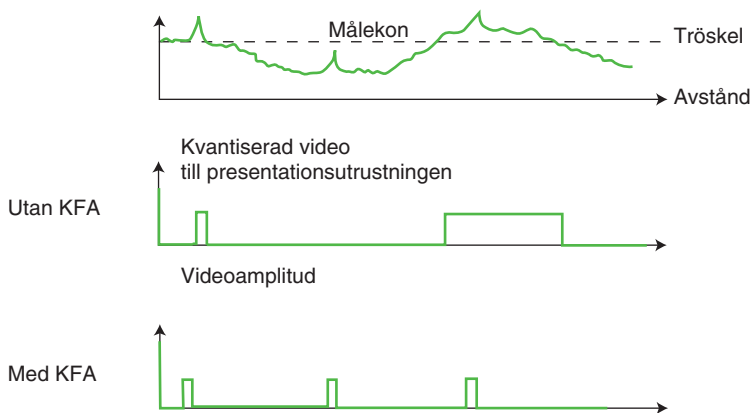


Bild 3:57. KFA-konstant falsklarms generering.

KFA-kretsarna har till uppgift att anpassa detekteringströskeln så att den alltid befinner sig över brusets medelvärde, så att inte en mängd falska mål uppstår när brusnivån höjs.

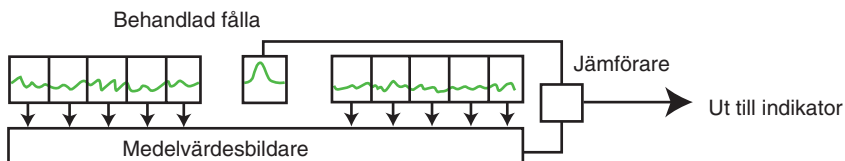


Bild 3:58. Funktionsprincip KFA. I KFA-kretsarna jämförs signalnivån i en behandlad fålla med signalnivån i de omgivande fållorna. Signalen i "mitten"-fållan måste vara högre än medelvärdet för att ett eko ska presenteras.

I KFA-kretsarna jämförs signalnivån i den just då behandlade fällan med medelvärdet hos fem fällor på ömse sidor. Om signalnivån är högre i mittfällan än medelvärdet av de omgivande fällorna, presenteras ett eko. Därefter stegas fällorna fram ett steg och en ny avståndsfälla blir mittfälla.

Med knappen KFA kan man variera hur mycket högre än medelvärdet ekot ska vara för att presenteras. Ju högre KFA-nivån väljs desto lägre blir radarns känslighet. Andelen falska mål minskar eftersom det blir mindre risk att någon enstaka brustopp kan passera detekteringströskeln. Stråvan ska vara att ha en så låg KFA-nivå som möjligt, annars kan man missa verkliga mål med låg signalstyrka.

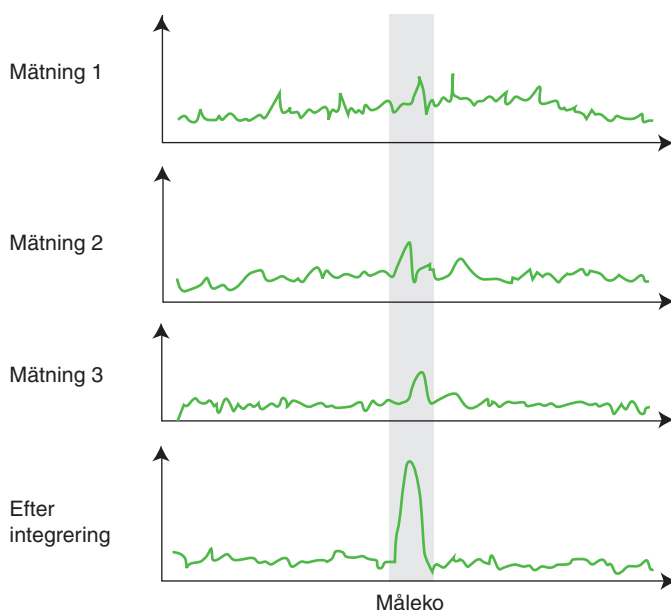


Bild 3:59. Integratorn. I integratorn summeras ett antal mätningar fälla för fälla. Bruset varierar slumpvis medan ekot befinner sig hela tiden i samma fälla. Ekots amplitud kommer därför att öka mer efter summeringen än vad bruset gör.

Även integratorn har till uppgift att minska mängden falska ekon och öka stationens känslighet. Integratorn fungerar genom att signalerna mellan olika mätningar summeras fälla för fälla.

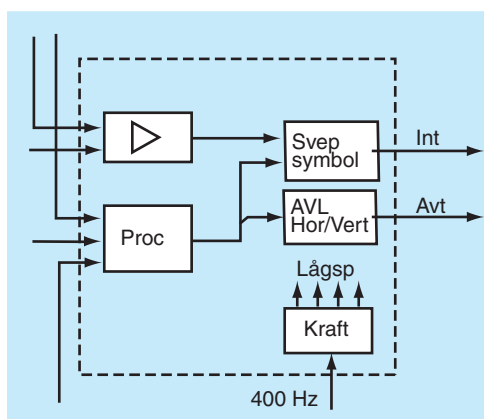
Ett eko uppträder i samma fälla hela tiden och signalnivån kommer att öka kraftigt om flera signaler summeras. Bruset varierar slumpmässigt, om flera mätningar summeras kommer summan av bruset öka mindre än summan av ekosignalerna. Tack vare integratorn kommer ekosignalerna att höja sig mer över bruset än vad som vore fallet utan integrator, vilket ökar radarns förmåga att hitta svaga ekon dvs radarn blir känsligare.

Beroende på typ av radarstation finns två typer av integration, integrering före detektorn och integrering efter detektorn. Ovanstående förklaring gäller, efter integratorn. Om integrering sker före detektorn så ökar signal/brusförhållandet proportionellt med antalet integrerade pulser. Flertalet av luftvärnets radarstationer integrerar efter detektorn. Signal/brusförhållandet är då endast proportionellt mot roten av antalet integrerade pulser. Efter ytterligare förstärkning når signalen radarns PPI.

Störbäringsindikering

Signalen från beloppsbildaren går även till kretsar för störbäringsindikering. Här görs en kontroll av brusnivån i ett antal fällor. Om signalen är mer än ett femtiotal gånger starkare än den normala brusnivån så presenteras en störbärning. Störbärning presenteras framför allt då antennen pekar rakt mot störsändaren men om störningen är mycket kraftig kan störsignaler tränga in via antennens sidolober så att störbärningar presenteras i flera riktningar.

Indikator – H



Indikatorns uppgift är att presentera informationen för radaroperatören. I PS-70 används en plan polär indikator (PPI). Det innebär att den kan presentera både riktning och avstånd till målet. Indikator av PPI-typ är den vanligaste typen i spaningsradarstationer.

Det kan nämnas att det finns andra typer av indikatorer som används i elldledningsradarstationer t ex A-indikatorn vilken presenterar avstånd och signalstyrka.

Indikatorn i PS-70 är ett katodstrålerör som består av tre delar

- elektronkanon
- avlänkingsplattor eller spolar
- bildskärm.

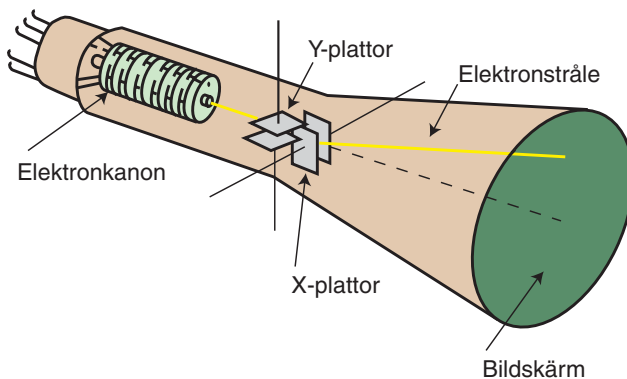


Bild 3:60. Katodstrålerör.

Elektronkanonen avger en stråle av elektroner. När elektronstrålen träffar skärmen lyser denna upp. Genom att variera spänningarna på avlänkningsplattorna kan den lysande punktens läge på skärmen förflyttas. Med X-plattorna förflyttar man strålen i horisontalled och med Y-plattorna sker motsvarande förflyttning i vertikalalled. Om man samtidigt ändrar spänningarna på de olika plattorna kan man få en godtycklig förflyttning av punkten. I PS-70 använder indikatorns processor vinkelinformationen från antennen till att styra elektronstrålen att rita ett svep i den riktning som stationen sänder.

Indikatorns skärm innehåller ett fluoriserande skikt som lyser upp då det träffas av elektronstrålen, skärmen har en viss efterlysningstid vilket gör att punkten långsamt mörknar då elektronstrålen försvinner. Efterlysningstiden gör att det mänskliga ögat hinner uppfatta de mycket korta ekopulserna.

I elektronkanonen finns ett sk galler. Med galleret kan man reglera punktens intensitet. En negativ spänning på galleret minskar antalet elektroner som lämnar elektronkanonen och därmed minskar också punktens intensitet.

I PS-70 kan punktens intensitet varieras i fyra steg beroende på hur kraftigt målekt är

- släckt
- svagt
- medel
- starkt.

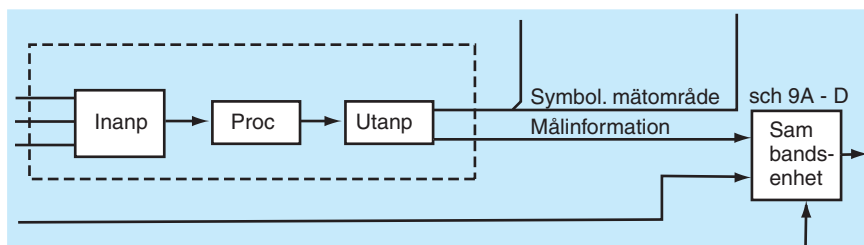
Indikatorns processor känner av antennens bäring och vet på så vis i vilken riktning den ska styra elektronstrålen. Processorn styr även elektronkanonens galler så att inga elektroner når skärmen (dvs bilden släckt).

När sändpulsen lämnar sändaren skapas en INDIKATOR SYNK vilken anger för processorn att det är dags att börja röra elektronstrålen ut från indikatorns centrum i den riktning antennen anger.

När ett eko når radarn påverkar processorn gallret så att elektronstrålen når skärmen och det uppstår en lysande punkt.

Moderna radarstationer använder bildskärmar istället för katodstrålerör för att presentera radarns information.

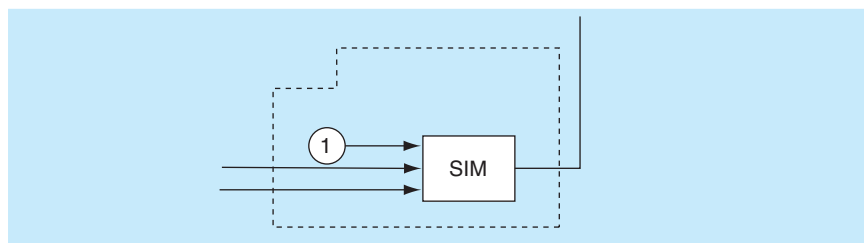
Invisning, måldatasändaren – I och sambandsenheten – J



I PS-70 följs målen manuellt av operatörerna. Med sin styrspak placerar de en symbol runt de ekon som ska följas. Måldatasändaren (MDS) läser av styrspakarnas position. Positionerna sänds därefter ut som måldata via sambandsenheten till eldenheterna. I modernare radarstationer t ex PS-90 och PS-91 kan målen antingen följas manuellt eller automatiskt. Vid automatisk fölning följer radarn själv målen enligt vissa kriterier.

Simulator – K

I radarn ingår även en simulator för att träna operatören i underrättelse-tjänst och telekrigföring.



Eldledningsradar

En eldledningsradar ska till skillnad mot en spaningsradar låsa på ett mål och automatiskt följa det i vinkelled och i avstånd eller hastighet. En indelningsgrund för eldledningsradar är att utgå ifrån radarns följeprincip. Det finns då två huvudtyper av eldledningsradar: avstånds- respektive hastighetsföljande. Hur en eldledningsradar följer ett mål i vinkelled är beskrivet i kap 4 (avsnitt Vinkelavhakning).



Bild 3:61. Eldledningsradar eldenhet 23.

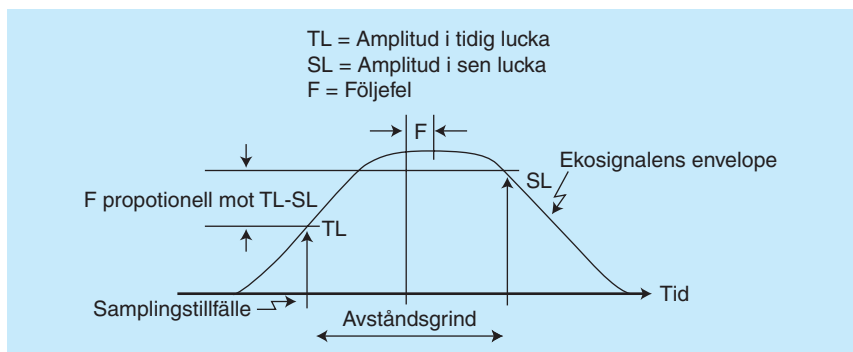


Bild 3:62. Radarns avståndsservo strävar efter att hålla avståndsgrinden i en sådan position att signalerna från den tidiga och den sena luckan blir lika stora.

Avståndsföljning

I en avståndsföljande eldledningsradar samplas det mottagna ekot vid två tillfällena, en strax före och en strax efter det inställda avståndet. Om avståndet inte är korrekt erhålls en felsignal eftersom målekostyrkan är starkare vid ett av samplingstillfällena. Det instrumenterade avståndet justeras då så att det överensstämmer med avståndet till målet. Samplings-tillfällena benämns av historiska skäl för luckor, tidig lucka respektive sen lucka.

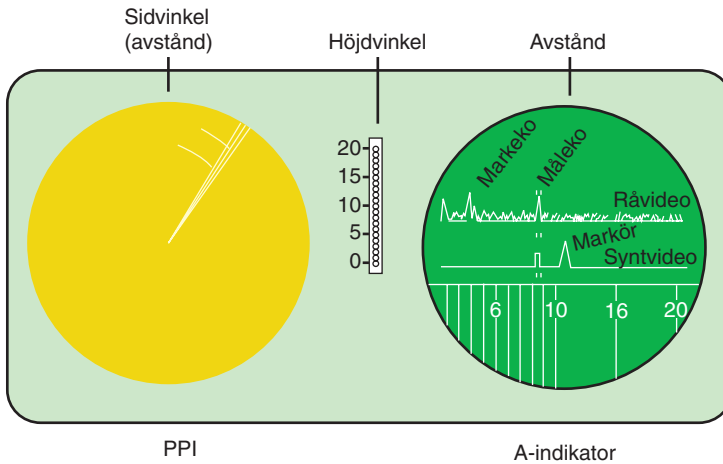


Bild 3:63. Exempel på presentation i en avståndsmätande eldledningsradar Cig 790.

Ekosignalen presenteras ofta både på ett PPI och en avståndsindikator (A-indikator).

Hastighetsföljning

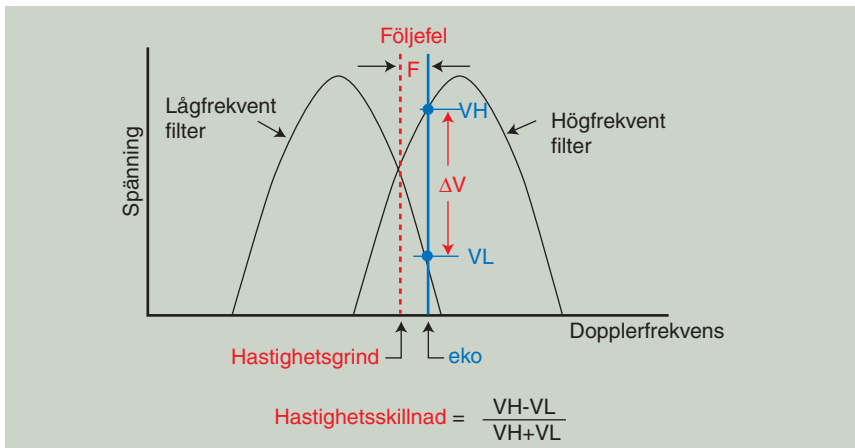


Bild 3:64. Hastighetsservot utnyttjar två stycken filter. Signalen från filtren blir lika stark då ekots dopplerfrekvens befinner sig i skärningspunkten mellan filtren.

Hos en hastighetsmätande eldledningsradar, t ex PE 542, sker förloppet inte i avstånd utan i frekvens (hastighet). Ett enkelt hastighetsservo kan bestå av två stycken delvis överlappande filter. När ekot ger lika stark signal i båda filtren följer servot på rätt dopplerfrekvens (=hastighet). För att förflytta eko-signalen till skärningspunkten mellan de båda filtren utnyttjas en styrbar oscillator vars signal blandas med ekosignalen. När hastighetsservot ligger mitt på ekot kommer oscillatorsignalen vara ett mått på målets hastighet.

Fördjupning

Elektromagnetiska vågor

För att en elektrisk ström ska flyta måste det finnas ett elektriskt fält. När en elektrisk ström flyter (bild 3:65) så skapas ett magnetfält, elektromagneten är ett exempel på detta.

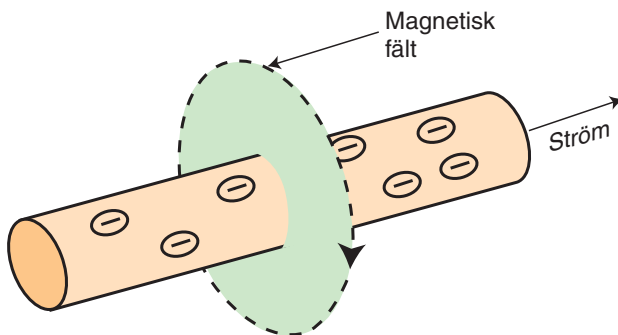


Bild 3:65. Ett magnetfält uppstår kring en elektrisk ledare.

Alla hastiga förändringar i ett magnetiskt fält, ökning eller minskning av amplituden eller en rörelseändring genererar ett elektriskt fält. Man ser detta i generatorer och transformatorer. På samma sätt, skapar en förändring i ett elektriskt fält ett magnetfält.

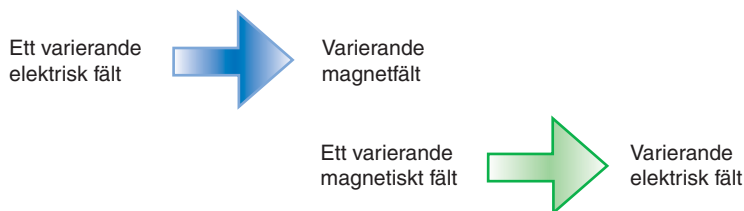


Bild 3:66. En elektromagnetisk våg fortplantar sig eftersom de elektriska och magnetiska fälten är kopplade till varandra. Om det elektriska fältet varierar sinusformat så kommer det att ge upphov till ett sinusformat magnetiskt fält. Det magnetiska fältet kommer i sin tur att skapa ett varierande elektriskt fält. Vågen utbreder sig.

Elektromagnetisk energi avges varje gång en laddning (t ex en elektron) förändrar sin riktning eller hastighet. Man bör dock notera att en likström visserligen ger upphov till ett magnetfält men att detta inte innebär att man får en elektromagnetisk våg, för att detta ska ske krävs att laddningarna accelereras eller retarderas dvs förändrar sin hastighet.

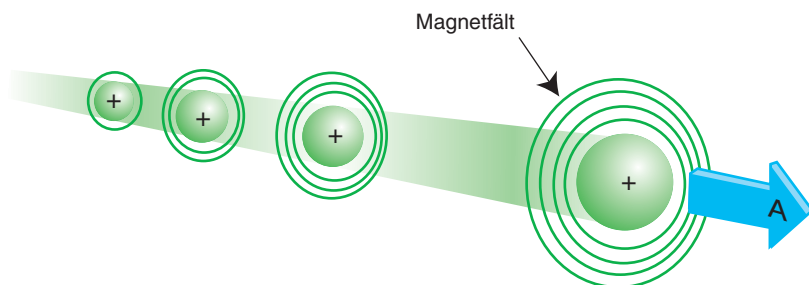


Bild 3:67. Då en elektrisk laddning accelererar, skapas ett magnetiskt fält och elektromagnetisk energi utstrålas. Rörelseförändringen hos laddningen skapar en förändring i det omgivande magnetiska fältet. Denna förändring skapar i sin tur en förändring i det elektriska fältet litet längre ut, vilket i sin tur skapar ett förändrat magnetiskt fält ytterligare en bit ut och så vidare.

Som en följd av termisk rörelse är elektroner i alla material i konstant slumpvis rörelse. Följaktligen utstrålar allt runt om kring oss elektromagnetisk energi (bild 3:68).

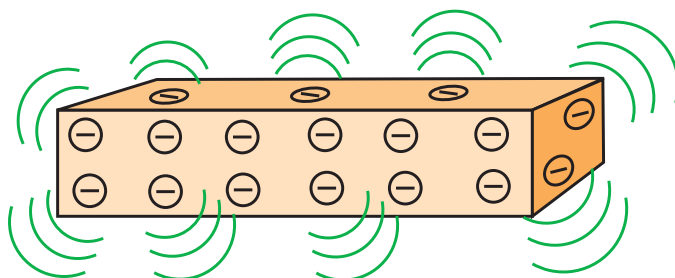


Bild 3:68. På grund av termisk rörelse utstrålar allt runt om oss elektromagnetisk energi, varav en liten del är på mikrovågsfrekvenser.

Den mesta energin utgörs av termisk strålning (långvågig infraröd strålning). Men en liten del av strålningen är mikrovågor. Utstrålad värme, ljus och mikrovågor är olika former av samma fenomen nämligen *elektromagnetisk strålning*. De skiljer sig endast åt i våglängd och frekvens.

I motsats till naturlig strålning, skapas vågorna i en radar genom att påverka en avstämd krets med en stark elektrisk ström. Vid radarns sändfrekvens innehåller därför radarsignalerna mycket mer energi än den naturliga strålningen.

Egenskaper hos elektromagnetiska vågor

En elektromagnetisk signal har ett antal olika egenskaper som hastighet, riktning, polarisation, styrka, våglängd, frekvens och fas.

Riktning

Vågen utbreder sig i fria rymden vinkelrätt mot både de magnetiska (H) och de elektriska (E) fältens riktningar (bild 3:69). Denna riktning är alltid riktad ut från det strålände elementet (antennen). Effekten utbreder sig enligt "högerhandsregeln" ($P = \vec{E} \times \vec{H}$). När en våg träffar ett reflekterande objekt ändras riktningen på något av fälten och därmed ändras också riktningen på svängningen.

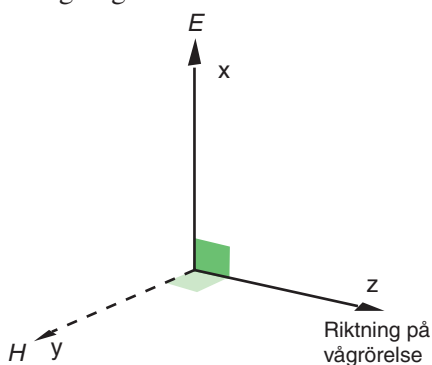


Bild 3:69. Vågens utbredningsriktning är vinkelrät mot både det elektriska (E) och det magnetiska (H) fältens riktningar.

Polarisation

Polarisation används för att beskriva fältens orientering. Genom en överenskommelse har man bestämt att med polarisation avses det elektriska fältets riktning. I fri rymd, utanför den absoluta närheten av antennen, är magnetfältet vinkelrätt mot det elektriska fältet (bild 3:70) och vågrörelsen vinkelrät mot dessa båda fält.

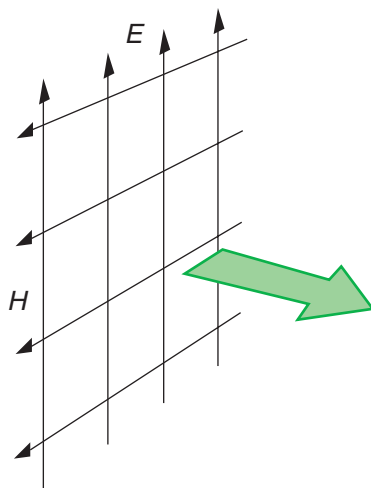


Bild 3:70. I fria rymden är en vågens magnetiska fält (H) alltid vinkelrätt mot det elektriska fältet (E). Rörelseriktningen är vinkelrät mot båda.

När det elektriska fältet är vertikalt (dvs svänger i vertikalled) sägs vågen vara vertikalt polariserad. När det elektriska fältet är horisontellt är vågen horisontellt polariserad.

Om antennen är en tunn ledare kommer det elektriska fältet att vara parallellt med ledaren. Om ledaren är vertikal blir det elektriska fältet vertikalt polariserat (bild 3:71), är det horisontellt blir signalen horisontellt polariserad. Det som sker i t ex en radioantennen är att en växelström accelererar elektroner i antennen. Det elektriska fältet får därför samma riktning som antennen. Polarisationen kan därför ofta observeras redan genom att se på antennens utseende. Radioantennerna för UK-radio är vertikala dvs signalerna är vertikalt polariserade, medan spröten i en TV-antenn pekar längs horisonten vilket betyder att TV-signalerna är horisontellt polariserade.

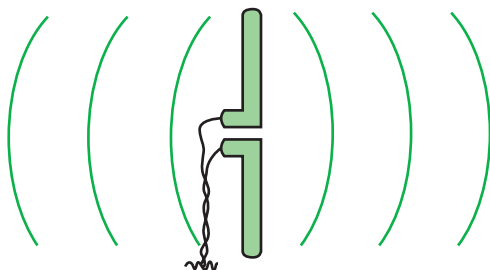


Bild 3:71. Om det strålande elementet är vertikalt, kallas elementet för vertikalt polariserat.

I en mottagarantenn ska E-fältet sätta fart på laddningar i antennen. En mottagarantenn som placeras i vågens väg kan ta emot maximal mängd energi om polarisationen (orienteringen) hos antennen är densamma som vågens polarisering. Om polarisationen inte är densamma så reduceras den mottagna energi proportionellt med \cos^2 för vinkeln mellan antennens och signalens polarisationer.

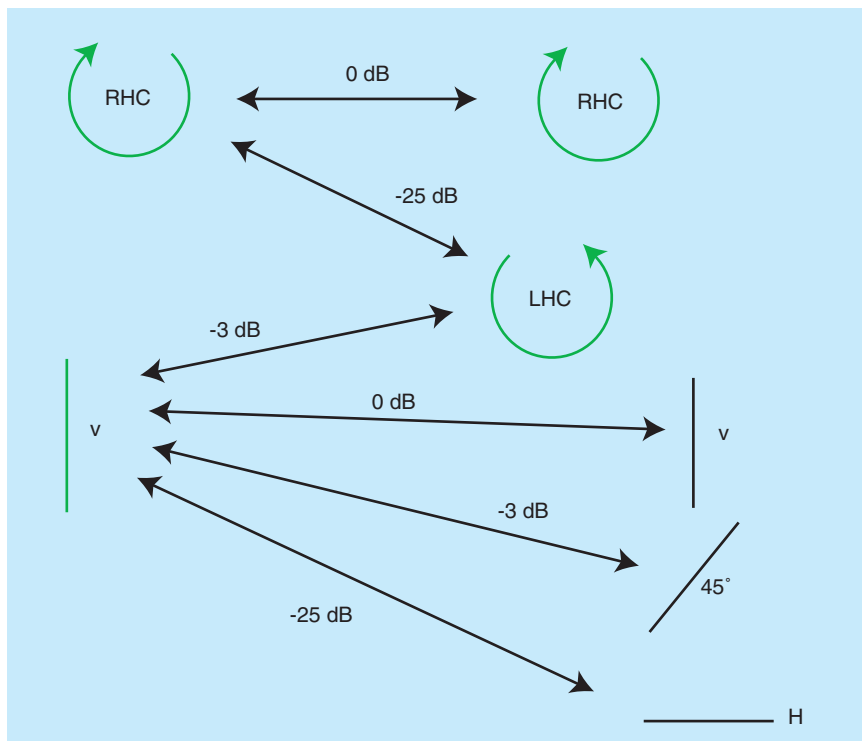


Bild 3:72. En signal dämpas om polarisationen på den sändande och mottagande antennen inte stämmer överens. $-3\text{dB} = 1/2$ signalstyrkan, $-25\text{ dB} = \text{ca } 1/320\text{-del}$ (Adamy).

Om man försöker att ta emot en vertikalt polariserad signal med en horisontellt polariserad mottagarantenn så kommer inte någon signal alls in i mottagaren. Om man i stället vrider antennen 45° så kommer hälften av den verkliga signalen att nå mottagaren.

När en våg reflekteras beror polarisationen hos den reflekterade signalen inte bara på polarisationen hos den inkommande vågen utan också på konstruktionen av objektet och vilket material det är tillverkat av. Polarisationen på radareko kan faktiskt användas som ett sätt att diskriminera vissa typer av föremål.

Linjärt polariserade vågor är vågor som hela tiden har samma polarisation under hela deras längd. I vissa tillämpningar är det önskvärt att sända vågor vars polarisation roterar 360° under varje våglängd (bild 3:73).

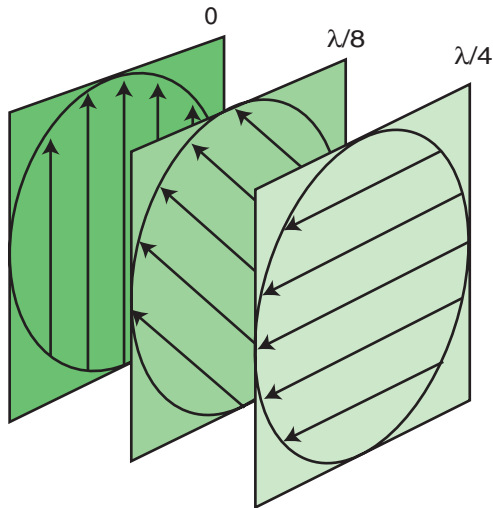


Bild 3:73. Cirkulär polarisation. Polarisationens vridning vid förflyttning från noll till en fjärdedels våglängd.

Detta kallas cirkulär polarisation. Det kan åstadkommas genom att samtidigt sända horisontella och vertikala vågor som är 90° ur fas. Vågen sägs vara cirkulärt högerpolariserad om E-fältet roterar medurs när man ser på det i utbredningsriktningen och cirkulärt vänsterpolariserad om fältet roterar moturs (eng. RHC - right hand circular, LHC - left hand circular).

Våglängd, frekvens och hastighet

Fältstyrkan varierar sinusformat i bild 3:74. Avståndet mellan två punkter med lika fas i två på varandra följande vågor definieras som våglängden (λ) och mäts i meter. Antalet utsända vågor per sekund är frekvensen (f).

Sambandet mellan våglängd, frekvens och utbredningshastighet (v) är

$$v = \lambda \cdot f \quad [\text{m/s}]$$

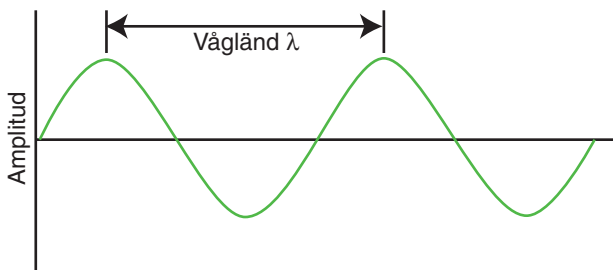


Bild 3:74. En våglängd.

All elektromagnetisk strålning fortplantar sig med en hastighet av ca 300 000 km/s i vakuum. Ljushastigheten i vakuum betecknas c . I alla andra material är hastigheten lägre, i luft är hastigheten bara något mindre än i vakuum, oftast brukar denna hastighetsskillnad försummas.

Frekvensband

Frekvenser indelas i s k frekvensband t ex High Frequency (HF), Very High Frequency (VHF), Ultra High Frequency (UHF) och så vidare. De frekvenser som vanligen används av radar är inom UHF mikrovågs - och millimetervågsbanden (bild 3:75).

Under andra världskriget delades mikrovågsområdet upp i relativt smala band som av militära sekretessskäl gavs bokstavsbezeichnungar: L-bandet, S-bandet, C-bandet, X-bandet och K-bandet. För att öka sekretessen ytterligare var beteckningarna inte i alfabetisk ordning. Även om frekvensbanden sedan länge är öppen information har beteckningarna blivit kvar sedan dess.

K-bandet visade sig vara nästan rakt centrerat över resonansfrekvensen för vattenånga, där den atmosfäriska dämpningen är hög. Bandet delades därför upp i tre delar. Mittendelen behöll den ursprungliga beteckningen K. Den nedre delen fick beteckningen Ku-bandet och den översta delen fick beteckningen Ka-bandet. En minnesregel är att u=under K-bandet och

a=above (över) K-bandet.

Under 1970-talet skapades en ny serie beteckningar för elektroniska motmedelsutrustningar. Dessa är i alfabetisk ordning från A till M. Man vill gärna tillämpa dessa beteckningar även på radar. Men, eftersom de nya gränserna mellan frekvensbanden ligger mitt i de gamla banden har detta gått trögt. I Sverige används fortfarande framför allt de gamla beteckningarna. I USA används ofta de "nya" banden, endast för elektroniska motmedel. Mycket talar för att alla på sikt kommer att gå över till de nya beteckningarna.

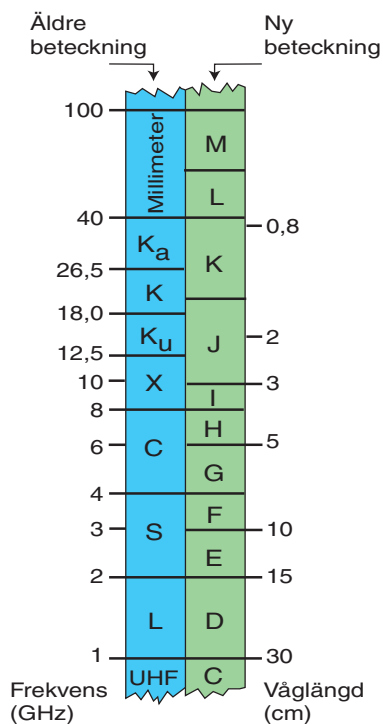


Bild 3:75. Äldre och nyare beteckningar för frekvensbanden.

Tabell 3:1. Centerfrekvenserna och våglängderna för de fem vanligaste radarband.

Band	GHz	cm	Ny beteckning
Ka	38	0,8	K
Ku	15	2	J
X	10	3	I
C	6	5	G-H (PS-70, PS-90, Und 23 tillhör G)
S	3	10	E-F

Vad som är den optimala frekvensen för en radar är en avvägning mellan flera faktorer. Generellt, ju lägre frekvens desto större fysisk storlek på t ex sändare och antenn och desto högre maximal effekt. Ju högre frekvens desto smalare lob kan åstadkommas med en antenn med given storlek.

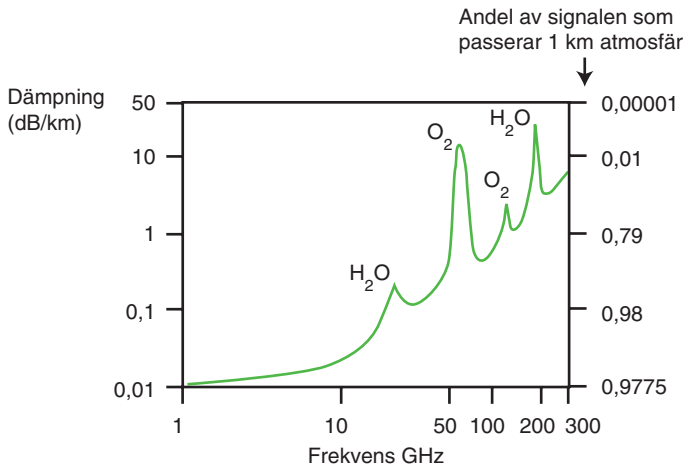


Bild 3:76. Atmosfärdämpningen ökar med frekvensen. Dämpningen beror till stor del på vattenånga (H₂O) och syremolekyler (O₂).

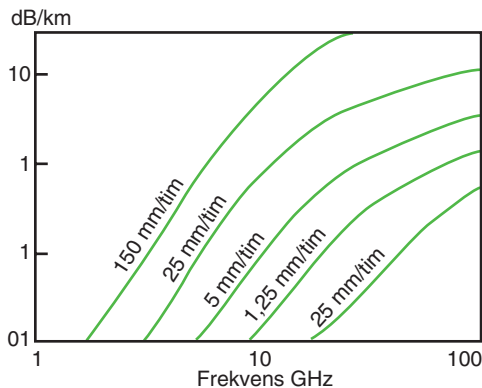


Bild 3:77. Dämpning ökar med frekvensen och regnmängden.

3. Radarlära

Vid frekvenser på 3 GHz och högre börjar signalen dämpas märkbart av atmosfären. Dessutom fås reflektioner från bl a regn och dis vilket ger upphov till väderklotter. Klottret kan komma att ge upphov till ekon som döljer målen. Över ca 10 GHz blir dämpningen och spridningen p g a atmosfären betydande.

Det naturliga bruset är minst i området 0,3 till 10 GHz men ökar markant vid 20 GHz och högre frekvenser.

Dopplerskiftet (frekvensändringen) mot ett rörligt mål ökar med frekvensen enligt formeln:

$$f_d = \frac{2 \cdot V_r}{\lambda}$$

där

f_d = dopplerfrekvensen [Hz = 1/s]

V_r = målets radiella hastighet i förhållande till radarn [m/s]

λ = våglängden [m]

Om små hastighetsskillnader ska kunna detekteras bör radarn arbeta med med hög frekvens.





		EGENSKAPER			
Våglängd λ (cm)	Frekvens f (Hz)	Antenn- dimension	Reflexions- förmåga	dämpning i luften	Doppler- upplösning
1 ↓ 30	$30 \cdot 10^9$ ↓ $1 \cdot 10^9$	Mindre  Större	Större  Mindre	Större  Mindre	Större  Mindre

Bild 3:78. Frekvensens påverkan på några olika parametrar.

Slutsatsen är att om man vill ha en radar som ser långt bör en låg frekvens väljas. Nackdelen är att radarn blir stor. Med höga frekvenser kan man skapa små radarstationer med smal antennlob vilket ger hög vinkelnoggrannhet. Den höga frekvensen gör det möjligt att noggrant mäta hastighetsskillnader mellan t ex mål och klotter. Nackdelen med höga frekvenser är stor atmosfärsdämpning vilket ger kort räckvidd.

Signalanalys

Modulation och bandbredd

Detta avsnitt visar hur de signaler ser ut som sänds från en radar och därmed också vad en störsändare bör skicka ut för att störa en radarstation.

Då man säger att en radar sänder en puls med t ex 5,5 GHz är det lätt att tro att den skickar ut och tar emot en enda sinusformad signal med denna frekvens. Men signaler består i praktiken aldrig av bara en sinusformad signal. En enda kontinuerlig sinussignal innehåller ingen information. Den utsända vågen måste moduleras på något sätt för att ge någon användbar information. I praktiken används tre huvudsakliga sätt att modulera en signal, amplitudmodulering (AM), frekvensmodulering (FM) och fasmodulering (PM-Phase Modulation). De två sistnämnda är egentligen varianter av varandra eftersom en förändring av frekvensen också är en förändring av fasen. Här behandlas främst amplitud- och frekvensmodulering.

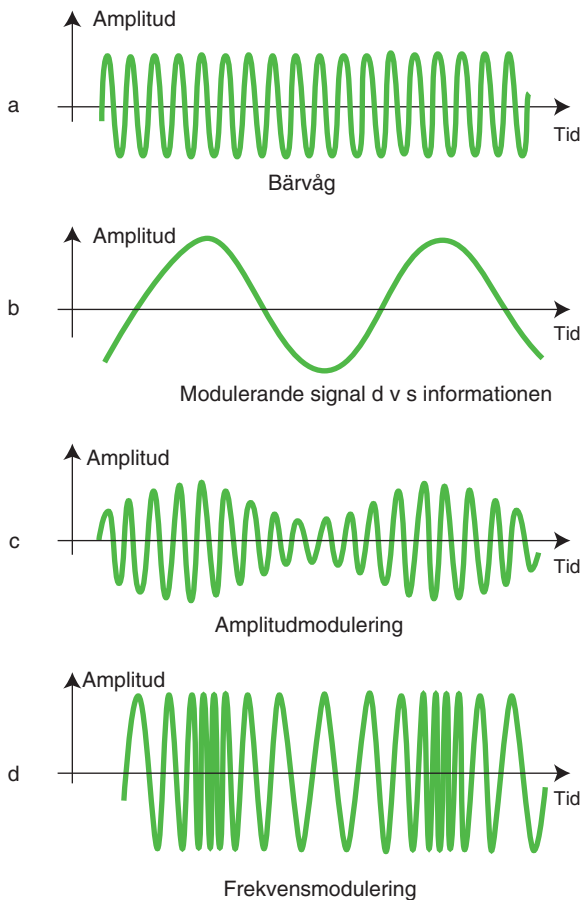


Bild 3:79 a-d. Amplitud- och frekvensmodulering.

En sändare skickar ut en bärvåg med fast frekvens (bild 3:79a). Den informationsbärande sinusformade vågen (bild 3:79b) modulerar bärvågen på två olika vis

- amplituden förändras för att ge en amplitudmodulerad (AM) signal (bild 3:79c)
- frekvensen förändras för att ge en frekvensmodulerad (FM) signal (bild 3:79d).

Amplitudmodulering (AM)

En vanlig radarstation som sänder ut pulser är amplitudmodulerad. AM signalen i bild 3:79c är en kombination av två frekvenser. En bärvåg som kan tecknas

$E_b \cdot \sin \omega_b t$ där $\omega_b = 2\pi f_b$ och den modulerande (informationen ska överföras) vågen som

$E_m \cdot \sin \omega_m t$ där

Amplituden (e) för den modulerade signalen kan då tecknas

$$e = E_b \sin \omega_b t + E_m \sin \omega_m t \cdot \sin \omega_b t$$

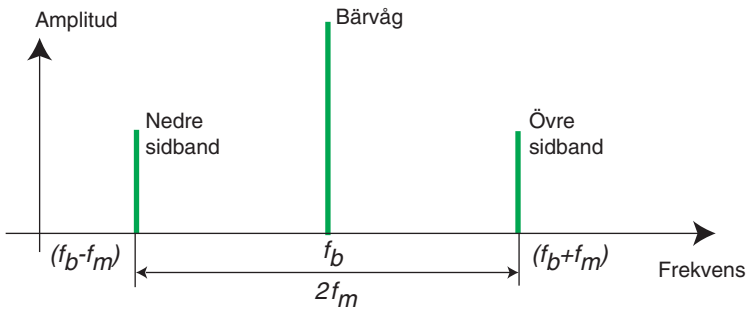
Denna formel kan utvecklas till

$$e = E_b \cdot \sin \omega_b t + \frac{E_m}{2} \cdot \cos(\omega_b - \omega_m) t - \frac{E_m}{2} \cos(\omega_b + \omega_m) t$$

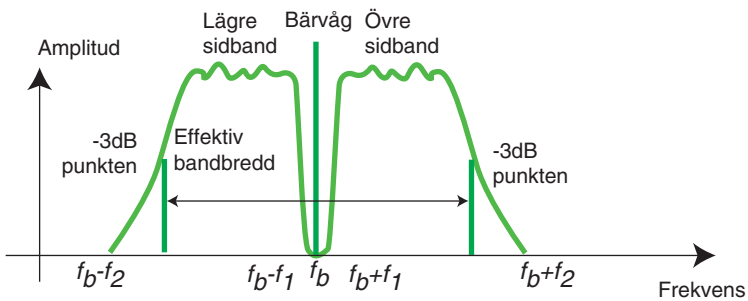
Bild 3:80 illustrerar detta schematiskt och visar att en amplitudmodulering av en bärvåg med en annan sinussignal ger två sidofrekvenser ($f_b - f_m$) och ($f_b + f_m$) och därför ger en bandbredd av $2f_m$. Om man modulerar bärvågen med en mer komplicerad signal än en sinussignal t ex röster som innehåller frekvenser inom ett område f_1 till f_2 så uppstår två hela sidoband av olika frekvensen. De två sidobanden är varandras spegelbilder och de upptar en bandbredd av $2f_2$ och vardera sidobandet innehåller all information. Den effektiva bandbredden räknas mellan de frekvenser där signalstyrkans effekt fallit till hälften (- 3 dB) av toppvärdet på det sätt som visas i nedre bilden (bild 3:80).

Då en signal pulsas förändras det spektrum som en mottagare uppfattar, på ett högst märkbart vis. För att kunna förklara detta utgår man först från en symmetrisk fyrkantpuls. En fyrkantpuls kan sägas vara uppbyggd av en mängd olika sinusvågor med olika amplitud och frekvens (bild 3:81). Då dessa olika signaler summeras fås en fyrkantpuls. En stor mängd signaler med rätt frekvens och amplitud ger en perfekt fyrkantig våg (bild 3:82).

Betrakta en radarsignal bestående av en bärvåg med en viss frekvens f_0 vilken t ex är 5 GHz som slås på och av med en viss frekvens, den s k pulsrepetitionsfrekvensen (PRF). Pulserna som skickas ut är 1/1000 dels sekund långa.



Frekvensspektrum hos en sinusformad bärvåg med frekvensen f_b som är amplitudsmodulerad av en sinusvåg med frekvensen f_m .



Frekvensspektrum hos en bärvåg med frekvensen f_b som är amplitudsmodulerad med signaler inom frekvenser från området f_1 till f_2 .

Bild 3:80. Frekvensspektrum och effektiv bandbredd hos en amplitudmodulerad bärvåg.

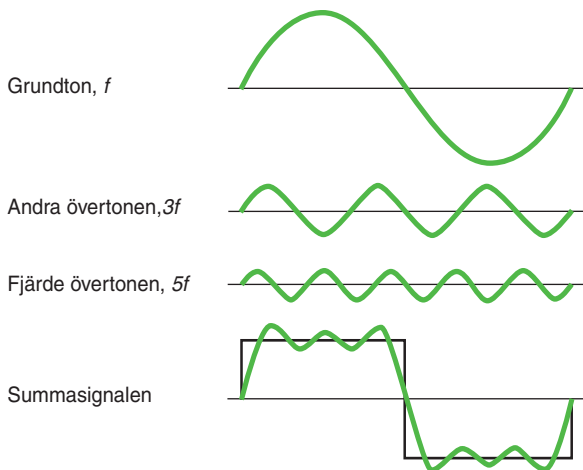


Bild 3:81. Fyrkantspuls består av summan av en mängd olika frekvenser med

olika amplitud enligt uttrycket $\sum \frac{I}{n} \sin(n \omega_0 t)$ där $n = 1, 3, 5$

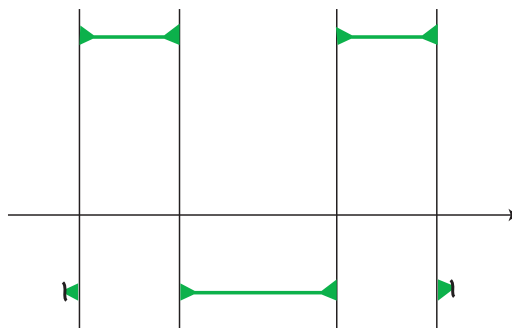


Bild 3:82. Summan av 100 sinussignaler med olika frekvens och amplitud.

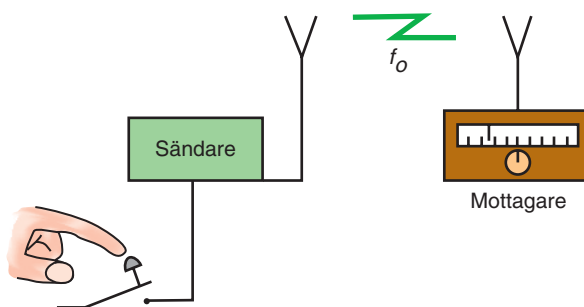


Bild 3:83. Sändare och mottagare.

Hur ser den utsända pulsade signalen ut? Följande experiment åskådliggör detta, se bild 3:83. Utrustningen består av en sändare och en justerbar mottagare till vilken en effektmeter är kopplad. Man börjar med att slå på sändaren och sända en kontinuerlig signal, en s k CW-signal (continuous wave). Med mottagaren letar man igenom frekvensbandet. Man hittar då energi på en enda frekvens vilken sammanfaller med sändarens frekvens f_0 . Det är antagligen precis vad man har förväntat sig.

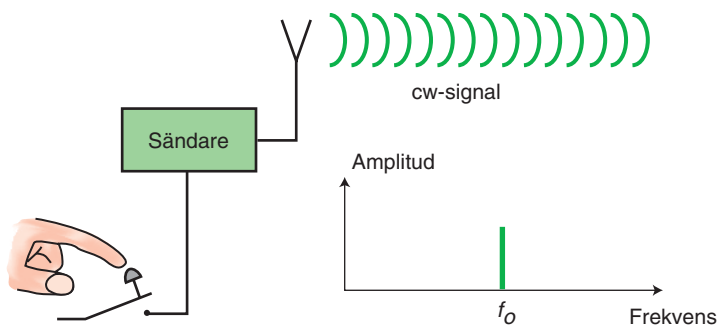


Bild 3:84. Kontinuerlig sändning.

Om man i stället börjar koppla på och av sändare med jämna mellanrum. Vad händer nu med den mottagna signalen?

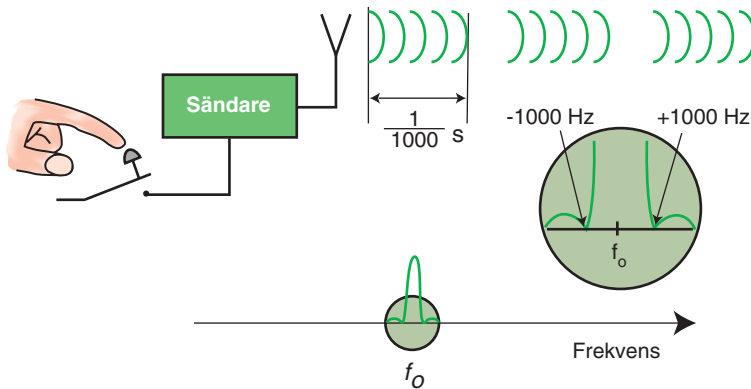


Bild 3:85. Sändning med jämna mellanrum.

Då man vrider på mottagaren så upptäcker man att signaler tas emot på i stort sett alla frekvenser. Mest signalstyrka kring bärvågens frekvens men det finns en viss signalstyrka på alla frekvenser även om de minskar ju längre ifrån bärvågen man förflyttar sig.

Vad har hänt? Jo, när man kopplar till och från sändningen så kan man se detta som om en fyrkantvåg har amplitudmodulerat bärvågen.

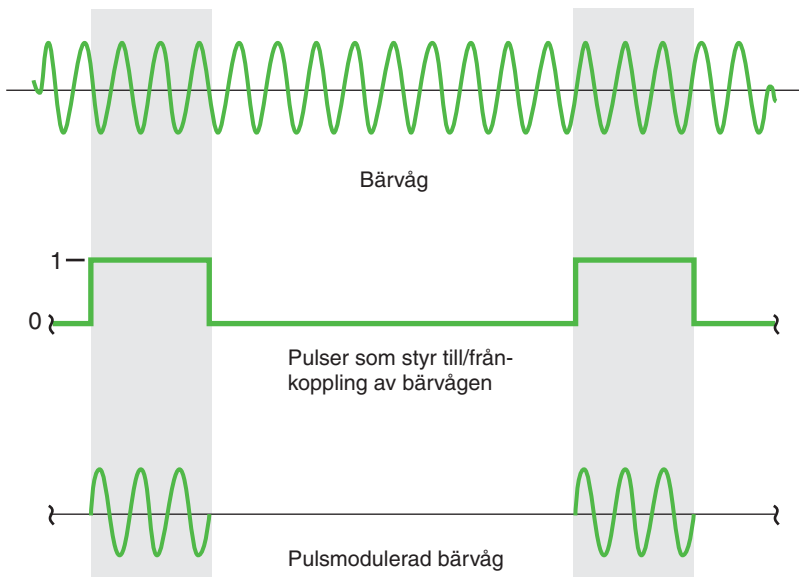


Bild 3:86. Fyrkantpuls som styr till/från kopplingen av bärvågen amplitudmodulerar bärvågen.

3. Radarlära

Fyrkantvågen består ju av en stor mängd sinusvågor. Var och en av dessa har gett upphov till en amplitudmodulering av bärvågen då ger de också var och en upphov till ett övre och ett nedre sidband. På detta vis så har man fått en viss signalstyrka över en stor mängd frekvenser. Man har fått ett spektrum. Om man ritar upp hur signalstyrkan varierar med frekvensen så ser man att signalstyrkan sjunker med ökande avstånd från bärvågsfrekvensen men den sjunker inte linjärt utan det finns några små ”pucklar” vilka benämns sidolober.

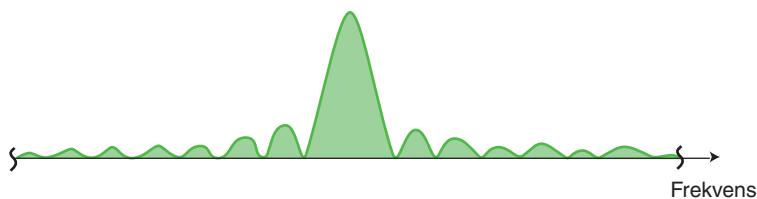


Bild 3:87. Effektspektrum följer en sinckurva för en enkla puls eller ett icke koherent pulståg.

Det visar sig att kurvans envelop följer ett matematiskt förhållande som benämns sinc, vilket är en beteckning för $\sin(x)/x$. Kurvan får värdet noll på vissa ställen. Dessa nollställen bestäms av pulstiden (t_p) dvs hur länge sändningen pågick. Man kan visa att de första nollställena hamnar på

frekvenserna $f_o \pm \frac{1}{t_p}$, nästa på frekvenserna $f_o \pm 2 \cdot \frac{1}{t_p}$ osv. Huvudloben

(dvs mittpuckeln) har bandbredden $2 \cdot \frac{1}{t_p}$. Huvuddelen av radarns energi hamnar inom detta område.

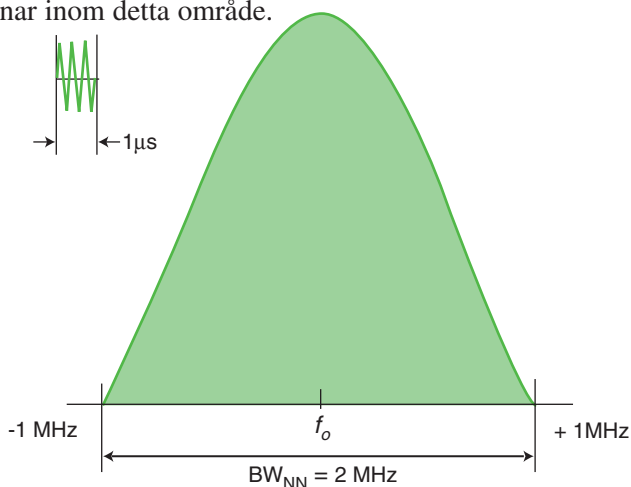


Bild 3:88. Huvudlobens noll-noll bandbredd (BW) då pulstiden är 1µs.

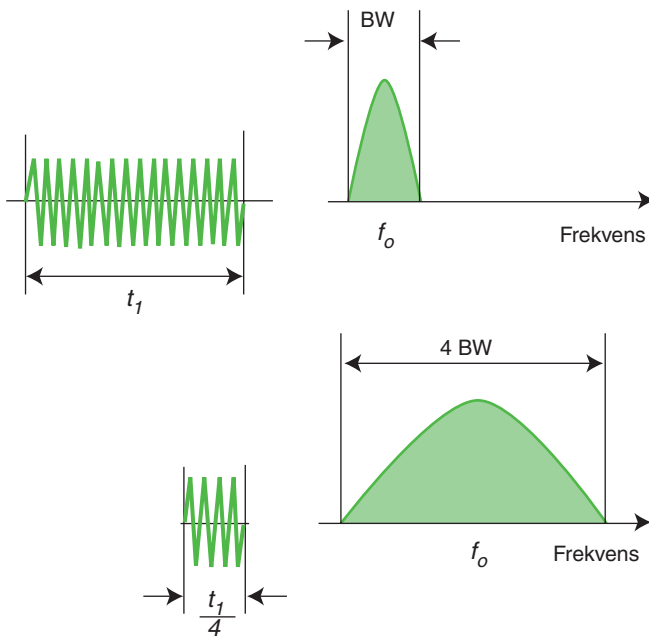


Bild 3:89. Ju kortare puls desto större bandbredd (BW).

Man kan helt enkelt dra slutsatsen att ju kortare puls desto bredare frekvensspektrum dvs bredden hos huvudloben är omvänt proportionellt mot pulslängden. Om pulslängden är kort, vilket den är hos många typer av radarstationer, så kan centrumloben ha en bandbredd på flera MHz.

Hitintills har resonemanget hur frekvensspektrumet ser ut gällt om man skickar en enda puls eller om man skickar en följd av icke koherenta pulser dvs att fasläget hos de olika pulserna varierar slumpmässigt.

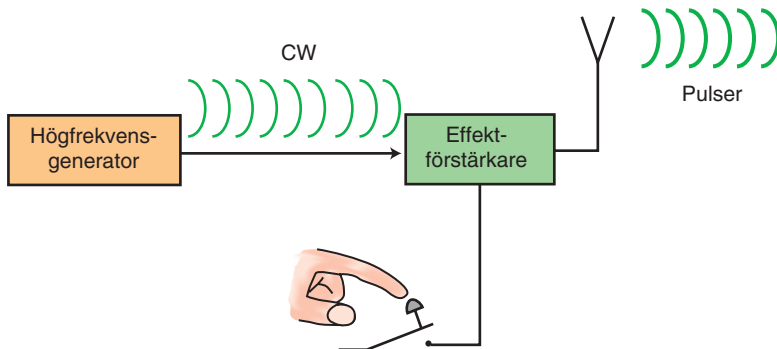


Bild 3:90. Sändning med hörfrekvensgenerator.

3. Radarlära

Man kan förändra experimentet något (bild 3:90) och använda en oscillator, en högfrequensgenerator (HFG) som får sända kontinuerligt.

Med hjälp av strömställaren kopplar man till och från en effektförstärkare. När man sluter strömställaren förstärks den mycket svaga bärvågen i en effektförstärkare t ex i radarns TWT och skickas ut som en puls genom antennen. Strömställaren kopplas in i en jämn takt den s k pulsrepetitionsfrekvensen (PRF). Det man har åstadkommit med hjälp av HFG:en är att skapa en koherent signal. Det innebär att det alltid finns ett helt antal våglängder mellan varje utsänd puls. Varje utsänd puls har alltså samma fasläge. Man brukar säga att man uppnår koherens genom att skära ut pulser ur en kontinuerlig signal. Om vi nu återgår till experimentet och skickar ut en stor mängd koherenta pulser och kontrollerar med mottagaren vilka frekvenser som mottar signalenergi.

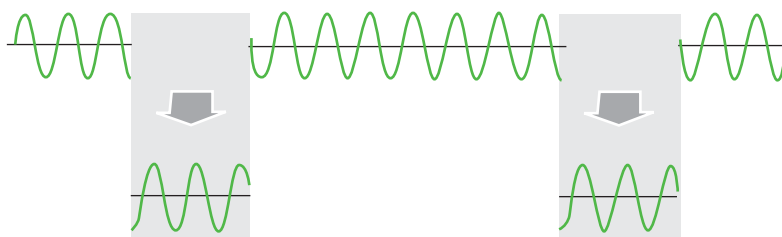


Bild 3:91. Skapande av en koherent signal.

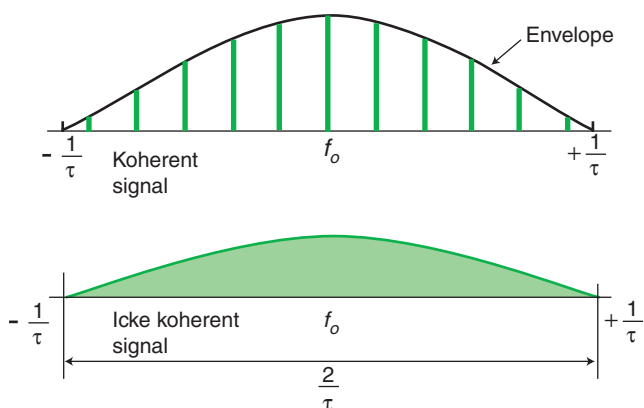


Bild 3:92. Överst, spektrum från en koherent signal och nederst från en icke koherent signal.

Man ser då att mottagaren får in signaler enbart på vissa bestämda frekvenser. Ett sådant spektrum kallas ett diskret spektrum. En närmare analys visar att envelopen (dvs ”konturen”) på kurvan är den samma som tidigare, dvs en sincfunktion. Amplituden är dock högre genom att energin bara är

fördelad på vissa frekvenser. Det visar sig att avståndet mellan dessa ”frekvenspinnar” bestäms av pulsrepetitionsfrekvensen. Ju högre PRF desto längre mellan frekvenskomponenterna. Huvudlobens bredd avgörs precis som tidigare av pulstiden.

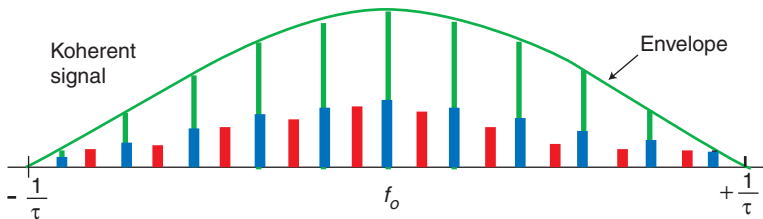


Bild 3:93. Sändspektrum från en koherent radar (grönt). Ekots spektrum från ett stillastående föremål eller från ett rörligt föremål som färdas med en blind hastighet (blått). Spektrum från ett rörligt eko (rött).

En koherent radar kan särskilja ett rörligt mål från ett stillastående mål genom att det rörliga målet ger upphov till en dopplerfrekvens. Om den reflekterade energin hamnar vid sidan av ”frekvenspinnarna” i sändspektrumet så kan radarn skilja det från stillastående ekon. Det beror på att ett markekos reflektrade energi alltid hamnar på samma frekvenser som sändpulsens spektrum. Ett rörligt eko hamnar oftast på andra frekvenser än sändspektrumet. Om ett rörligt mål färdas med en sådan hastighet att dess dopplerfrekvens gör att det förflyttat sig ”ett helt antal frekvens pinnar” så kan det inte skiljas från ett markeko. Dessa hastigheter benämns blinda hastigheter. Genom att ändra PRF:en ändras avståndet mellan frekvenspinnarna, det rörliga ekot hamnar då inte på samma plats som sändspektrumet och kan då detekteras. Denna metod används i en radar för att motverka blinda hastigheter och är orsaken till att blinda hastigheter undviks med en staggered PRF.

Frekvensmodulering (FM)

Ett annat sätt att modulera en signal med information är frekvensmodulering. I belyningsradarn PE-541/542 till Hawk-system låter man radarn skicka ut en FM-modulerad signal för att man ska kunna ge radarn en förmåga att mäta avstånd trots att det är en CW-radar. I avsnittet om brusstörning visas att FM-modulering är den kanske vanligaste metoden för att skapa brus.

Vid frekvensmodulering låter man den signal (t ex en talsignal) som man vill överföra påverka frekvensen hos en bärvåg. I bild 3:79d syns detta som om bärvågen ömsom trycks ihop (frekvensen ökar) och dras isär

(frekvensen minskar) då bärvågen har hög respektive låg amplitud, några begrepp.

- Centerfrekvens, f_c eller f_o , oscillatorns frekvens utan modulering.
- Deviation, Δf , maximala frekvensavvikelsen uppåt eller nedåt räknat från centerfrekvensen.
- Svinget, totala frekvensavvikelsen från högsta ($+\Delta f$) till lägsta ($-\Delta f$) frekvensen. Frekvenssvinget är således dubbelt så stort som frekvensdeviationen.

På bilden ser man att den frekvensmodulerade signalen hela tiden har en konstant amplitud. Detta innebär att man alltid kan använda sändarens hela effekt.

Som tidigare nämnts så innebär varje form av modulering att det uppstår en mängd nya frekvenser. Detta gäller inte minst vid FM-modulering. Hur FM signalens spektrum uppstår, är avsevärt mer komplicerat än vid amplitudmodulering. Nedan följer lite av matematiken rörande frekvensmodulation. Hur själva spektrumet uppstår är dock alltför komplicerat för att ta upp här.

Frekvensmodulerade signaler kan beskrivas med formeln

$$e = E \sin \left[\omega_c t + \frac{2\pi\Delta f}{\omega_m} \sin \omega_m t \right] \quad \text{där}$$

e = momentana spänningen hos utsignalen

E = bärvågens toppvärde

ω_c = bärvågens vinkelhastighet = $2\pi f_c$

Δf = maximal frekvensavvikelse, (som är proportionell mot modulations-signalens amplitud, inte dess frekvens)

f_m = den modulerande signalens frekvens

ω_m = den modulerande signalens vinkelhastighet = $2\pi \cdot f_m$

Vid frekvensmodulering kan konstateras att

- amplituden hos den modulerande signalen (informationen) bestämmer storleken på bärvågens frekvensdeviation.
- den modulerande signalens frekvens (f_m) bestämmer hastigheten på bärvågens frekvensdeviation.

Ekvationen kan förenklas genom att man inför ett modulationsindex.

$$M_f = \Delta f / f_m \quad \text{vilket ger}$$

$$e = E \sin(\omega_c t + M_f \sin \omega_m t)$$

Uttrycket för FM signalen är mer komplext än vad det först ser ut att vara eftersom det innehåller ”sinus av en sinus”.

Frekvenskomponenterna i FM-signalens spektrum är åtskilda med avstånd som är lika med modulationsfrekvensen f_m på det sätt som visas i bild 3:79.

I teorin har dessa sidoband en oändlig bandbredd redan då bärvågen bara är modulerad av sinusvåg. Men amplituden hos frekvenskomponenterna blir successivt allt lägre ju längre avståndet är från bärvågen. I praktiken säger man därför att bandbredden är:

Bandbredden $\approx 2 \cdot (\Delta f + f_m)$ Hz.

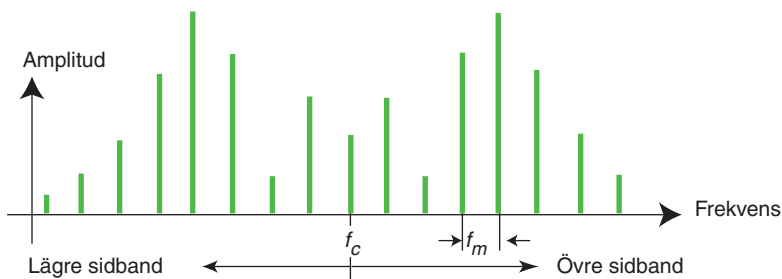


Bild 3:94. Frekvensspektrum hos en sinusvåg med frekvensen f_c frekvensmodulerad med en sinusvåg med frekvensen f_m .

Bild 3:94 visar ett exempel på ett spektrum då en kontinuerlig (oändlig) sinusformad signal har frekvensmodulerat en bärvåg. Även i detta fall uppstår ett helt spektrum av frekvenser. Man kan ju tro att om man påverkar en signal att förändra sin frekvens mellan ett högre och ett lägre värde så borde alla frekvenser mellan dessa två gränser finnas i spektrumet. Men så är det inte. Orsaken är att eftersom man har en kontinuerlig (oändlig) signal som modulerar bärvågen så kommer det repetitiva förloppet att göra att på vissa frekvenser så kommer signalerna från de olika svepen i motfas (destruktiv interferens). Detta resulterar i att, sett över tiden, så finns det ingen energi på dessa frekvenser. På andra frekvenser sker konstruktiv interferens, här uppstår ”frekvenspinnar” i spektrumet. Vi nöjer oss med att konstatera att avståndet mellan frekvenskomponenterna bestäms av modulationsfrekvensen, ju snabbare man påverkar bärvågens frekvens desto glesare mellan ”pinnarna”. Amplituden hos de enskilda pinnarna bestäms av modulationsindex M_f . Hur amplituden varierar med modulationsindex kan räknas ut med hjälp av s k Bessel-funktioner, vilket är komplicerat. I stället används ofta tabeller för Bessel-funktionerna. För ett visst modulationsindex kan man då avläsa den relativa amplituden hos de olika frekvenskomponenterna.

Några slutsatser av ett spektrums utseende

Det enda sätt som man kan göra för att verkligen bara sända ut en frekvens är att sända en kontinuerlig, oändligt lång, signal. Varje försök att på något vis påverka en sinussignal, t ex genom pulsning, fas- eller frekvensmodulering kommer att ge upphov till ett spektrum av olika frekvenser.

Om signalen görs kort ökar bandbredden dvs signalen sprids ut över fler frekvenser. En kort signal är bra om man vill ha god avståndsupplösning men detta innebär då att signalen får stor bandbredd. Kan man tvinga en signal att ha stor bandbredd så kommer den också att ha bra avståndsupplösning. På motsvarande vis gäller ju smalare bandbredd desto mindre informationsinnehåll. En ren kontinuerlig sinussignal har ingen information alls. Se mer om detta i avsnittet om störning av pulskompressionsradar.

Huvuddelen av radarns utsända energi finns i området kring bärvågsfrekvensen, den s k huvudloben.

Det koherenta pulståget ger upphov till ett diskret frekvensspektrum, dvs det finns bara signal på vissa bestämda frekvenser. Detta faktum gör det möjligt att särskilja den frekvensändring som ett rörligt eko ger upphov till från ett stilla stående markeko.

Ett ickekoherent pulståg eller en singelpuls kommer att ge upphov till ett kontinuerligt spektrum. Det finns alltså signalenergi på alla frekvenser. En ickekoherent radar kan därför inte upptäcka dopplerfrekvensen som ett rörligt mål ger upphov till. Orsaken är att om sändspektrumet innehåller alla frekvenser så kommer alla ekon, oavsett om de kommer från rörliga eller stillastående föremål också att innehålla alla frekvenser. De kan därför inte särskiljas.

Om man sveper en signal fram och tillbaka, dvs repetitivt, över ett område (FM-modulerar) så finns det signalenergi bara på vissa bestämda frekvenser och inte alla frekvenser.

Genom att frekvensmodulera en CW-signal så kan man ge en CW-radar förmåga att mäta avstånd.

Filter

Alla komponenter och kretsar dämpar – eller förstärker – vissa frekvenser mer än andra. Filter kan utformas för att dämpa vissa frekvensband i sådan omfattning att bandet i stort sett helt elimineras. Filter kan utformas som lågpasfilter, högpasfilter, bandpass- eller bandspärrfilter.

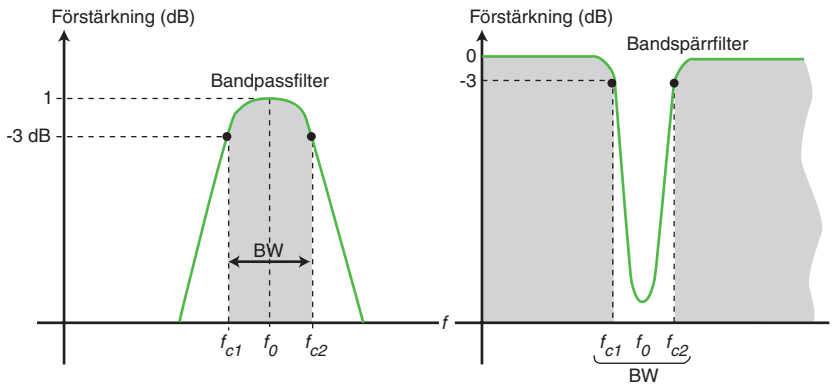


Bild 3:95. Bandpassfiltret spärrar frekvenser utanför sin bandbredd (BW).
Bandpassfiltret spärrar frekvenser inom sin bandbredd.

Ett lågpasfilter låter endast frekvenser från noll upp till en bestämd gränshäns passera medan ett högpasfilter bara låter frekvenser över ett visst värde passera.

Ett bandpassfilter låter endast frekvenser mellan två bestämda värden passera medan ett bandspärrfilter endast låter frekvenser över och under dem som valts i bandet passera. Radarns MTI-filter är egentligen ett bandspärrfilter som spärrar dopplerfrekvenser kring 0 m/s dvs markekon. I praktiken kan man inte göra filter med hur branta flanker som helst, de kommer alltid att släppa igenom en liten del oönskade signaler.

Brus

Oönskade signaler i ett system kallas brus. Brus i elektriska komponenter härrör sig från elektronernas rörelse, som oavsiktligt påverkar elektroniken. Det finns flera olika sorters brus. Den viktigaste är ofta det termiska bruset.

Termiskt brus härrör sig från den slumpartade rörelsen hos elektroner över absoluta nollpunkten vilket innebär allting varmare än -273°C eller 0°K . Energin fördelar sig likformigt över frekvensspektrumet och effekt-tätheten fås genom uttrycket

$$P_{\text{brus}} = k \cdot T \cdot B \quad [\text{W/Hz}]$$

Där k är Boltzmann's konstant ($1,3803 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) och T temperaturen i grader Kelvin. B är bandbredden i Hz. P_{brus} är således direkt proportionell mot både den absoluta temperaturen och bandbredden.

Brus kan även komma från andra kretsar genom magnetisk induktion, kapacitans eller beroende på att båda kretsarna delar en gemensam impedans som i en återledare till jord. Förhållandet mellan den önskade signal-

ens nivå och nivån hos systemets brus kallas signal/brusförhållandet (SNR signal to noise ratio).

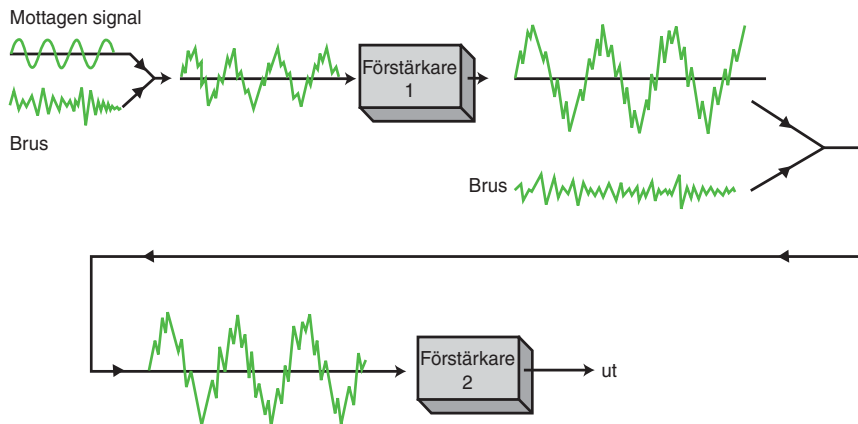


Bild 3:96. Brus på ingången av en mottagare kommer att förstärkas i alla efterföljande förstärkarsteg.

Brus som genereras redan före eller i den första förstärkaren i en mottagare riskerar att förstärkas tillsammans med signalen i alla efterföljande steg. Det är därför viktigt att försöka hålla bruset i början av mottagaren så lågt som möjligt genom bl a en bra antenn och ett lågbrusigt första förstärkarsteg.

Signalbrusförhållande och information

Brus kan fördärva data som sänds genom kommunikationssystemen eller en radars information. Hur bruset påverkar informationsöverföringen visades vid olika studier av kommunikation och informationsteori vilket bl a utvecklades av Hartley under 1920-talet, N Wiener under andra världskriget och C E Shannon under slutet av 1940-talet.

Shannon-Hartley's lag

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bitar/s} \quad \text{där}$$

C = informationshastighet [bps = bitar/s]

W = överföringskanalens bandbredd [Hz]

S = nyttosignalens medeleffekt [W]

N = brusets effekt [W]

Exempel 3:4

Antag att en förbindelse har en bandbredd på 3000 Hz och ett typiskt signal/brus förhållande på 20 dB. Bestäm den teoretiskt högsta informations- (data) hastighet som kan uppnås.

Lösning

SNR = 20 dB

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

$$20 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad \frac{S}{N} = 100. \text{ Här är SNR} = 20 \text{ dB omvandlat till "gångar".}$$

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

$$C = 3000 \cdot \log_2 (1+100) = 19\,963 \text{ bps}$$

För att beräkna \log_2 på en miniräknare som bara har 10-logaritmer kan följande utnyttjas:

$$C = 3000 \cdot \frac{\log_{10}(1+100)}{\log_{10}(2)}$$

Svar

Högsta teoretiska datahastighet är 19 963 bps.

C E Shannon visade hur bandbredden förhåller sig till mängden överförd information vid olika signalbrusförhållande. Ju sämre signalbrusförhållande desto mindre mängd information kan överföras under en viss tid. Om brusnivån i en radar ökar så kommer bli noggrannheten i avståndsbestämningen att minska, detta kan ses som att radarsignalens informationsinnehåll minskar. Detta kan också uttryckas som att, om bandbredden ökas hos en signal så förbättras signalbrusförhållandet. Detta är en av orsakerna till att en FM-radio, som ofta har stor bandbredd också har bättre ljudkvalitet än en AM-radio.

Alla system kommer förlora prestandan om signal/brusförhållande minskar och de kommer alla att ha ett minsta signal/brusförhållande under vilket dess prestanda blir oacceptabelt låg.