

Den första boken om **DIGITAL RADIO**

av Per Wallander

PERANT

Per Wallander Antenn AB
Strandängsstigen 2, 125 52 ÄLVSJÖ
Tfn o fax: 08 - 647 3680 mail: per@perant.se
<http://www.perant.se>

Per Wallander

Den första boken om DIGITAL RADIO

Första upplagan

ISBN 91-86296-07-8

Innehållet i denna bok är skyddat enligt Lagen om upphovsrätt, 1960:729, och får inte reproduceras eller spridas i någon form utan skriftligt medgivande av Per Wallander, som är copyrightinnehavare. Förbudet gäller hela verket såväl som delar av verket och inkluderar tryckning, kopiering, överföring till annat medium etc.

Copyright © Per Wallander 1998

Tryckt i Sverige / Printed in Sweden 1998
Smegraf, Smedjebacken

Förlag

PERANT

Per Wallander Antenn AB
Strandängsstigen 2, S-125 52 ÄLVSJÖ, SWEDEN
Telefon o fax: +46 8 647 3680
mail: per@perant.se
<http://www.perant.se>

INNEHÅLL

1 — INLEDNING	11
GSM. D-AMPS. PDC. CT2. DECT. CDMA. DAB — moderna digitala radiosystem.	
Analoga radiosystem. NMT 450 och NMT 900. AMPS. TACS. Trådlös telefon. CT1. Analogä temporära system i GSM-bandet.	
Digitala radiosystem. Digital radiolänk. Digital mobiltelefoni. CT2. GSM 900. DCS-1800 – numera GSM 1800. DCS-1900. D-AMPS (ADC) och PDC. DECT. CDMA – IS-95. W-CDMA. DAB.	
2 — BLOCKSCHEMA	17
Talets väg genom ficktelefonen. A/D-omvandlaren. Talkodaren (sändaren). Kanalkodaren (sändaren). SIM-kortet. Radiosändaren.	
Sedan kommer signalen till basstationen. Radiomottagaren. Kryptoenheten. Kanalkodaren (mottagaren). Talkodaren (mottagaren). Mobilteleväxeln.	
3 — STRÅLNING	23
Mekanisk pendel. Lägesenergi. Rörelseenergi. Elektroner.	
Elektrisk pendel.	
Maxwells ekvationer. Coulomb. Elektriska och magnetiska fenomen. Ørsted. Ampère. Faraday. Maxwell utvidgar Ampères lag.	
Strålar energi ut? Många tvivlade. Gravitationsvågor.	
När bildas strålning? Elektroner som accelereras eller retarderas. Stillastående elektron. Elektronen rör sig med konstant hastighet. Elektronen byter rörelseriktning. Strålningens riktningsdiagram.	
Att förhindra strålning. Motriktade strömmar. Naturen vill undvika strålning.	
Hertz försök. Hertz radiomottagare. Hertz parabol.	
Vad hände efter Hertz? Popov. Marconi.	
4 — STRÖM OCH OLIKA SÄTT ATT FÖRHINDRA RADIOSTRÅLNING	33
Vad händer när det "flyter" ström? När batteriets poler ansluts till en kabel. Hur fort rör sig laddningen? Vad är en laddning? När tänds lampan? Om strömbrytaren sitter vid lampan? Växelspänningsgeneratoren.	

Bandkabeln. Koaxialkabeln. Strålning från datorer. En ledare lindas som spole. En kabel lindas som spole. Stoppar obalansström. Även på koaxialkabeln. Så stoppas radiostrålning från kablar. Titta på bildskärmskabeln. Även i radiostasstationer.

Naturen kämpar emot. Naturen vill slippa stråla om den kan. Naturen skapar själv. Tekniken bakom skärmning. Lådan behöver inte vara tät. Arbeta med bomullsvantar. Antenner: Att lura naturen.

5 — ANTENNER 41

Våglängd. Hertz hade ingen radiosändare. Vilken frekvens fick Hertz? Halvvågsantenn. Pendeln sitter i radiosändaren. Kraftig radiostrålning: Många elektroner. Som en resonanskrets. Om antennen är för kort. Om antennen är för lång.

Lång-trådsantenn. Helixantennen. Horisontell polarisation. Vertikal polarisation. Cirkulär polarisation.

Avslutad (anpassad) kabel. Öppen kabel. Vik isär ledarna. Antennen kan ha vilken längd som helst upp till en hel våglängd. Sändaren vill att antennen är en halv våglängd.

Halvvågsdipol (dipol). Förkortad dipol. Tjocka antennben ger bredbandig antenn. Ficktelefonen: Ett förkortat antennben och ett bredbandigt antennben. Kvartsvåg på jordplan. Om jordplanet är större.

Antennvinst. Riktantenner. Enkel riktantenn. Yagi-antennen. Reflektorantenner. Parabolantenner.

Mottagarantenner. Samma riktningsdiagram och antennvinst. Samma impedans. Inte samma bandbredd. Verkningsgraden inte alltid så viktig vid mottagning.

6 — HUR KRAFTIG BLIR SIGNALEN VID FRI SIKT? 53

Fri rymd-utbredning. Isotrop antenn. Signalstyrkan från isotrop antenn. Mottagarantennens antennyta. Mottagen signaleffekt.

Decibel. dBW eller dBm? Dämpning mellan isotropa antenner. Dämpningen ökar 6 dB när avståndet fördubblas. Dämpningen ökar 6 dB när frekvensen fördubblas. Antennvinst G[dBi]. Kabeldämpning. Länkbudget. Vilka räckvidder kan man få? 12 GHz satellit-TV. Antennvinst. Parallellkoppla två antenner. Varifrån kommer vinsten? Parabolantennen. Parabol för 12 GHz satellit-TV.

Vilket täckningsområde? Effekten koncentreras inom en rymdvinkel. Högre antennvinst – smalare öppningsvinkel. 12 GHz satellitmottagning.

Med rundstrålande antenn krävs högre effekt när frekvensen ökar. Med parabol krävs lägre effekt när frekvensen ökar. Smart antenn. Dynamiskt cellutseende.

Den stora oredan! Några ord om antennvinst. dBd eller dBi.

7 — VILKA FREKVENSER VÄLJER VI FÖR MOBIL KOMMUNIKATION? 63

8 — NÄR DET INTE ÄR FRI SIKT	67
Dämpning i atmosfären. Vattenånga. Syre.	
Regndämpning. Frekvensband under 10 GHz. 23 – 42 GHz. 12 GHz satellit-TV.	
Dämpning i skog. Radiovågen dämpas. Radiovågen återutstrålas. Vegetationsdämpning vid mobiltelefoni. Vegetationsdämpning vid 12 GHz. 28 GHz eller 40 GHz i accessnätet.	
Fresnel-zon. Fri sikt. Om hela 1:a Fresnel-zonen når fram. Gäller även vid reflexion.	
Verklig vågutbredning. Utbredning vid dubbla frekvensen. Samma frekvens men dubbla avståndet. Uppmätta värden. Vilka räckvidder kan man få i typisk stadsmiljö? Mobiltelesystemen påverkas mest. Överräckvidder i fria riktningar ger störningsproblem. DECT-syste- met inte lika påverkat. Dämpning vid passage genom väggar. Fädningsmarginal som skydd mot kort reflex.	
9 — RADIOKOMMUNIKATION. PROBLEM	77
Envägsutbredning.	
Flervägsutbredning. Kort reflex. Lång reflex.	
Vad gör man åt korta och långa reflexer? Analog system. Digitala system.	
Analog system. Riktantenn skyddar mot långa reflexer. Rund- strålande antenner. kort reflex.	
Diversitet. Frekvensdiversitet. Rumsdiversitet. Vinkeldiversitet.	
Diversitet vid mobiltelefoni. Mikrodiversitet. Makrodiversitet. Antenndiversitet. Frekvensdiversitet.	
10 — VÄXELSPÄNNING	83
Växelspänning. Sinus-spänning. Fyrkantspänning.	
Fourier-transform. Två sätt att alstra fyrkantspänningen. Två sätt att beskriva fyrkantspänningen.	
Talspänning. Talspänningen i tidplanet. Talspänningen i frekvens- planet. Smalare bandbredd.	
11 — INFORMATIONSOVERFÖRING. MODULERING	87
Informationen – nyttosignalen. Bäraren – bärvågen. Modulering. Amplitud- eller frekvensmodulering.	
Amplitudmodulering. Är inte sinusformad. Amplitudmodulerade signalens bandbredd.	
Frekvensmodulering.	
Brusfriare mottagning. Amplitudmodulering. Frekvensmodulering. Slösa med landområde – eller frekvensutrymme.	

12 — ERFORDERLIG BANDBREDD	91
Hur ofta kan bärvågen ändras?	
Signaleringshastighet [baud]. Vi växlar mellan olika symboler. Vi skickar symboler per sekund.	
När bärvågen ändras är den inte längre sinusformad.	
Transmissionskanalen har begränsad bandbredd. Sidbanden vid dataöverföring. Bandbredd vid frekvensmodulering. Bandbredd vid amplitudmodulering.	
Hartleys lag. Signaleringshastighet i fasta telenätet.	
13 — FLERNIVÅMODULERING	97
Fler nivåer. Hur många olika utseenden kan man ha på symbolen?	
Shannons lag. Datahastighet i fasta telenätet. A/D-omvandlaren ger kvantiseringsbrus. 56 kbit/s i fasta telenätet.	
14 — FAS-AMPLITUD-MODULERING	103
När "börjar" sinussignalen? Visardiagram – ett annat sätt. Om amplituden ändras.	
Fasläget. Fasmodulering. Annan frekvens.	
Radiomottagaren. Amplituddetektor. Koherent detektor.	
Sändaren. Hur beskriver vi sändarsignalen? Två sändare samtidigt – på samma frekvens. Dubbla informationsmängden utan att öka signaleringshastigheten.	
Om två sinusspänningar med samma frekvens adderas. Telefonmodem 9.6 kbit/s. Radiolänk 155 Mbit/s. Synkroniseringen viktig. GSM.	
15 — HUR HÖG SÄNDAREFFEKT BEHÖVS?	111
Mottagarkänslighet. Två signaler: Den önskade signalen ... och brus. Brustemperatur T. Mottagarens brusfaktor F. Brustäthet – brus per Hertz. Viktigt att räkna med rätt värde på antenntemperaturen.	
Signal/brusförhållande S/N. TV. NMT. FM-rundradio.	
Mottagarkänsligheten beror på S/N och B.	
Digitala signaler. C/I. GSM. DECT.	
Om vi vill öka datahastigheten inom samma bandbredd? Dubbla datahastigheten. Tredubbla datahastigheten. Fyrdubbla datahastigheten.	
Högre datahastighet om det finns bandbredd. Dubbla datahastigheten. Tredubbla datahastigheten. Fyrdubbla datahastigheten.	
Högre datahastighet innebär ALLTID sämre mottagarkänslighet!	

16 — NYA MÖJLIGHETER ÖPPNAR SIG	117
Simplex. Telegrafi – en riktning i taget. Privatradio – en riktning i taget.	
Duplex. Sändning och mottagning måste ske samtidigt. Duplexfilter.	
Duplex vid digital radio. Använd ”bandspelare”. Fördel – blir simplex.	
Nackdel – fördröjning. Fler tidluckor – lyssna på annan bas MAHO.	
DECT.	
GSM.	
17 — TALKODNING	121
Kodning. Talets frekvensspektrum kan begränsas. Krav på talkodare för mobiltelefoni.	
Hur hög bithastighet behövs? Differentiell PCM. ADPCM. ADPCM klarar inte andra signalspänningar än tal.	
LPC – Linear Predictive Coding.	
RELK-kodaren. GSM utnyttjar en RELK-kodare.	
CELP. D-AMPS och PDC utnyttjar en CELP-codare.	
”Half-rate”-kodare.	
18 — SKYDD MOT KORTA REFLEXER	127
Korta reflexer. Frekvensdiversitet. Hur stort frekvenshopp krävs? Bandspridningssystem typ CDMA. Rumsdiversitet. Vinkeldiversitet. När fungerar rums- och vinkeldiversitet bäst? DECT använder rumsdiversitet på basen. Polarisationsdiversitet.	
Skydd mot korta reflexer genom kanalkodning. Kanalkodning i GSM. Fungerar bara på en föränderlig transmissionskanal.	
19 — SKYDD MOT LÅNGA REFLEXER	133
Långa reflexer. Kort reflex påverkar radiosignalens styrka – lång reflex påverkar modulationen. Dispersion – ”utsmetning”. Intersymbolinterferens – ISI.	
Riktantenn. Riktantenn enda möjligheten i analoga system. Riktantenn vid mobiltelefoni.	
Digital teknik ger nya möjligheter vid långa reflexer. Utjämnare. Utjämnare för fasta förbindelser. Dynamisk utjämnare för mobiltelefoni. Utjämnaren i GSM. D-AMPS har verkligt dynamisk utjämnare. Långa reflexer en fördel.	
20 — DIGITALA RADIOSYSTEM: CT2, DECT, GSM, D-AMPS, PDC	137
Jämförelser mellan CT2, DECT, GSM, D-AMPS och PDC. Trådlösa telefoner. Kanaldelning. Uteffekt. Duplexmetod. Multiple Access-metod. TDMA-ramar och tidluckor. MAHO. Talkodning. Kanalkodning. Felskyddet i GSM är optimerat för användning utomhus.	

Interleaving. Talfördröjning i GSM, D-AMPS och PDC. Modulering. FSK. CT2 och DECT använder GFSK. GSM använder GMSK. QAM. QPSK – 2 bit per symbol. 1/4-DQPSK.

Dynamisk frekvensallokering i DECT. Kanalväxling i DECT.

21 — DIGITALA RADIOSYSTEM: CDMA OCH DAB. 149

GSM använder frekvenshopp för att hoppa bort från korta reflexer. Om man byter frekvens så ofta att varje databit sänds på flera frekvenser? Om man byter frekvens så ofta att den långa reflexen inte hinner fram? Frekvensen behöver inte hoppa – den kan svepa. Hur hög sändareffekt behövs? Störande signaler i luften.

Lokaloscillatorn – digital modulator. GSM-modulatorn. Varför två modulatorer? Vi lägger ihop datasignalen och spridningssignalen. Med ringmodulator fungerar det. DS-CDMA. Måste filtreras. Mobiltelefoni-CDMA. Vi kan inte lura naturen. Stort behov av ortogonala kodord. Återskapas före detektorn. W-CDMA.

CDMA – GSM – en jämförelse. Variabel bithastighet. Samexistens med andra radiosystem. Svårigheter vid CDMA.

DAB (Digital Audio Broadcast). COFDM. Kodning. Långa reflexer – intersymbolinterferens. Samma frekvens över hela landet. Hur kopplar man ihop 1536 sändare? Sändarsignalen skapas "matematiskt".

22 — AM, FM och CDMA – ETT FYSIKALISKT SYNSÄTT 159

Amplitudmodulering. Vi lever på tidsaxeln. Frekvensspektrum är "parallella processer". Olinjära förstärkarsteg. Bandbredds-begränsning.

Frekvensmodulering. Frekvensmodulering är EN signal. I cirkeldiagrammet. Detektering av FM-signalen. FM är FLERA signaler. Många sidband. Udda vinkelmodulerar – jämna amplitudmodulerar. Vad händer om man filtrerar FM-signalen? Vad händer om signalen matas genom en klass C-förstärkare? Gaussiskt filtrerad MSK. Högklassiga FM-mottagare.

Att "stänga av" en signal. Måste FM-moduleras. Ingen bärvåg – bara två sidband. Stäng snabbt – brett spektrum. Stäng med ringmodulator.

GSM utnyttjar två ringmodulatorer. Fasmodulering genom amplitudmodulering. Vridning är frekvensskift. Vridningen får ta max en datasymbol. Ju högre symbolhastighet – desto större frekvensskift.

En växelspänning kan aldrig "hoppa".

CDMA är "frekvenshopp". Inte "hoppfrekvens" men väl "glidande frekvens".

INDEX 169

FÖRORD

Vad är att förstå?

En definition kan vara: Om man klarar att beskriva hur signalen ser ut när den gått genom ett tekniskt system, då förstår man.

Med denna definition är det likvärdigt om vi uppnår resultatet genom att räkna, dvs via en abstrakt matematisk kalkyl, eller genom att tänka, i hjärnan fundera ut hur signalen påverkats.

Men vänd på problemet: Signalen som kommer ut ur systemet ser inte ut som den borde. Vilken del i systemet är trasig? Det är denna typ av frågeställning som flertalet ingenjörer ställs inför:

- de som skall bygga första prototypen.
- de som skall driftsätta levererad utrustning hos kund.
- de som sköter underhåll av tekniska system.

Matematiken behöver en korrekt beskrivning av den felaktiga signalen, beskriven på sådant sätt att den passar de matematiska formlerna. Ändå kan matematiken oftast bara ge en mängd olika felorsaker, inte lokalisera felet.

Den mänskliga hjärnan kan börja fundera även om vi inte har en exakt beskrivning av utsignalen. Titta på oscilloskopbilderna så ser du ungefär vad som hänt med signalen. Sedan börjar hjärnan med uteslutningsmetoden:

- Vilka fel har jag varit med om tidigare?
- Hur såg signalen ut vid dessa tillfällen?

Nästa steg är felsimulering:

- Om den komponenten går sönder, hur påverkar detta utsignalen?

Matematiken — tillsammans med datorn — är överlägsen i att ta fram en noggrann beskrivning av utsignalen i ett fungerande system. Mänskliga hjärnan däremot är överlägsen när det gäller att snabbt få fram möjliga felorsaker, och via kompletterande mätningar lokalisera felet. Men för att klara detta behöver hjärnan en beskrivning av systemet som den kan förstå.

Denna bok beskriver digital radio på sådant sätt att hjärnan förstår.

Tag nu inte den här boken alltför bokstavigt

Boken innehåller fysikaliska modeller som passar hjärnans sätt att arbeta. Men det är inte samma sak som att de här modellerna är de enda. Du kanske förklarar på annat sätt? Säkerligen finns ett tredje sätt!

Ingenjörens uppgift är inte att bråka om vilken modell som är rätt eller fel. Ingenjörens uppgift är att få tekniska system att fungera. Icke fungerande tekniska system skall åtgärdas eller repareras så att de fungerar. För att klara detta måste ingenjören tänka. Vilka modeller du använder är i sammanhanget betydelselöst så länge du klarar ditt jobb.

Mycket nöje!
Älvsjö i oktober 1998



1 — INLEDNING

GSM, D-AMPS, PDC, CT2, DECT, CDMA, DAB — moderna digitala radiosystem

Den integrerade kretstekniken möjliggör massproduktion av elektronikrustning till låg kostnad. Inte bara datorkretsar som processorer och minnen masstillverkas utan även radiokretsar. Den serietillverkade satellitmottagaren för mottagning av direkt-sänd TV i 12 GHz-bandet har en känslighet man inte vågade drömma om på 1960-talet när kommunikationssatelliter började användas.

Snabbast har utvecklingen gått inom mobiltelefonin, mycket beroende på att det inte saknats konsumenter. Men ju fler som skaffar mobiltelefon, desto svårare blir det att införa nya system. En kund som inget har skaffat gärna det modernaste. Men en kund som har mobiltelefon, en nöjd kund, byter inte gärna till något nytt.

Inom marksänd rundradio, TV och ljudradio, har inte lika mycket hänt. Detta beror inte på att tekniska utvecklingen stått still, utan på att konsumenterna inte vill byta till helt ny TV eller ljudradiomottagare. Ekonomisk livslängd hos befintlig mottagarutrustning är lång. Men digital TV är på gång, och DAB, digitala ljudradiosändningar har startat.

Inledningskapitlet är bara en uppräkningslista av de viktigaste radiosystemen under 1980- och 1990-talet, i den ordning de kom till. Detta är intressant eftersom varje nytt system bygger på föregående system och de erfarenheter man skaffade sig.

Mobiltelefoniutvecklingen startade 1970

1 aug 1970 bildades Ellemtel där Ericsson och Televerket samordnade sina utvecklingsinsatser för att ta fram en elektronisk televäxel, AXE. Ericssons dator- och produktionskunskap och Televerkets telenäterfarenhet resulterade i en dator som klarade att tänka så som "ett telenät tänker". AXE har därför snabbt kunnat anpassas som styrenhet till flertalet av världens mobiltelesystem.

Den andra viktiga händelsen var att Televerkets utbyggnad av rundradionäten, TV och FM-ljudradio, var slutförd. Plötsligt fanns duktiga radioingenjörer som blev sysslolösa, och fick idéer om att nu skulle de utveckla ett helautomatiskt mobiltelefonnät. Televerkets ledning trodde inte på mobiltelefoni, marknaden ansågs för liten, men radioingenjörerna fick hållas. Tillsammans med kollegorna i Danmark, Norge och Finland drog de igång NMT 450, det första helautomatiska mobiltelesystemet som täckte flera länder.

Analoga radiosystem

NMT 450 och NMT 900

En arbetsgrupp med deltagare från Danmark, Finland, Norge och Sverige drog i början av 1970-talet upp riktlinjer för ett helautomatiskt mobiltelefonsystem som skulle kunna användas över hela Norden. Resultatet blev NMT 450 som öppnades för trafik i slutet av 1981 i Sverige och Norge (en månad tidigare öppnades det första NMT 450-systemet, i Saudi-Arabien), samt i början av 1982 i Danmark och Finland.

Tillströmningen av abonnenter blev större än väntat. Eftersom det skulle dröja innan GSM blev klart, infördes i Norden som temporär lösning 1986 ett NMT-system i GSM-bandet, NMT 900.

AMPS

Ungefär samtidigt utvecklades i USA ett automatiskt mobiltelefonsystem som fick namnet AMPS (Advanced Mobile Phone Service). Ett provsystem öppnades 1979 i Chicago. AMPS kom i reguljär drift något senare än NMT 450.

AMPS och NMT uppvisar stora likheter vad gäller radiotekniken, men NMT hade redan från början ett bättre telenätstöd med bl a "roaming" mellan länder, vilket betyder att NMT-nätet hittar NMT-abbonenten oavsett i vilket av länderna han/hon befinner sig.

Spanien och Österrike fick NMT 450-system 1982 resp. 1984, dock på andra frekvenser än det nordiska NMT 450. Därför kunde en svensk NMT 450 inte användas i dessa länder.

TACS

Flertalet övriga europeiska länder öppnade analoga mobiltelefonsystem 1985. Några byggde på NMT, de övriga var varianter av en vidareutvecklad AMPS med bättre telenätstöd, benämnd TACS (Total Access Communication System).

Trådlös telefon

Trådlösa telefoner liknar mobiltelefonerna, men sändareffekten är lägre. Telefonen skall

bara kommunicera med den egna basstationen och behöver ett starkt identifieringsskydd så man inte kommer in på fel bas (grannens telefon).

De första trådlösa telefonerna dök upp för över 20 år sedan i USA och Asien. De låg, mer eller mindre lagligt, i frekvensband runt 40 MHz, och kallas allmänt CT0 (0th generation of Cordless Telephones). Säkerheten (komma in på grannens bas) och trafikkapaciteten var låg. Dessutom störde de annan radiotrafik. CT0 blev aldrig tillåten i Sverige.

CT1

I början av 1980-talet behövde Europa en standard för trådlös telefon, och detta blev CT1 (1st generation of Cordless Telephone). CT1 utnyttjar 40 kanaler som är 25 kHz breda, totalt 1 MHz. Upplänken ligger inom 914 – 915 MHz och nedlänken inom 959 – 960 MHz.

Analoga temporära system i GSM-bandet

Det europeiska frekvensband i 900 MHz-bandet som i början av 1980-talet reserverades för GSM omfattar delbanden 890 – 915 MHz (upplänken) och 935 – 960 MHz (nedlänken). Frekvensområdet är naggat i kanten av trådlös telefon (CT1) som utnyttjar översta 1 MHz i varje delband. Dessutom finns i flertalet europeiska länder analoga system, som liksom NMT 900 var temporära lösningar i väntan på GSM. Dessa frekvenser övertas gradvis av GSM-operatörerna.

Analoga mobiltelesystem

- **NMT 450** och **NMT 900**
- **AMPS** (Advanced Mobile Phone Service)
- **TACS** (Total Access Communication System)
- **CT1** (vanlig trådlös telefon)

Digitala radiosystem

På 1970-talet gick långdistanstelefontrafiken som analoga signaler på koaxialkabel och radiolänk. Samtidigt kom behovet av dataförbindelser för överföring av digital information.

För att slippa bygga parallella förbindelser i långdistansnäten, analoga förbindelser för tal och digitala förbindelser för data, föddes tanken att digitalisera talet, så att både tal och datatrafik skulle kunna överföras på samma förbindelse. Så föddes IDN (Integrated Digital Network), som 10 år senare blev digitalt ända hem till abonnenten (ISDN).

Digital radiolänk

Nackdelen med analoga förbindelser är att brus adderas till nyttsignalen. Om man skall ringa långt kommer brustillskotten på varje delsträcka att summeras. Därför måste varje radiolänkhopp (eller koaxialkabelsträcka) ha extremt gott signal/brus-förhållande.

Om talet digitaliseras kan "ettorna" och "nollorna" återskapas efter varje delsträcka. Så länge man inte misstolkar ettorna och nollorna (bitfel) kan talet överföras hur många delsträckor som helst utan att tal-kvaliteten (datakvaliteten) försämras.

De analoga radiolänkarna klarade 1800 samtidiga telefonsamtal. Analoga radiolänkar för 2700 telefonsamtal hade börjat installeras. I stället digitaliserades telefonsamtalen och man kombinerade 1920 samtal till en datahastighet av ca 140 Mbit/s.

De första digitala radiolänkarna klarade att överföra 140 Mbit/s i samma frekvensraster som de analoga länkarna. Men på några håll klarade man inte riktigt samma hopplängder, utan fick dela upp länkhoppet på två hopp. Dagens digitala radiolänkar är för 155 Mbit/s SDH.

Vad vann man med digitaliseringen av radiolänknätet? Med samma frekvensutrymme, samma sändareffekt, samma parabolantennor, nästan samma hopplängd, överförs 1920 digitala telefonsamtal, att jämföras med 1800 eller 2700 analoga. Vad är fördelen?

Man slipper brustillskott. Och det finns tek-

niska möjligheter att skydda sig mot de vågutbredningsstörningar som då och då kan drabba långa radiolänkhopp (fädning). Exempel på detta är radiolänken till Gotland, speciellt utsatt eftersom den går över vattnen. Denna förbindelse, skyddad både med rums- och frekvensdiversitet, uppvisar lägre bitfelshalt och högre tillgänglighet (kortare avbrott vid fel) än optokabeln som ligger på botten till Gotland.

Digital mobiltelefoni

Radiolänkar befinner sig i mycket gynnsam radiomiljö. Antennerna placeras så att man har fri sikt. Inga andra närbelägna radiosändare använder samma frekvens. Enda problemet är långa radiolänkhopp, över 20 km, där oroligheter i atmosfären (temperatur- och fuktighetsskikt) kan påverka vågutbredningen.

Vid mobiltelefoni har man sällan fri sikt mellan antennerna. Dessutom kommer reflekterade signaler från flera håll (flervägsutbredning), något som är svårt att motverka med riktantenn på mobiltelefonen eftersom den är i rörelse.

Vidare är risken överhängande att man blir störd av andra mobiltelefoner (co-channel interference) eftersom frekvenserna måste återanvändas så tätt som möjligt för att man skall få in många abonnenter på tillgängligt frekvensutrymme. Allt detta gör det extra svårt att överföra digitala signaler. Men de digitala systemen ger möjligheter till motmedel som inte kan användas i analoga mobiltelefonsystem.

CT2

Första digitala mobila systemet var CT2 (Cordless Telephone version 2), en trådlös telefon som nästan bara är en digital variant av CT1. Medan CT1 klarar sig med två delband om 1 MHz för 40 trafikkanaler, behövde CT2 ett frekvensband som var 4 MHz brett för att få plats med 40 kanaler. Men tack vare att talet digitaliserats var CT2 svår att avlyssna. NMT och CT1 kan ju avlyssnas med vanlig "scannermottagare".

GSM 900

Nästa stora digitala system var GSM, ett mobiltelesystem gemensamt för hela Europa. Tack vare intensivt frekvensplaneringsarbete lyckades man över hela Europa frilägga två frekvensband, 890 – 915 MHz och 935 – 960 MHz, för GSM-systemet. Tack vare detta fick man helt fria händer vid specificeringen av GSM att välja vilken bandbredd som helst på radiokanalen.

Under specificeringsarbetet fanns förslag på olika tekniska lösningar, från smalbandiga lösningar med 4 samtal per sändare till mycket bredbandiga system med över 60 samtal per sändare. Praktiska försök med olika provsystem genomfördes i Paris. Ericsson levererade ett provsystem för 8 samtal per sändare.

Riktigt bredbandiga system ger fördelar i städerna där man har hög trafikvolym och stor mängd reflexer i radioutbredningen. Nackdelen är kort räckvidd. Eftersom GSM även skulle täcka landsbygd och glesbygd enades man om 8 samtalskanaler per sändare.

DCS-1800, numera GSM 1800

I England var GSM-bandet ännu inte frilagt, men det fanns operatörer som kunde få frekvenser i 1800 MHz-bandet. Därför utarbetades skyndsamt en specifikation som nästan blev identisk med GSM 900. Vad som skiljer är frekvenserna, 1710 – 1785 MHz upplänk och 1805 – 1880 MHz nedlänk, och frekvensavståndet mellan de båda delbanden, 95 MHz, samt lägre uteffekt hos ficktelefonerna.

Även Tyskland införde GSM 1800 på ett tidigt stadium. Flera europeiska operatörer kompletterar i dag sina nät med GSM 1800 för att utöka kapaciteten, och tillverkarna tar fram kombitelefoner som automatiskt kopplar om mellan 900 MHz och 1800 MHz under pågående samtal. På detta sätt behöver inte GSM 1800 byggas heltäckande utan används för att avlasta i trafiktäta områden.

DCS-1900

I USA används numera GSM-tekniken på 1900 MHz. Leverantörerna utvecklar ficktelefoner som automatiskt växlar mellan alla olika GSM-frekvensband. Det är därför inte

otänkbart att vi i framtiden kommer att kunna röra oss fritt mellan alla olika GSM-system, trots att de ligger i olika frekvensband.

D-AMPS (ADC) och PDC

Vid införandet av digitala system i 800 MHz-bandet krävde amerikanska och japanska myndigheter och operatörer att de digitala systemen skulle använda samma frekvenskanaler som befintliga analoga mobiltelesystem (AMPS). Därför behövdes digital teknik med 30 kHz (USA) respektive 25 kHz (Japan) kanalbredd. Standarden för D-AMPS och PDC kom att bygga på ett förslag från Ericsson med 3 talkanaler per sändare.

En intressant skillnad mellan D-AMPS och PDC är att D-AMPS använder utjämnare som skydd mot långa reflexer, medan PDC inte har utjämnare men däremot två antenner, antenndiversitet, på ficktelefonen.

DECT

Nästa steg i Europa var att standardisera en avancerad trådlös telefon som även skulle kunna användas på stora företag med många användare på liten yta. Resultatet blev DECT (Digital European Cordless Telecommunications), med svenska Televerket och Ericsson som pådrivande. Frekvensbandet 1880 – 1900 MHz avsattes för DECT.

DECT är ett bredbandigt system med 12 dubbelriktade talkanaler på varje frekvens. Systemet väljer själv mellan 10 frekvenskanaler, och vilken av de 12 talkanaler (tidluckorna) som skall användas, s k dynamisk frekvensallokering.

DECT finns även som trådlös telefon i hemmet. En intressant tillämpning är en DECT basstation sammanbyggd med ISDN-anlutning. På en ISDN-anlutning kan man ha upp till 8 abonnemang, 8 separata telefonnummer. Via DECT får varje nummer sin egen trådlösa telefon. Men bara 2 telefoner kan användas samtidigt (begränsning i ISDN-anlutningen).

CDMA, IS-95

I samtliga digitala system som hittills behandlats får varje användare sin egen tidlucka. Många användare delar på tiden, TDMA, Time Division Multiple Access.

Under början av 1990-talet har ett system utvecklats och standardiserats (i USA) under beteckningen IS-95, som bygger på bandspridningsteknik. Varje användare får som identitet ett speciellt kodord, ett or och nollor, och med hjälp av detta kodord sprids hans dataström över kanalbandbredden. Ett annat kodord sprider på annat sätt, och tack vare detta kan de olika dataströmmarna separeras vid mottagningen. Tekniken kallas CDMA, Code Division Multiple Access.

En fördel med CDMA är att det är lätt att ge varje användare den bithastighet han/hon i varje ögonblick vill ha, eller betalar för. I de tidigare systemen är bithastigheten ett värde som ligger fast i systemet.

W-CDMA

Möjligheterna att erbjuda variabel bithastighet gör CDMA-tekniken lämplig för nästa generations mobila telekommunikations-system som även skall kunna användas för högre bithastigheter. CDMA-teknik ingick i bägge förslagen, som den europeiska standardiseringsorganisationen ETSI hade att ta ställning till, som 2000-talets mobiltelestandard, W-CDMA respektive TDMA/CDMA.

DAB

Samtidigt med utvecklingen av digitala radiosystem för mobiltelefoni pågår utveckling av

digitala system för rundradio, såväl för ljudradio som för digital TV.

Digital Audio Broadcast (DAB) är ett digitalt system för ljudradio, där 6 högklassiga stereoprogram sammanlagras till en datasignal med bithastigheten 2,3 Mbit/s.

Att överföra hög bithastighet via radio är svårt. Därför delas databitarna upp på 1536 parallella sändare som var och en sänder med 1550 bit/s, en extremt låg hastighet. Bredbandig digital radio åstadkommes i detta fall genom att "parallellkoppla" många sändare med låg hastighet. *Hög bithastighet över radio är svårt!*

Digitala mobiltelesystem

- **CT2** (2nd generation of Cordless Telephone)
- **GSM 900** (Global System for Mobile communications)
- **GSM 1800** (DCS-1800, GSM i 1800 MHz)
- **D-AMPS** (Digital AMPS, tidigare ADC, American Digital Cellular)
- **PDC** (Personal [Pacific] Digital Cellular, tidigare JDC, Japan Digital Cellular)
- **DECT** (Digital European Cordless Telecommunications)
- **CDMA, IS-95** (Code Division Multiple Access)
- **W-CDMA** (Wideband-DCMA)
- **DAB** (Digital Audio Broadcast)

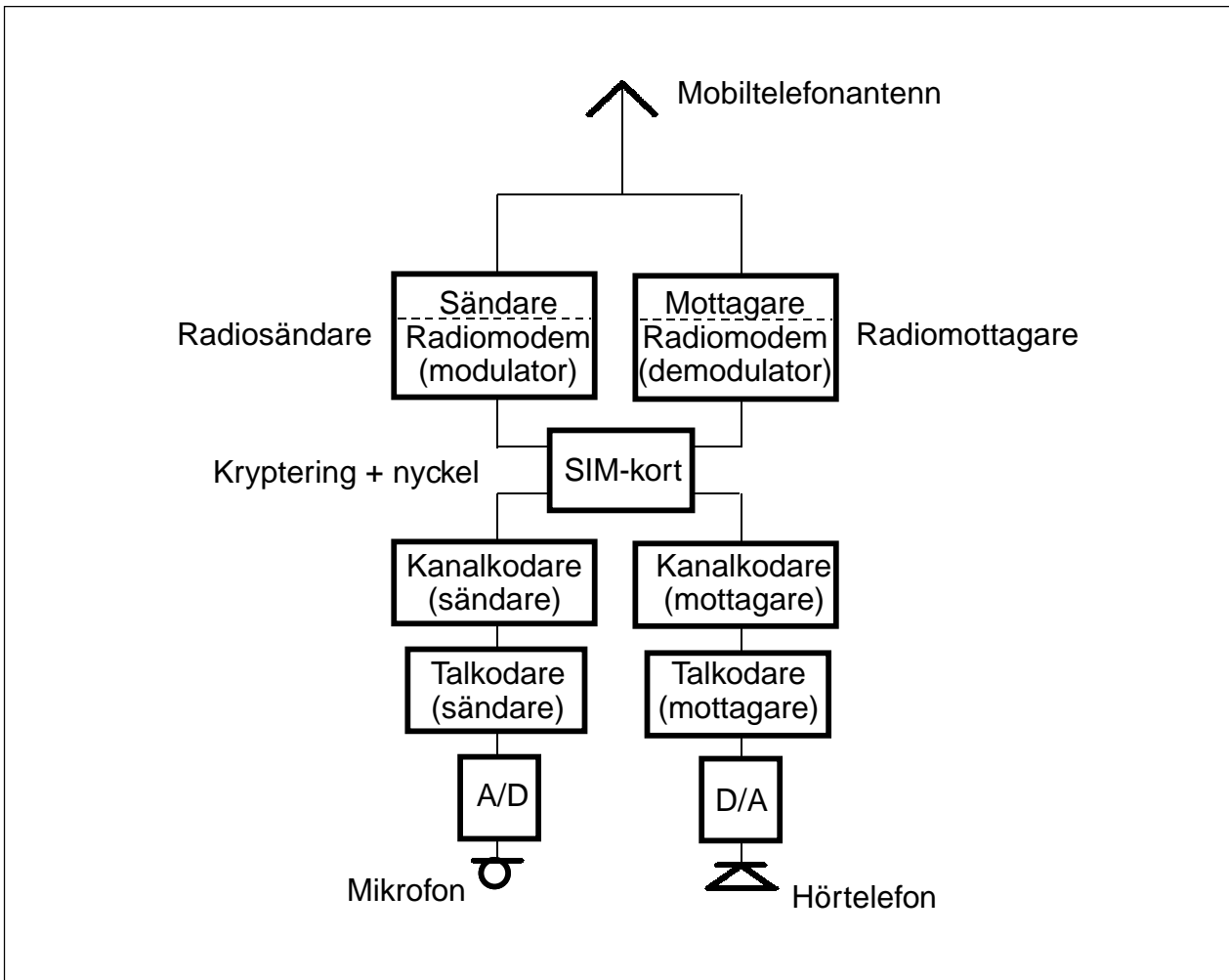
2 — BLOCKSCHEMA

- **Först en rundvandring genom ficktelefonen och basstationen för att se vad man gör med signalen — inte för att förstå, utan bara för att få överblick.**

Nya digitala system — man bländas av alla förkortningar men glömmer att den svaga länken fortfarande är överföringen i luften, själva "radiodelen" i systemet.

Denna bok beskriver problem vid radio-kommunikation, hur man kringgår problemen vid analog radio, vilka möjligheter som öppnar sig genom digital radio, men också något om nya problem som tillkommer.

Vi börjar med en "snabbvandring" genom GSM-ficktelefonen och basstationen, bara för att orientera oss.

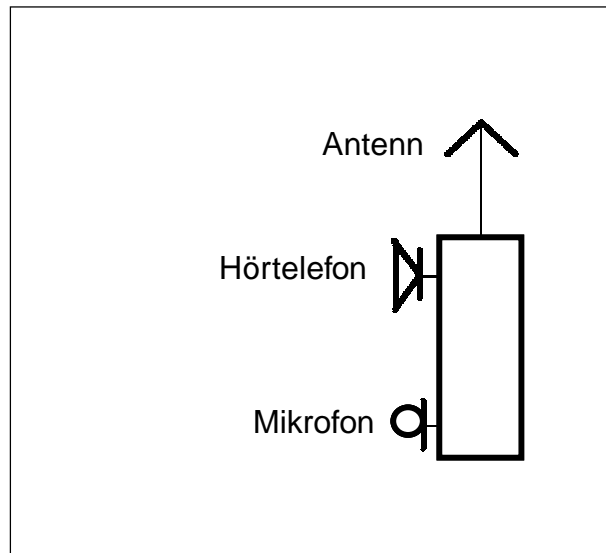


Blockschema

Bilden här intill visar ficktelefonen så som våra ögon ser den, ett hölje med antenn. I höljet finns ett hål att prata i, där sitter mikrofonen, och en massa småhål att lyssna i, där sitter hörtelefonen. Dessutom finns batteriet, och SIM-kortet. Detta är vad våra ögon ser.

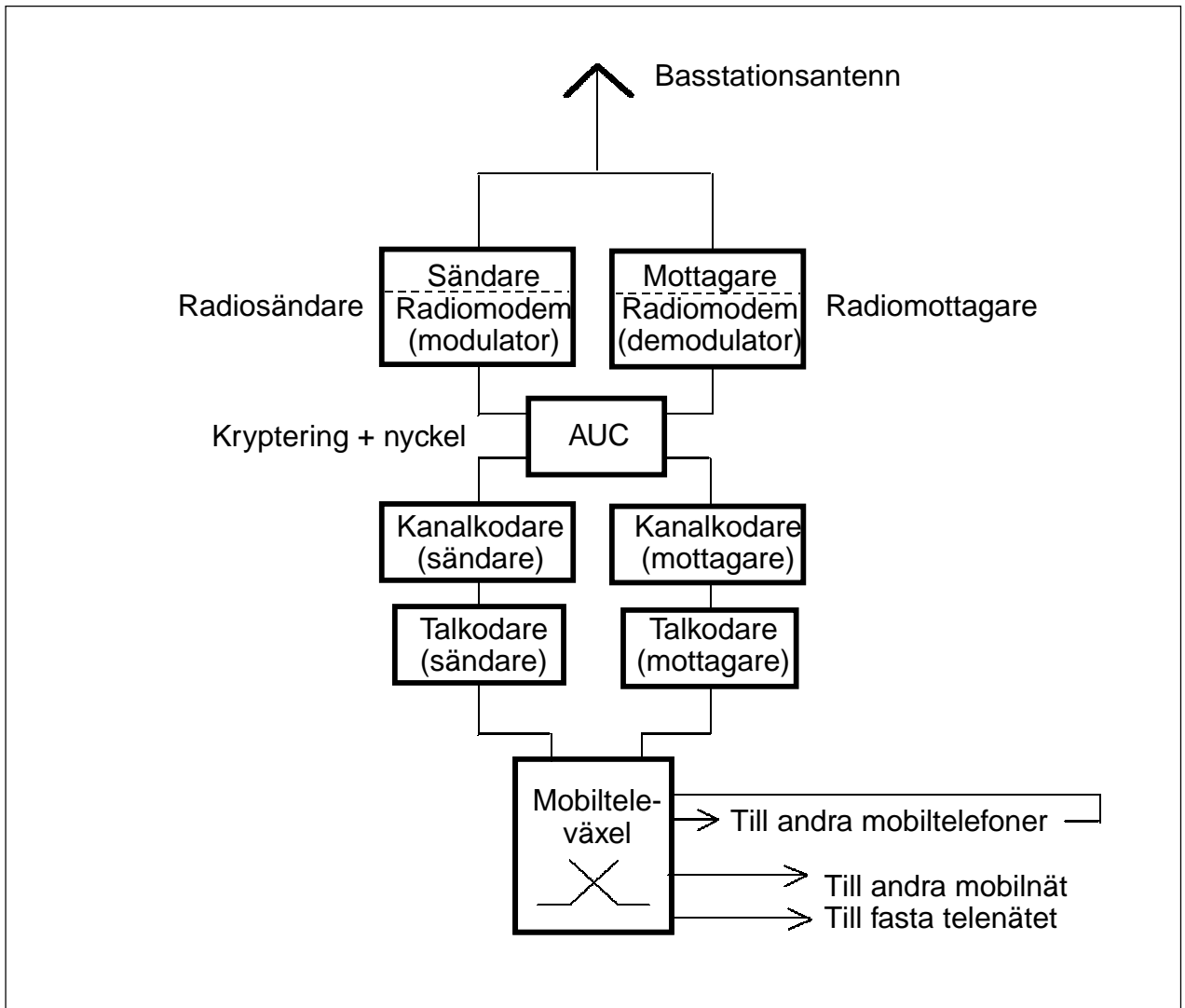
Bilden ovan är en noggrannare beskrivning av ficktelefonen. Ficktelefonen har delats in i block, ett blockschema, där varje block innehåller en funktion, en process som signalen genomgår. Blockschemat är därför en funktionsbeskrivning av ficktelefonen.

Radioapparater som arbetar med analoga signaler består normalt av förstärkarsteg som konstruerats för att utföra en viss funktion. Hos dessa apparater överensstämmer



oftast den mekaniska uppbyggnaden med blockschemat.

Digitala signaler bearbetas vanligen i en mikroprocessor. Samma mikroprocessor kan under viss tid utföra arbete i ett block, under annan tid i ett annat block. I radio-



apparater för digitala signaler kan man därför inte fysiskt identifiera de olika blocken på samma sätt som i analoga radioapparater. Men fortfarande är blockschemat den bästa utgångspunkten för diskussioner om vad som händer och varför man gjort just så.

Första delen av boken behandlar radiostrålning, antenner och vågutbredningsstörningar mellan antennerna. Som avslutning beskrivs vad man gör för att åtgärda vågutbredningsstörningar i analoga radiosystem.

Därefter följer de olika blocken i ett digitalt radiosystem, från mikrofonen via digitalise-

ring, talkodning (bildkodning), kanalkodning, modulering/demodulering, med beskrivningar av hur man gör och vilka möjligheter som finns att i dessa block åtgärda vågutbredningsstörningarna.

Detta är det unika med digital radio. Vågutbredningsstörningar som i analoga radiosystem enbart är problem kan med avancerad digital signalbehandling inte bara "neutraliseras" så att de inte ställer till problem. I vissa fall kan dessa störningar innebära fördelar för de digitala radiosystemen.

Det digitala radiosystemet kan ge säkrare förbindelse med vågutbredningsstörningar än om vågutbredningsstörningar inte finns.

Talets väg genom ficktelefonen

Lisa tar fram sin ficktelefon och ringer till Kalle i fasta telenätet. Vi skall följa Lisas röst fram till Kalle.

A/D-omvandlaren

Från mikrofonen går talspänningen in i A/D-omvandlaren. Här sker sampling, kvantisering och kodning, dvs den analoga växelspänningen från mikrofonen omvandlas till en digital beskrivning av talspänningen (vågformskodad). För att få god överensstämmelse mellan talspänningen och den digitala beskrivningen lämnar A/D-omvandlaren 104 kbit/s.

Talkodaren (sändaren)

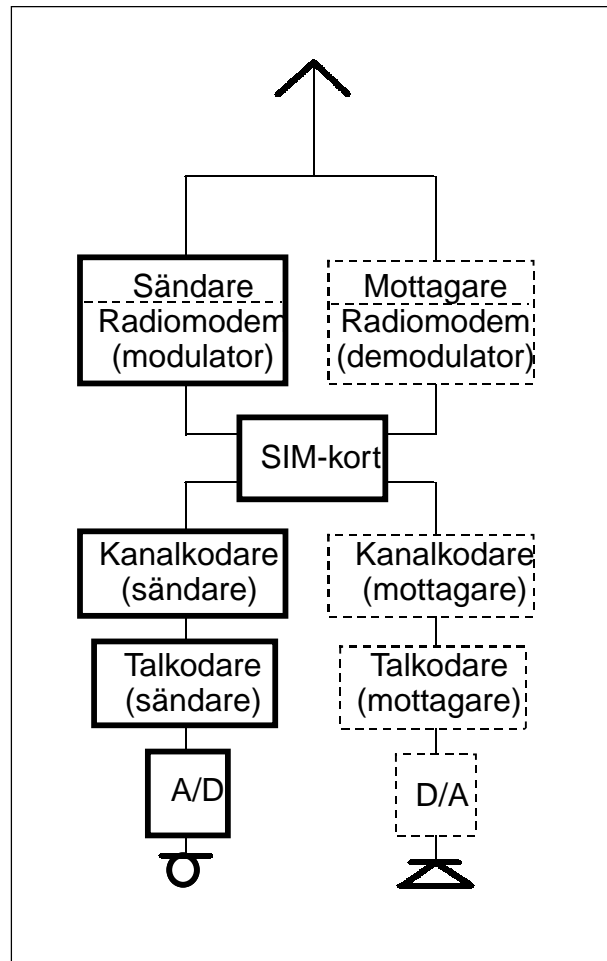
Frekvensbandet som är reserverat för GSM klarar viss maximal bithastighet per ytenhet (cell). Ju lägre bithastighet varje ficktelefon har, desto fler abonnenter kan ringa samtidigt. Målet är därför att beskriva talet med så låg bithastighet som möjligt.

I talkodaren ändras talsignalen från vågformskodad till en kod som gör det möjligt att återge mänskligt tal med 13 kbit/s. Datasignalen är inte längre en kopia av talspänningen, utan styrinformation så att man i mottagaren kan återskapa något som för vårt öra liknar det ursprungliga talet.

Vid video/TV-sändning används bildkodare som på motsvarande sätt minskar bithastigheten. Signalen från en TV-kamera har bithastigheten 216 Mbit/s. Genom avancerad bildkodning (t ex MPEG) kommer man ner i så låga bithastigheter som 4 Mbit/s vid fullgod TV-kvalitet och 1 Mbit/s vid VHS-kvalitet.

Kanalkodaren (sändaren)

I kanalkodaren lägger man till databitar för felupptäckt (CRC) och felrättning (faldningskodning) samt blandar om databitarna (interleaving) för att klara att rätta databitar som blivit felaktiga på grund av vågutbredningsstörningar. Dessa extra databitar gör att datahastigheten stiger till 22.8 kbit/s.



SIM-kortet

SIM-kortet innehåller kryptonyckel och mikroprocessor som krypterar datasignalen. Krypteringen sker i själva kortet. Datasignalen går alltså in och ut ur SIM-kortet under pågående samtal. Detta för att SIM-kortet inte skall behöva lämna ifrån sig kryptonyckeln. Det är därför i princip omöjligt att få tag i kryptonyckeln.

Nödsamtal (112) kan genomföras utan SIM-kort, men då går talet okrypterat.

Radiosändaren

Först adderas ytterligare ca 20% databitar i en "läarsekvens" som utnyttjas av mottagaren för att lära sig hur ett or och nollor ser ut när de gått genom luften och påverkats av vågutbredningsstörningar.

Sedan omvandlas datasignalen till analog signal i modulatern i ett modem som har stora likheter med de 33,6 kbit/s-modem vi ansluter till telenätet.

Därefter "flyttas" den analoga signalen till 900 MHz-bandet, förstärks i "Power Amplifier" och matas till antennen.

Sedan kommer signalen till basstationen

Radiomottagaren

Mottagaren tar emot och förstärker antennsignalen, samt matar den till demodulatoren som är mottagande delen av radiomodemet.

Därefter utnyttjas "läarsekvensen" för att mottagaren skall lära sig hur ett och noll ser ut med de vågutbredningsstörningar som finns just nu på radioförbindelsen.

Kryptoenheten

Informationen måste dekrypteras för att bli begriplig. GSM-nätet hämtar din kryptonyckel från en speciell databas, AUC (Authentication Center).

Kanalkodaren (mottagaren)

Kanalkodaren stuvlar tillbaka (interleaving), kontrollerar och rättar bitfel den klarar att rätta samt avgör om "datapaketet" är tillräckligt felfritt för att kunna användas.

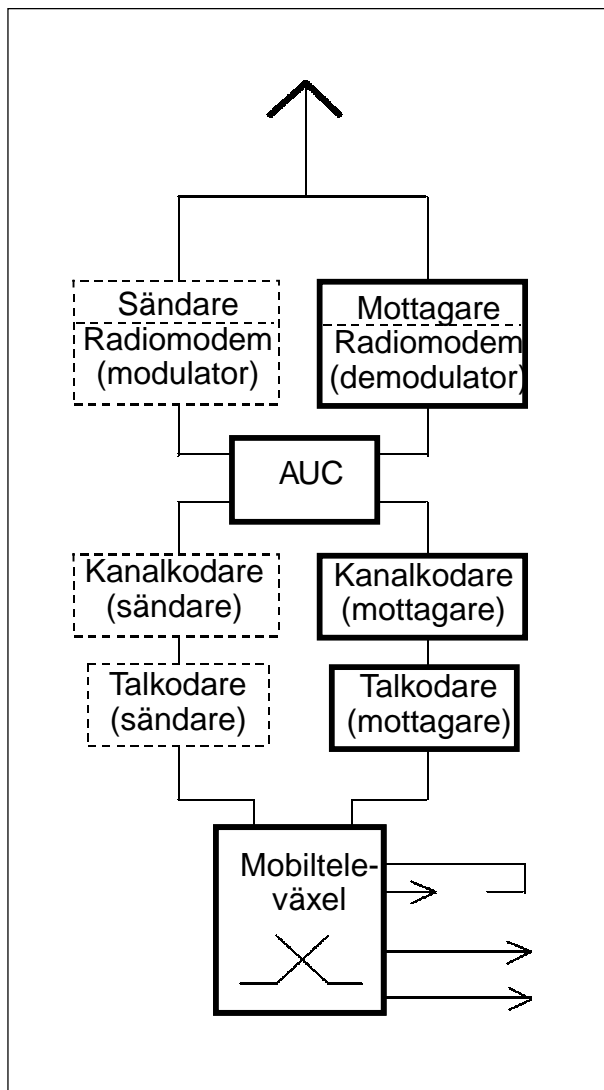
Talkodaren (mottagaren)

Ut från kanalkodaren kommer talet kodat till datahastigheten 13 kbit/s. Detta måste omvandlas till 64 kbit/s vågformskodning (PCM) som är den digitala signal televäxlarna arbetar med.

Mobilteleväxeln

I mobilteleväxeln sker hopkopplingen av samtalen. Ringer du till annan abonnent i samma GSM-nät sker hopkopplingen i denna växel eller i en parallellväxel. Varje mobilnät har flera växlar parallellt för att klara alla samtal.

Ringer du till abonnent i annat GSM-nät, NMT-nät eller fasta telenätet skickas samtalet till respektive nät via en "gatewayväxel", en typ av "brandvägg" som ser till att andra nätoperatörer inte kan komma in och hämta otillåten information. Här sker även avräkning, dvs man sparar uppgifter om



samtalsvolym för att kunna ta betalt för "överlämnat samtal".

3 — STRÅLNING

- Hur hade livet sett ut idag om inte Maxwell tyckt att det fattades något i Ampères lag?
- Eller om inte Hertz lyckats bygga sin otroligt genialiska radiosändare?
- Eller om Marconi hade nöjt sig med det som forskarna sade, att jorden är rund och radiovågor går rakt fram.

Maxwells "upptäckt" av elektromagnetisk strålning är intressant. Maxwells fysikaliska "känsla" sade honom att eftersom Faradays lag beskriver vad som händer när magnetfältet ändras, då borde även något hända när elektriska fältet ändras. Maxwell formulerade detta matematiskt som en utvidgning av Ampères lag.

Sedan började han använda matematiken. Vad är matematik? Matematik är inte bara ett språk som "exakt" beskriver fysikaliska fenomen, formulerade som "fysikaliska lagar". Matematik är även logiska regler som låter oss beräkna vad som händer när vi utför ett experiment som lyder under flera lagar samtidigt. Genom experiment har forskarna verifierat riktigheten i enskilda påståenden, lagar. Men vad blir följderna av alla dessa lagar tillsammans?

Följden av Maxwells utvidgning av Ampères lag blev radiostrålning. Maxwell kunde inte bevisa sitt påstående om elektriska fältet, "förskjutningsströmmen", men riktigheten har senare verifierats när Hertz visade att radiovågor existerar, och bär sig åt på det sätt som matematiken beskriver.

Vad är strålning?

Elektrisk energi finns t ex i ett batteri. Energi finns även i elektriska fältet i en kondensator, eller i magnetfältet genom en spole. Men detta är energi som är "bunden" till något föremål. Denna energi kan inte förflyttas snabbare än man flyttar på föremålet.

Om energi i form av elektriskt fält omvandlas till energi i form av magnetfält kan det under vissa omständigheter, vid själva omvandlingen, bildas energi som består av både elektriskt och magnetiskt fält. Denna energi "sliter sig loss och rymmer", den rusar i väg som elektromagnetisk energi (strålning) med ljushastigheten. Och de energikällor som bildade denna strålning förlorar motsvarande mängd energi.

Ett mellanting är energi som följer en kabel. Detta är "strålning", elektriskt och magnetiskt fält, som förflyttar sig med ljushastigheten, men bara längs kabeln.

Motsvarande strålning finner man hos kroppar som har rörelseenergi respektive lägesenergi. Vid omvandling från rörelse- till lägesenergi, eller tvärt om, kan energi frigöras i form av gravitationsvågor, gravitationsstrålning, energi som rusar i väg med ljushastigheten.

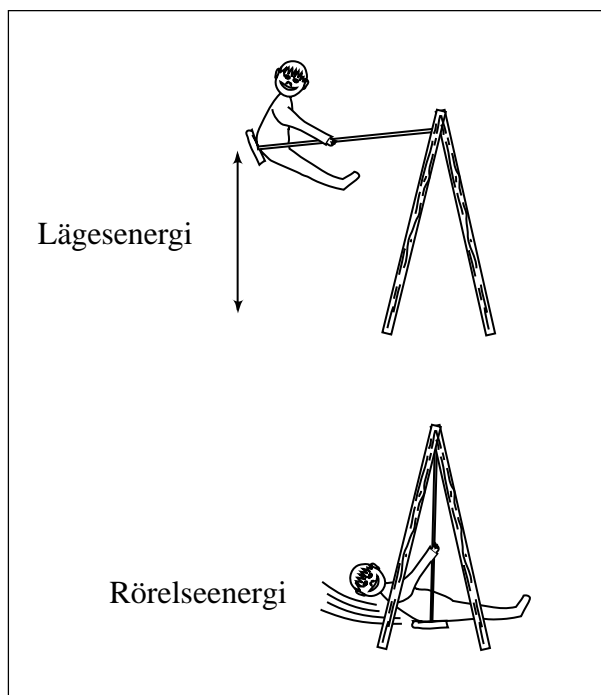
Mekanisk pendel

Lägesenergi ...

Hos gungan (pendeln) pendlar energin mellan lägesenergi...

... och rörelseenergi

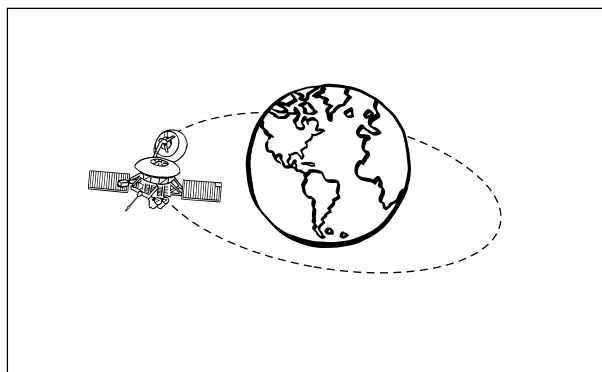
Energi kan inte försvinna. I skolan fick jag lära mig att gungan håller på i oändligheten om vi saknar luftmotstånd och friktion. Idag tror vi annorlunda.



Både läges- och rörelseenergi

Satelliten är intressant därför att den har både läges- och rörelseenergi. Lägesenergin beror på avståndet till jorden. Rörelseenergin beror på hastigheten.

Vad händer om satelliten närmar sig jorden? Avståndet minskar och då minskar lägesenergin. Vart tar den frigjorda lägesenergin vägen? Den blir rörelseenergi. Satelliten snurrar fortare.



Elektroner

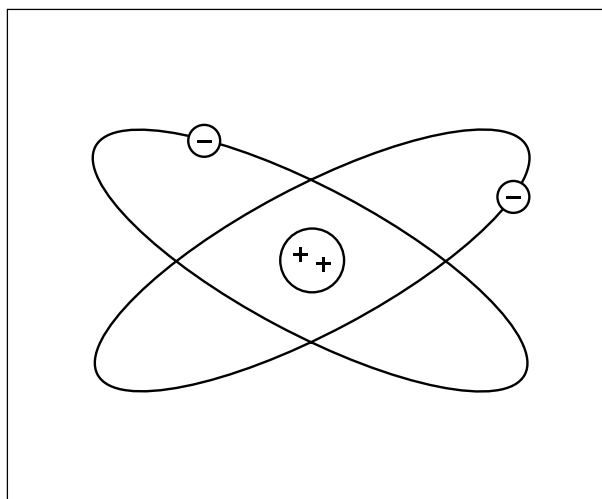
Runt atomkärnan snurrar elektroner. Denna bild liknar jorden med sina satelliter. Kan elektronerna ha läges- eller rörelseenergi?

Elektroner med lägesenergi

Elektrisk spänning är elektroner med lägesenergi. Elektronerna vill över till pluspolen.

Elektroner med rörelseenergi

Elektroner i rörelse, elektrisk ström, är elektroner med rörelseenergi.



Elektrisk pendel

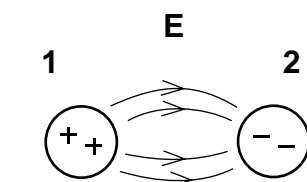
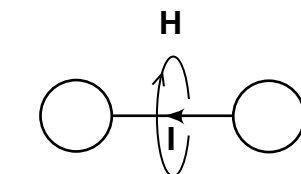
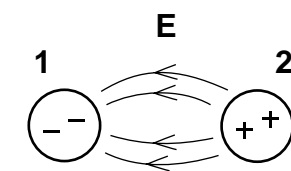
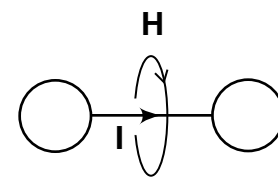
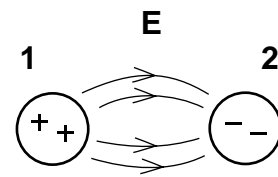
Om vi flyttar över elektroner från klot 1 till klot 2 får klot 2 överskott på elektroner. Elektronerna vill tillbaka till klot 1. De har fått lägesenergi (lika med energin i det elektriska fältet mellan kloten).

Om vi sammanbinder kloten med en metalltråd rusar elektronerna över till klot 1. Men rusningen ger ström. Ström är rörelseenergi (energin i magnetfältet som bildas runt ledaren). Vad händer med rörelseenergin när alla elektroner kommit över?

När strömmen avtar minskar magnetfältet och det frigörs rörelseenergi som "pressar" över ytterligare elektroner till klot 1. Nu får vi i stället för många elektroner på klot 1. Pendeln har svängt till andra läget,

... och pendeln svänger tillbaka ...

... och vi är där vi började. Vi har startat en elektrisk pendel.



Maxwells ekvationer

Coulomb

Coulomb studerade dragningskraften mellan elektriskt laddade klot (1785). Coulombs lag kan skrivas på följande sätt:

$$\nabla \cdot D = \rho$$

Elektriska och magnetiska fenomen

Vid slutet av 1700-talet kände man till såväl elektriska fenomen, i form av elektriska laddningar, som magnetiska, t ex permanentmagneter, som kompassnålen, men trodde att de elektriska och magnetiska fenomenen var helt oberoende av varandra.

Man visste att två nya magneter bildas om magneten delas. Det går inte att få nord- eller syd-poler för sig. De hör ihop. Gauss kom på att detta kan skrivas på följande sätt:

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ørsted

År 1819 upptäckte dansken Ørsted att kompassnålen visar fel om den placeras nära en strömgenomfluten ledare. Magneten påverkas av de elektriska laddningarna!

Ampère

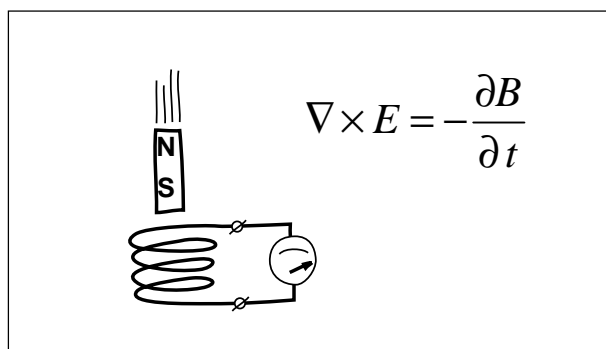
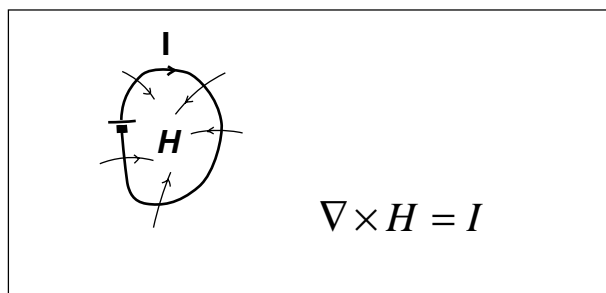
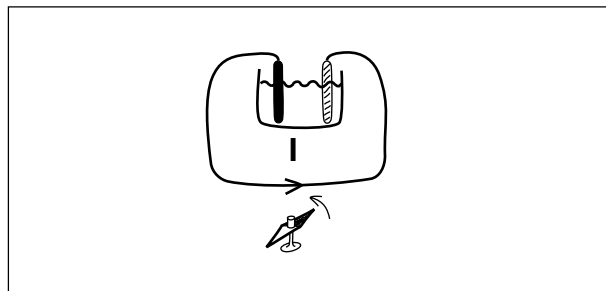
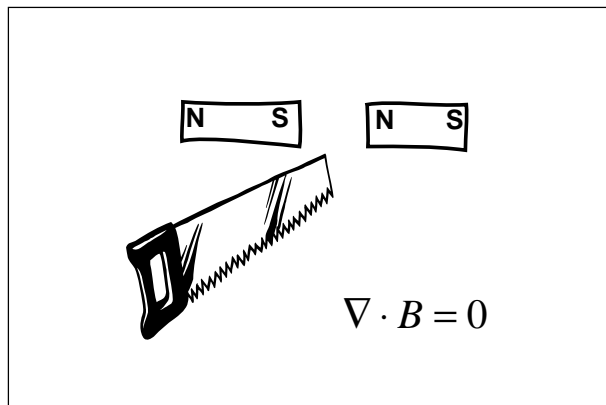
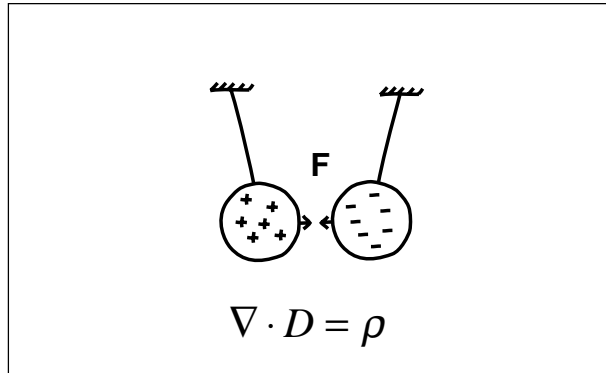
Ampère beräknade magnetfältet genom trådslingan. Detta skrivs på följande sätt:

$$\nabla \times H = I$$

Faraday

Faraday skulle visa att magneten inte påverkade strömmen i spolen, men tappade magneten och upptäckte att om magnetfältet ändras fås spänning (generatorprincipen). Detta skrivs på följande sätt:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$



Maxwell utvidgar Ampères lag

Maxwell tyckte att något fattades. Faradays lag beskriver vad som händer om magnetfältet ändras. Varför finns inget uttryck som beskriver vad som händer om elektriska fältet ändras?

Maxwell utvidgade Ampères lag. Om man kopplar in en kondensator kan det inte gå några laddningar mellan plattorna. Men där finns elektriskt fält. Förändringar i detta elektriska fält skulle kunna påverka magnetfältet på samma sätt som strömmen:

$$\nabla \times H = I + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Strålar energi ut?

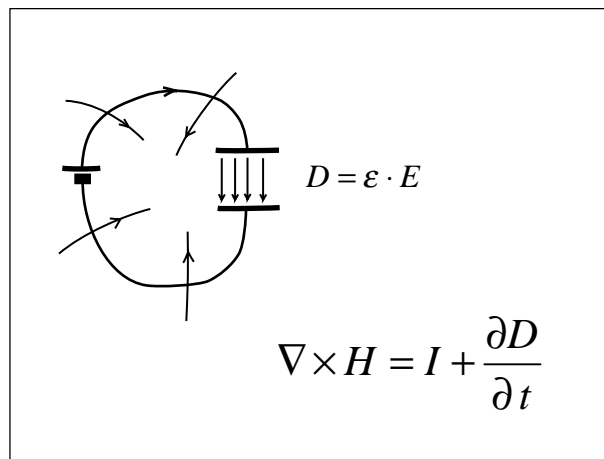
En mekanisk pendel i vakuum som är upphängd utan friktion pendlar i det oändliga, trodde man. Men när Maxwell tillämpade dessa ekvationer på en elektrisk pendel i vakuum med en ledare utan resistans, blev resultatet märkligt:

Han fick växling mellan lägesenergi och rörelseenergi, elektriskt fält och magnetfält. Men dessutom kom en liten del av energin att stråla ut som elektromagnetisk strålning! Energi försvann från pendeln! Pendlingen bör enligt Maxwell avklinga mot noll! Detta var något mycket sensationellt.

Många tvivlade

Maxwell beskrev sina teorier inför Vetenskapsakademien i London år 1864. År 1873 publicerade han en bok i ämnet. Men först när Hertz gjort sina experiment 1887, åtta år efter Maxwells död, började man acceptera Maxwells idéer. Och än i dag har ingen lyckats utföra ett enda experiment som motsäger hans teorier.

Maxwell kallade energin för elektromagnetisk strålning. Han räknade ut att energin rör sig utåt med ljushastigheten, och antog därför att ljus skulle kunna vara en typ av elektromagnetisk strålning.



Gravitationsvågor

Numera tror man (Einstein) att det finns strålning även från en mekanisk pendel. Inte elektriska vågor, men gravitationsvågor.

Gravitationsvågorna är svåra att upptäcka. Tänk dig gravitationsvågor så kraftiga att väggarna i våra hus gungar. Men eftersom gravitationsvågorna även sätter oss i gungning, med en fördröjning som motsvarar ljushastigheten, så kan vi inte se att väggarna gungar. Allt runt oss inklusive vi själva gungar.

Forskarna har letat i världsrymden och funnit en mekanisk pendel, två tunga himlakroppar som roterar runt varandra, och ändringen i rotationshastighet svarar mot den energiförlust man skulle få på grund av gravitationsvågor, jfr Nobelpriset i fysik 1993.

Många förslag till evighetsmaskiner, perpetuum mobile, innehåller omvandling från läges- till rörelseenergi och tvärt om. Vid denna omvandling finns alltså risk att man "förlorar" energi som strålar ut som gravitationsvågor. Även om vi kan undvika all friktion är det därför omöjligt att hålla igång en rörelse som innebär förändring av läges- och rörelseenergi.

Vi kan i själva verket inte röra oss utan att förlora energi i form av gravitationsvågor. Har du "känt" någon som kommit smygandes bakifrån? Känner vi med hörseln eller känner vi gravitationsvågorna? Att smyga innebär att undvika häftiga rörelser. Häftiga rörelser ger kraftigare gravitationsstrålning.

När bildas strålning?

Elektroner som accelereras eller retarderas

Elektromagnetiska vågor, radiovågor, uppstår när elektriskt laddade partiklar, vanligtvis elektroner, ändrar hastighet eller rörelseriktning. En praktisk känsla för vad som händer får man av följande modell:

Stillastående elektron

Runt elektronen finns ett elektriskt fält, fältlinjer (som representerar energin i elektronens laddning). Dessa elektriska fältlinjer byggs upp med ljushastigheten, varefter de bara finns där, som långa rep.

Elektronen rör sig med konstant hastighet

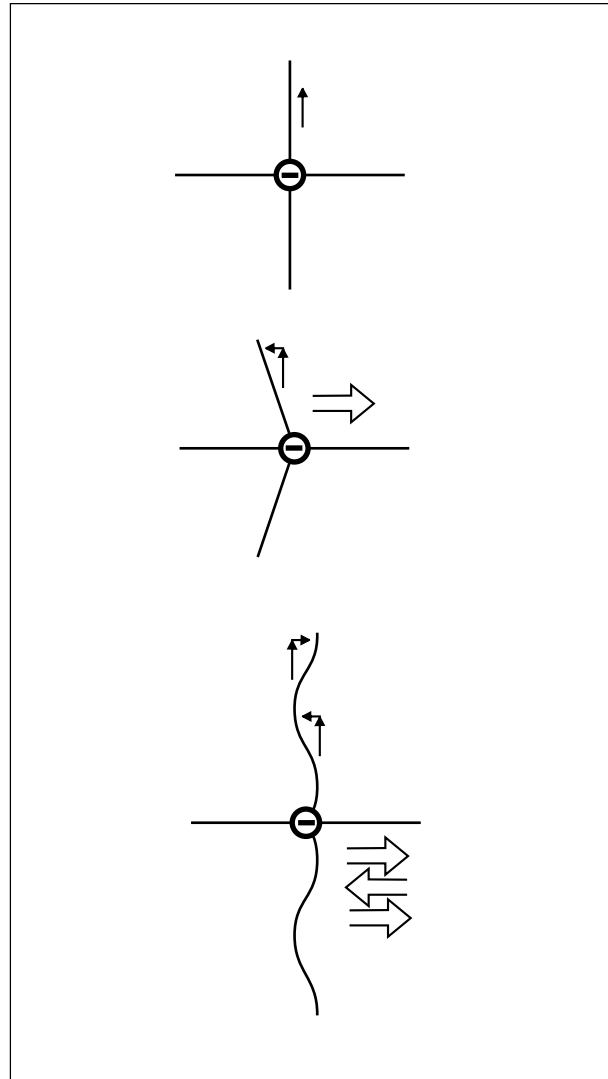
Om elektronen rör sig med konstant hastighet (likström) flyttas den punkt där fältlinjerna utgår. Detta medför att fältlinjer (repen) i sidled tycks luta bakåt. Men de är fortfarande räta (ingen kan på avstånd avgöra om elektronen står still eller rör sig med konstant hastighet). Lutningen kan åskådliggöras genom att lägga till en liten fältkomponent vinkelrätt mot fältlinjen.

Elektronen byter rörelseriktning

Om elektronen byter rörelseriktning skall fältlinjerna luta åt andra hållet. Fältlinjerna får en krök som rusar utåt med ljushastigheten.

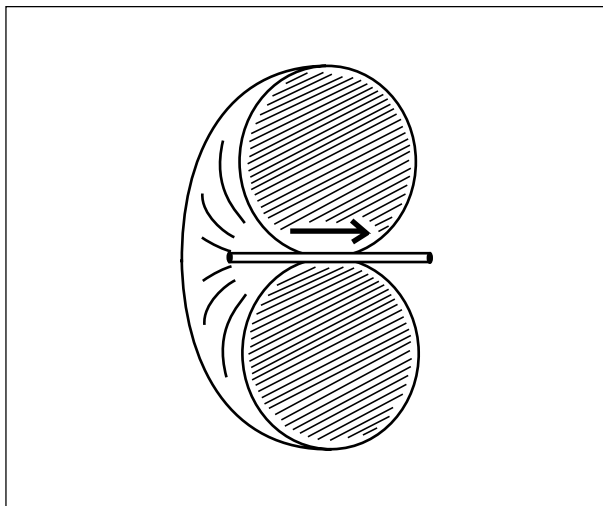
Låt elektronen gunga fram och tillbaka (växelström). Då kommer de sidoriiktade fältlinjerna (repen) att "slingra" sig. Den lilla fältkomponenten "gungar" fram och tillbaka.

Elektriska fältet i radiostrålningen som bildas när elektronen ändrar rörelseriktning bär sig åt på samma sätt som den lilla fältkomponenten som knuffar fältlinjen i sidled.



Strålningens riktningsdiagram

- Den sidoriiktade fältkomponenten (som åstadkommer "slingringen") är maximal i riktningar vinkelrätt mot elektronens rörelseriktning. I dessa riktningar har vi störst radiostrålning.
- Längs elektronens rörelseriktning är fältlinjerna alltid räta oavsett hur mycket elektronen gungar (repen slingrar sig inte). Det finns ingen sidoriiktad fältkomponent. I dessa båda riktningar får vi ingen radiostrålning.
- Storleken på den sidoriiktade fältkomponenten varierar med sinus för vinkeln mot elektronens rörelseriktning. Även elektriska fältet i radiostrålningen bär sig åt på detta sätt.



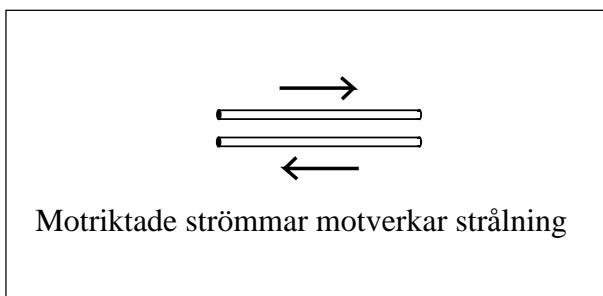
Att förhindra strålning

Enda möjligheten att förhindra strålning är att se till att de elektriska och magnetiska fälten riktas på sådant sätt att de inte sammansätts till strålning.

Motriktade strömmar

Ett sätt att undvika radiostrålning (i fel riktning) är att se till att alltid ha motriktade strömmar som är lika starka. Det är detta man gör i kabeln.

En kabel består av två ledare, och även om man transporterar växelström i kabeln, elektroner som skakar fram och tillbaka, så finns alltid i varje tvärsnitt lika många elektroner som skakar åt båda hållen. Resultatet blir att de sidoriiktade fältkomponenterna tar ut varandra. Ingenstans runt kabeln sammansätts de elektriska och magnetiska fälten på sådant sätt att de bildar radiostrålning (förutom längs kabeln, eftersom effekttransport längs kabeln kan ses som radiostrålning som följer kabeln). Förutsättningen är dock att ledarna ligger tätt ihop.



Naturen vill slippa stråla

En enskild ledare som leder växelström kommer att stråla. Men naturen är sådan att föremålen vill behålla sin energi. Naturen vill slippa stråla om så är möjligt.

Om det finns metall, en plåt eller liknande, i närheten av ledaren som leder växelström, så kommer naturen att själv inducera den ström i plåten som behövs för att motverka strålningen från ledaren. Det är på detta sätt skärmning fungerar.

Hertz experiment

Hertz tog två metallklot och ville flytta över elektroner från ena klotet till det andra. För att göra detta behövde han hög likspänning.

Den höga likspänningen fick han genom att ta en "tändspole", ett batteri och en brytare (brytarspets). När ström flyter genom spolen bildas magnetfält. När brytaren öppnas slutar strömmen att flyta, och magnetfältet "dör". Då induceras spänning i trådvarven. (Jfr Faraday som tappade magneten.) Många trådvarv ger hög spänning.

Spänningen hamnar på kloten, plus på ena och minus på andra. Spänningen hamnar även över "gnistgapet". När spänningen blivit så hög att det uppstår en gnista över gnistgapet, då blir det elektrisk kontakt mellan kloten. Pendeln startar.

Elektrisk gnista är joniserad luft. Luftmolekylerna bryts sönder till joner och fria elektroner. De fria elektronerna rör sig på samma sätt som elektronerna i metall. Gnisttan är inget annat än elektriskt ledande luft.

Nu kan elektronerna rusa fram och tillbaka (växelström), och det bildas radiostrålning.

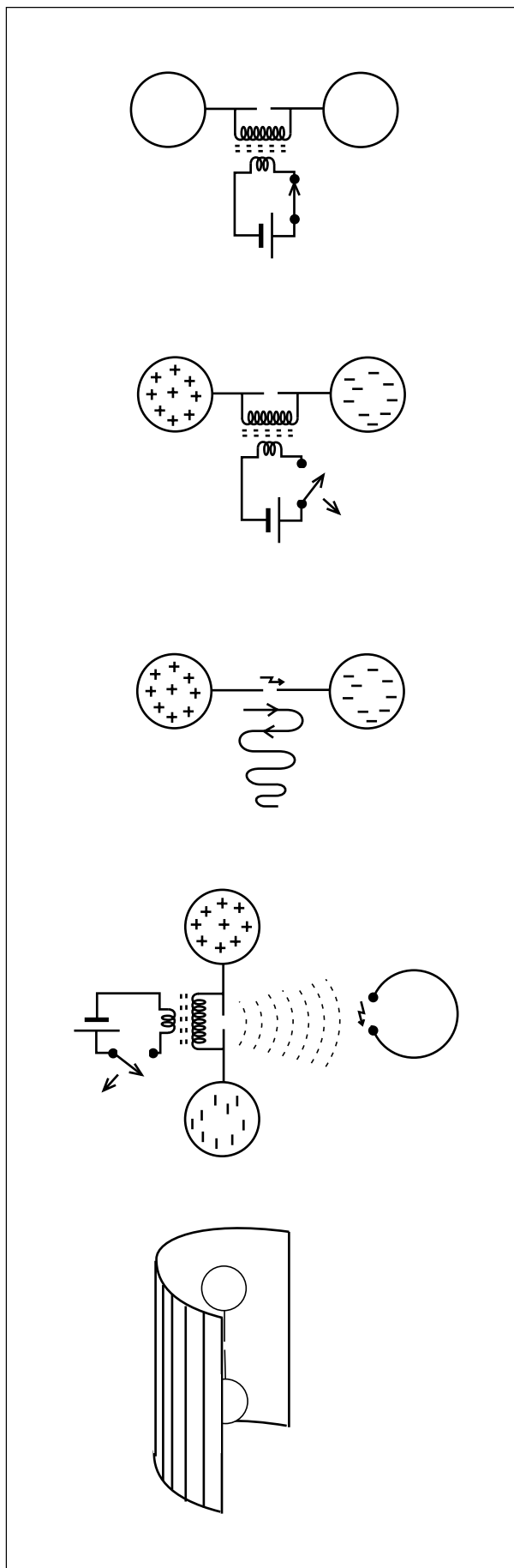
Hertz radiomottagare

Hertz mottagare var ytterligare en pendel som var hopvikt. När det kommer radiovågor och pendeln börjar pendla uppstår spänning mellan kulorna. Hertz tittade efter gnistor i gapet mellan kulorna (det var mörkt i rummet).

Hertz parabol

Hertz upprepade experiment som var vanliga inom optiken. Maxwell hade ju påstått att radiovågorna skulle bära sig åt som ljuset.

- Hertz riktade radiovågorna med hjälp av en parabol.
- Hertz visade att radiovågorna reflekteras mot en metallplåt på samma sätt som ljus i en spegel.
- Hertz visade att radiovågorna böjs i ett prisma av paraffin, på samma sätt som ljus i ett glasprisma.



Vad hände efter Hertz?

Popov

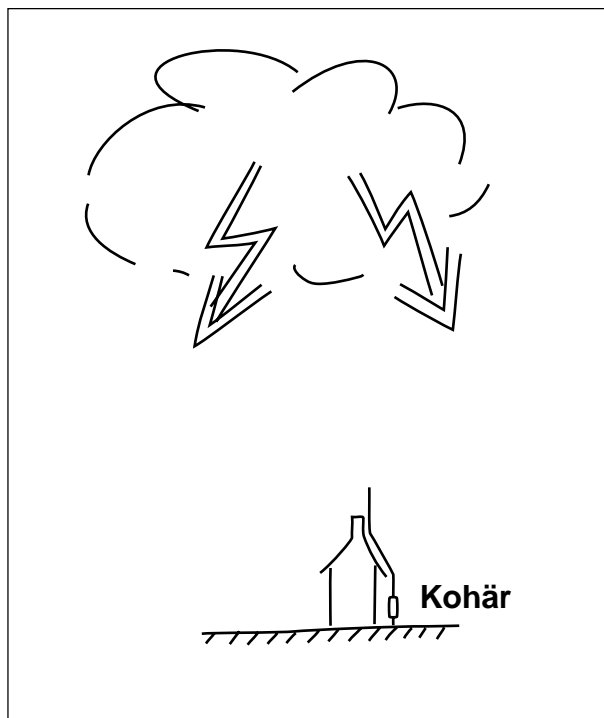
Popov, lärare vid ryska marinens torpedskola i Kronstadt, utförde 1895 försök med en detektor (kohär) som han kopplade mellan husets åskledare och jord. Kohären, som upfunnits några år tidigare av fransmannen Branley, var ett litet glasrör med metallektroder i ändarna. I glasröret, mellan elektroderna, fanns metallspån av nickel.

Om man knackar på kohären så att nickelspånen skakas om, bildas ett mikroskopiskt oxidskikt på spånen. Mät med en ohmmeter över elektroderna och den visar avbrott. Oxiden isolerar.

Lägg därefter hög spänning över elektroderna, t ex spänningen mellan kulorna på Hertz mottagarantenn. Då förorsakar spänningen överslag genom nickelspånen. Det blir gnistor genom oxidskikten och spånen "svetsas" ihop ("koherar"). Om man nu mäter med en ohmmeter så är det kortslutning.

Popov anslöt kohären till åskledaren, knackade på kohären och kontrollerade att det var avbrott. Därefter väntade han på första bästa åskväder. När blixten slagit ner (eller upp) gick han fram med ohmmetern och mätte. Och se, det var kortslutning. Här måste det ha kommit en elektromagnetisk våg från blixtnedslaget.

Popov kom då med tanken att om någon lyckas bygga en tillräckligt stark radiosändare skulle radiovågor kunna användas till att överföra meddelanden.



Marconi

Marconi som följt försöken med elektromagnetiska vågor på universitetet i Bologna och själv byggt egen utrustning, insåg att man inte kom mycket längre än 20 m med liten antenn (hög frekvens) och stor parabolantenn. Då gjorde han tvärt om, så stor antenn som möjligt, dvs han gick mot lägre frekvens.

Ena ändan av antennen grävde han ner i marken, andra ändan hissade han upp så högt som möjligt.

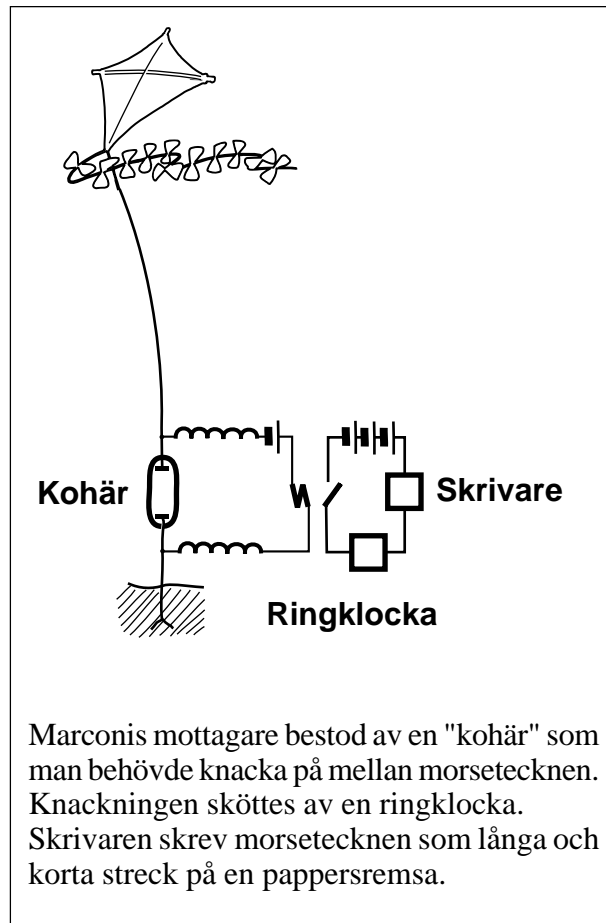
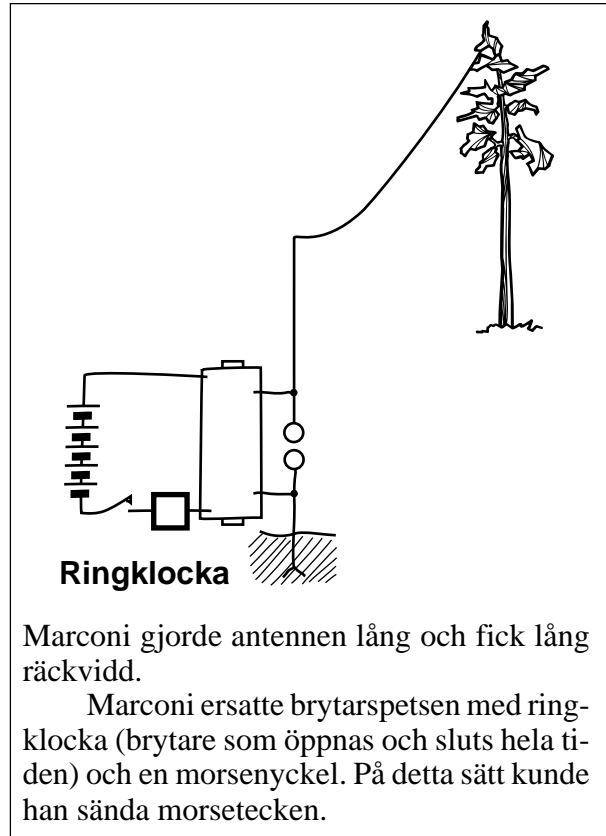
Sändaren bestod av induktionsspole (tändspole), batteri och brytarspets på sedvanligt sätt. Men när brytarspetsen öppnats och radiovågor skickats ut under ett kort ögonblick, måste brytaren åter slutas och öppnas för att sändarantennen skall fortsätta producera radiovågor. Då ersatte Marconi brytarspetsen med en vanlig ringklocka.

Kläppen i ringklockan är en brytare som öppnas och sluts i takt med att kläppen, av en magnetspole, dras mot själva klockan. I serie med ringklockan satte Marconi en morsenyckel. Nu kunde han sända morsetecken genom att trycka på morsenyckeln och ringklockan gav "medhörning" så att han hörde vad han sände. Så här har nödsändare sett ut på livbåtar ända fram på 1960-talet.

Marconis mottagare var uppbyggd runt en kohär. Via drosslar (tvingar radiosignalen att gå genom kohären), ett batteri och ett känsligt relä detekterade han om det var avbrott eller kortslutning i kohären. Det känsliga reläet manövrerade en skrivare.

När radiosignalen kom blev det kortslutning i kohären, reläet drog och skrivaren började rita ett streck på pappersremsan. Men nu måste man knacka på kohären för att skrivaren skall sluta rita strecket när radiosignalen försvinner. Därför kopplade Marconi ytterligare en ringklocka i serie med skrivaren och lät kläppen slå på kohären. På så sätt fick han automatisk knackning.

Marconis sändare och mottagare bildade ett komplett radiokommunikationssystem. Sändaren nycklades med en morsenyckel, och mottagaren skrev ner morsetecknen som långa och korta streck på pappersremsan.



4 — STRÖM OCH OLIKA SÄTT ATT FÖRHINDRA RADIOSTRÅLNING

- Vad är ström?
- Vad är en laddning?
- Hur fort går strömmen? När tänds lampan?
- Varför strålar växelström i vissa fall men inte i andra?
- Hur undviker man strålning?
- Vad vill naturen? Vill "naturen" stråla?

Vad händer när det ”flyter” ström?

Ett batteri har överskott på elektroner vid minuspolen. Där finns fler elektroner än positiva joner. På motsvarande sätt är det underskott på elektroner vid pluspolen.

När batteriets poler ansluts till en kabel:

Kabelns ledare består av kopparjoner och fria elektroner. Elektronerna knuffar in sig så att de är jämnt fördelade längs ledarna. Elektronerna vill komma så långt från varandra som möjligt (lika laddning stöter bort).

Vid batteriets pluspol saknas elektroner. Då tar den yttersta elektronen på ledaren chansen att hoppa dit, så att han kommer längre från nästa elektron på ledaren. Vi får ett tomrum på ledaren, ett område som saknar en elektron. Då tar nästa elektron chansen att hoppa dit. Så hoppar nästa, och nästa osv. På så vis förflyttas ett område längs ledaren, ett område som saknar en elektron. Och detta område som saknar en elektron har överskott på positiv laddning. Därför kallar vi detta ”tomrum” för en positiv laddning.

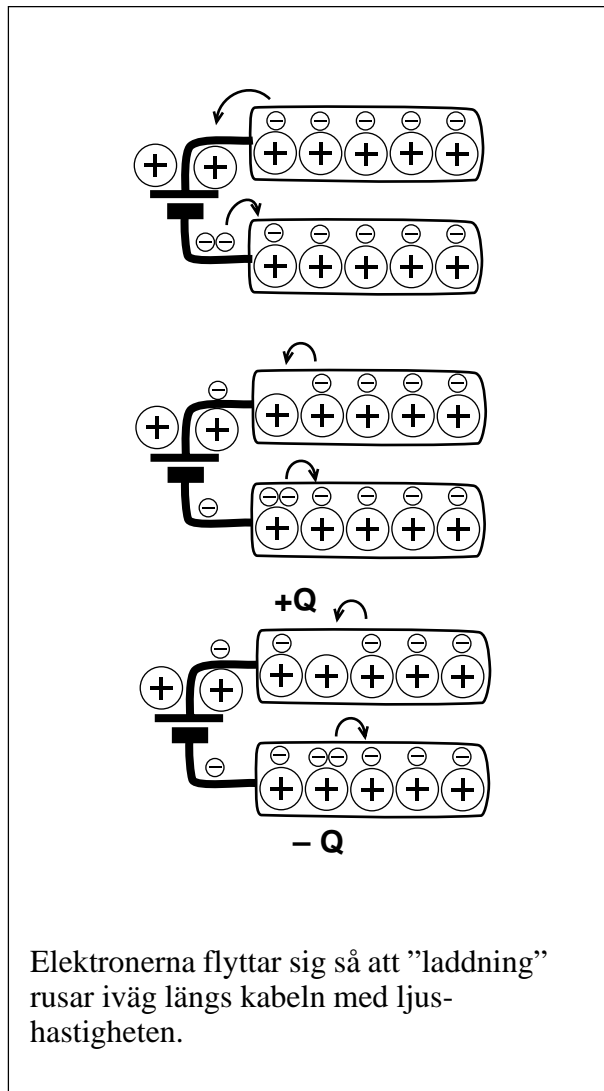
Hur fort rör sig laddningen?

Varje elektron har massa och kan inte röra sig särskilt fort. Det behövs oändlig energi för att få upp elektroner i ljushastigheten. Men själva laddningen, tomrummet, fortplantar sig med ljushastigheten (ljushastigheten i mediet om ledaren är omgiven av plast. Denna hastighet är något lägre än ljushastigheten i vakuum).

Tomrummets hastighet beror inte på elektronernas individuella hastighet, utan på ”timingen” mellan elektronerna. Elektronerna ”tjuvstartar”.

Negativ laddning

På samma sätt vid minuspolen. Där är så fullt med elektroner att en elektron tar chansen att hoppa över på ledaren trots att där redan finns en elektron. Men detta är bättre än att vara kvar i trängseln vid minuspolen. Då hoppar ledarens elektron ett steg till höger. Och nästa elektron hoppar, och nästa,



och nästa, i försök att komma bort från den elektron som kommer från vänster.

På ledaren som anslutits till minuspolen ser vi hur ett område med två elektroner, en elektronförtätning, rusar iväg åt höger. Varje elektron tar ett steg till höger, i tur och ordning, på sådant sätt att elektronförtätningen tycks rusa iväg med ljushastigheten. Och elektronförtätningen, där vi har överskott på negativ laddning, kallar vi en negativ laddning.

En elektrisk laddning är inget man kan ta på, utan resultatet av elektronernas rörelser. Detta resultat av elektronernas rörelser är intressant vid studium av antenner och ledningar. Därför kommer vi fortsättningsvis inte att tala om elektroner, utan om laddningar som rör sig med ljushastigheten.

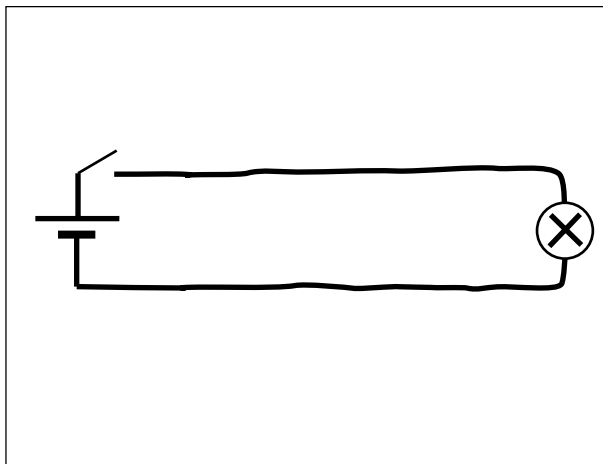
4 — STRÖM OCH OLIKA SÄTT ATT FÖRHINDRA RADIOSTRÅLNING

När tänds lampan?

Slut strömbrytaren vid batteriet. Hur lång tid tar det innan lampan börjar lysa?

När strömbrytaren sluts rusar laddningarna iväg med den hastighet som är ljushastigheten på kabeln. När laddningarna kommer fram till lampan börjar den lysa.

Om kabeln är så lång att den når till solen (det tar 8 min för ljuset att gå från solen till jorden) och laddningarnas hastighet är 66% av ljushastigheten i vakuum (plastisolerad kabel), då tar det 12 min innan lampan börjar lysa. Det tar sedan ytterligare 8 min innan personen som slöt strömbrytaren ser detta!

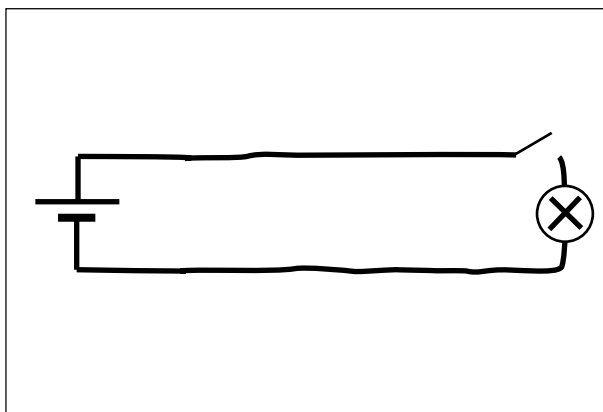


Om strömbrytaren sitter vid lampan?

Om strömbrytaren sitter vid lampan, hur lång tid tar det då? Jo då börjar lampan lysa direkt när strömbrytaren sluts.

När kabeln anslöts till batteriet gick effekt in i kabeln. När effekten kom till strömbrytaren som är öppen reflekterades effekten och gick tillbaka ner till batteriet, där effekten vände (nu slutade batteriet avge effekt) och fortsatte upp på kabeln. Så håller det fortfarande på. Varken batteriet eller den öppna strömbrytaren kan absorbera den effekt som rusade in i kabeln. Och vi kan inte mäta effekten, eftersom lika mycket går i båda riktningarna.

När strömbrytaren sluts börjar lampan lysa direkt. Det blir ingen reflekterad effekt. När all reflekterad effekt som finns på kabeln kommit ner till batteriet (efter 12 min) börjar batteriet lämna ny effekt.

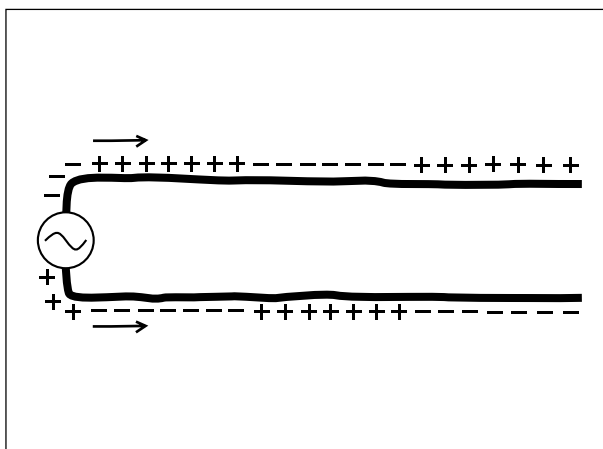


Växelspänningsgeneratoren

En växelspänningsgenerator lämnar spänning som växlar polaritet. Pluspolen suger åt sig elektroner, minuspolen knuffar ut elektroner. Generatoren ömsom knuffar, ömsom drar i elektronerna. Positiva och negativa laddningar skickas ut på kabeln. Dessa laddningar rusar iväg med den hastighet som är ljushastigheten på kabeln.

På bilden är plusladdningar ett plus-tecken. I denna punkt finns elektroner som är på väg åt vänster. Minusladdningarna är minus-tecken och där finns elektroner som är på väg åt höger.

På detta sätt skakar elektronerna med växelspänningsfrekvensen när plus- och minusladdningar rusar förbi.

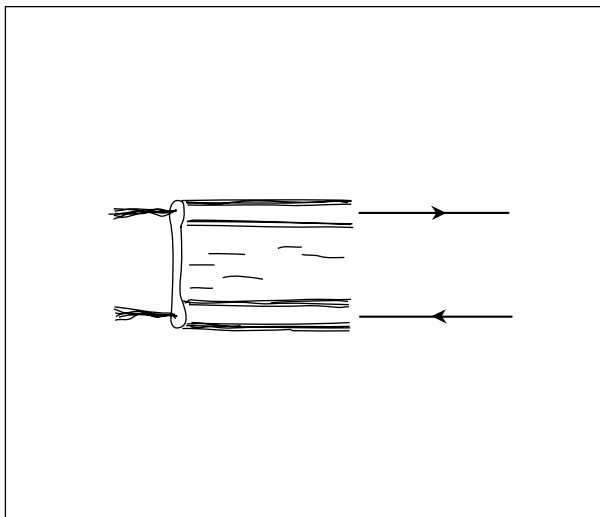


Bandkabeln

Bilden visar en bandkabel. Denna typ av kabel var förr vanlig som TV-antennkabel. I denna kabel rör sig laddningarna med 80% av ljushastigheten i vakuum.

När elektronerna rör sig åt ett håll i ena ledaren rör de sig åt motsatt håll i andra ledaren. Radiostrålningen blir lika stark, fast motriktad. Det blir ingen radiostrålning.

Egentligen bör man säga att de totala elektriska och magnetiska fälten runt de båda ledarna blir sådana att de inte sammansätts till radiostrålning (som kan stråla bort från kabeln). Exakt gäller detta bara i de riktningar ut och in i papperet där det är lika långt till de båda ledarna. I övriga riktningar finns viss "reststrålning".

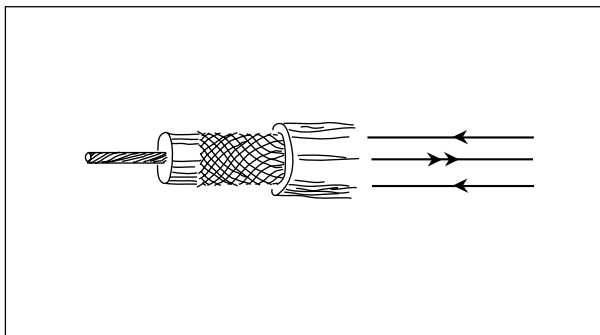


Koaxialkabeln

För att kabeln skall vara helt strålningsfri måste de båda ledarna ligga oändligt tätt. Men då blir det kortslutning.

En möjlighet är att utforma den ena ledaren som ett rör. Utanför röret ser det ut som om all ström går i rörets mitt. Den andra ledaren lägger vi i rörets mitt. Då tycks ledarna ligga oändligt tätt utan att elektriskt vidröra varandra. Detta är principen för koaxialkabeln.

Bilden visar en koaxialkabel. Beroende på typ av plastisolering mellan mittledaren och skärm går laddningarna med 66% – 80% av ljushastigheten i vakuum.



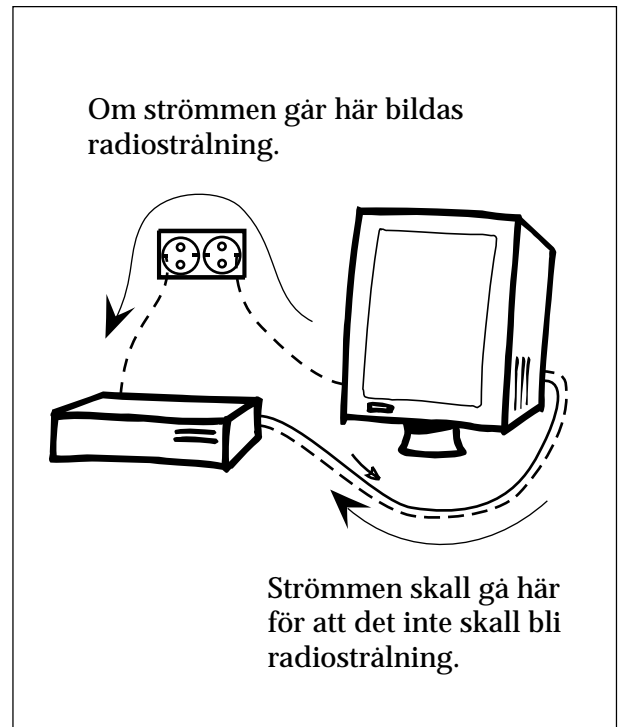
4 — STRÖM OCH OLIKA SÄTT ATT FÖRHINDRA RADIOSTRÅLNING

Strålning från datorer

Bilden visar en dator och bildskärm. Mellan datorn och bildskärmen finns bildskärmskabeln. Informationen till bildskärmen skickas på en av ledarna som spänningspulser. Detta ger strömpulser. Återledaren för strömpulserna skall vara bildskärmskabelns noll-ledare som är ansluten till datorns och bildskärmens plåthöljen.

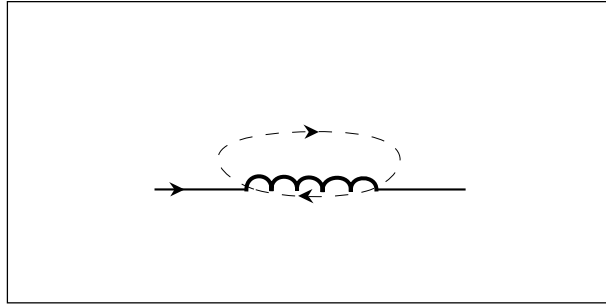
Datorn och bildskärmen är anslutna till elnätet via kablar med skyddsjord. Skyddsjorden är ansluten till plåthöljet. I det jordare eluttaget finns nu direktförbindelse mellan datorns och bildskärmens plåthöljen. Strömpulserna behöver inte välja bildskärmskabeln som återledare utan kan gå via elnätet. Men då blir det stort avstånd mellan ledarna och vi får radiostrålning.

Som kommentar kan sägas att det inte hjälper att använda ojordat eluttag. Nät-kabelns båda spänningsledare är anslutna till plåthöljet via "avstörningskondensatorer". Därför kan höga frekvenskomponenter, övertoner från strömpulserna, ta sig via nät-kablarna och ge strålning, även om man har ojordad nätkabel.



En ledare lindas som spole

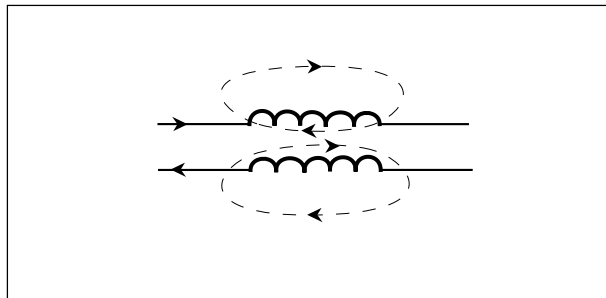
Om en ledare lindas som spole, bygger strömmen upp ett magnetfält. Uppbyggnaden av och frigörandet av magnetisk energi motverkar växelström i ledaren. Spolen "bromsar" växelströmmen.



En kabel lindas som spole

Om två ledare lindas som en gemensam spole och man skickar ström åt motsatt håll i ledarna kommer magnetfälten att bli motriktade. Det blir inget magnetfält.

Om det inte blir något magnetfält finns ingen "spole". Definitionen på spole (eller induktans) är att den lagrar magnetisk energi. Men nu bildas inget magnetfält. Då finns ingen spole som bromsar växelströmmen.



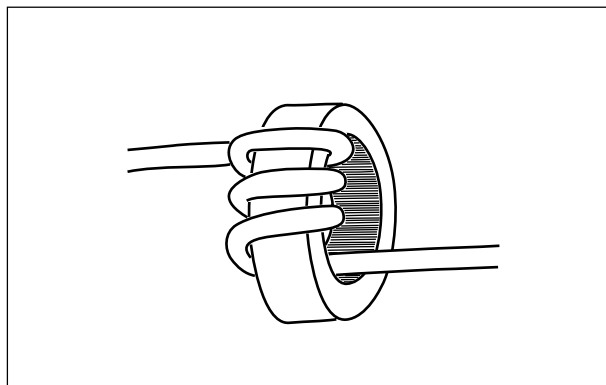
Stoppar obalansström

Spolen blir ingen spole för de strömmar som är lika stora. Men om strömmarna inte är lika stora? Då släpper spolen igenom lika mycket ström på båda ledarna (motriktade strömmar) och bromsar övrig ström, så kallad obalansström.

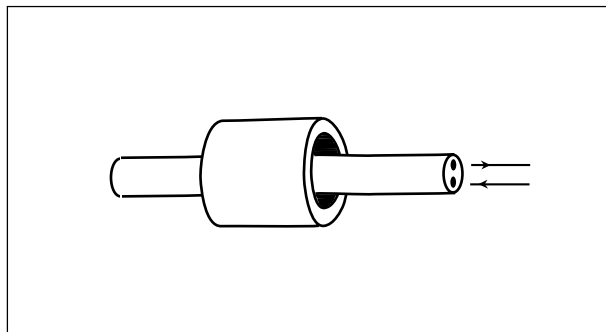
Även koaxialkabel

Även koaxialkabeln kan lindas som spole. Att den ena ledaren ligger inuti ett rör förändrar inget. Kopp är inte magnetiskt.

För att öka induktansen och därigenom åstadkomma ännu kraftigare stopp för obalansströmmen kan spolen försees med järnpulverkärna (ferritkärna).



Även en rak ledare har induktans, och induktansen kan ökas med ferritkärna.



4 — STRÖM OCH OLIKA SÄTT ATT FÖRHINDRA RADIOSTRÅLNING

Så stoppas radiostrålning från kablar

All transport av elektrisk energi mellan apparater sker på kablar, och man har alltid "lika mycket ström i båda riktningarna", en signalledare och en återledare. Även om man bara har en fysisk tråd som i de första telegrafsystemen eller vid vissa undervattenskablar, så är i dessa fall marken eller vattnet den andra ledaren.

Principen att förhindra radiostrålning är att se till att dessa båda strömmar fysiskt ligger så nära varandra som möjligt och att ingen del av strömmen smiter någon annan väg, dvs båda strömmarna skall vara lika stora.

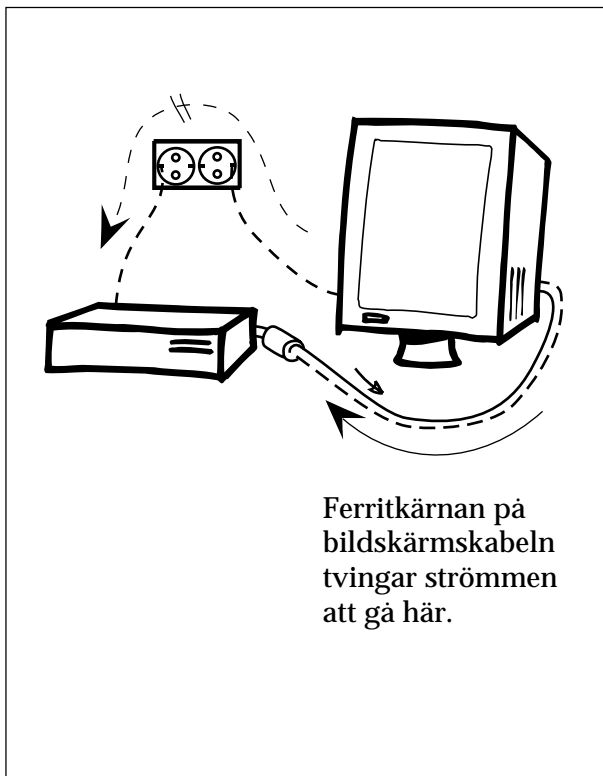
Tekniken som ofta används är att placera ferritkärnor på kablarna för att därigenom tvinga strömmarna att bli lika stora. Då blir ingen ström över som kan gå annan väg, även om sådan väg skulle funnits.

Titta på bildskärmskabeln

Ta en titt på bildskärmskabeln. I ena ändan, eller i båda ändarna, sitter en klump. Denna klump innehåller ferritkärna. Denna ferritkärna tvingar bildskärmsströmmen att välja bildskärmskabeln som återledare. Då blir ingen ström över som kan gå via elkablarna. Strömbanorna ligger tätt ihop och man undviker radiostrålning.

Även i radiobasstationer

Basstationer för mobiltelefoni är inbyggda i metallhöljen, och har mönsterkort med metalliskt jordplan. Hela jordsystemet hänger ihop elektriskt. Ändå finns tillfällen då man vill skicka signalen på koaxialkabel mellan olika punkter i basstationen. Hur ser man till att signalen väljer koaxialkabelns skärm som återledare, och inte mönsterkortens jordplan eller metallhöljet? Genom att sätta en ferritkärna på koaxialkabeln.



Ferritkärnan på bildskärmskabeln tvingar strömmen att gå här.

Naturen kämpar emot

Naturen vill slippa stråla om den kan

Tänk dig en mobiltelefon som ligger på en metallplåt (diskbänken). När det rusar laddningar fram och tillbaka på antennen kommer varje laddning att dra till sig en laddning av motsatt tecken i plåten, och denna laddning av motsatt tecken följer med.

Strömmen i antennen och strömmen i plåten ser ut som på kabeln, två ledare med ström åt motsatt håll. Och kabeln strålar inte!

Naturen skapar själv

På detta sätt försöker naturen ta varje tillfälle att själv skapa de strömmar som behövs för att strålningen skall bli så liten som möjligt. Naturen vill hålla i energin. Naturen kämpar emot.

Tekniken bakom skärmning

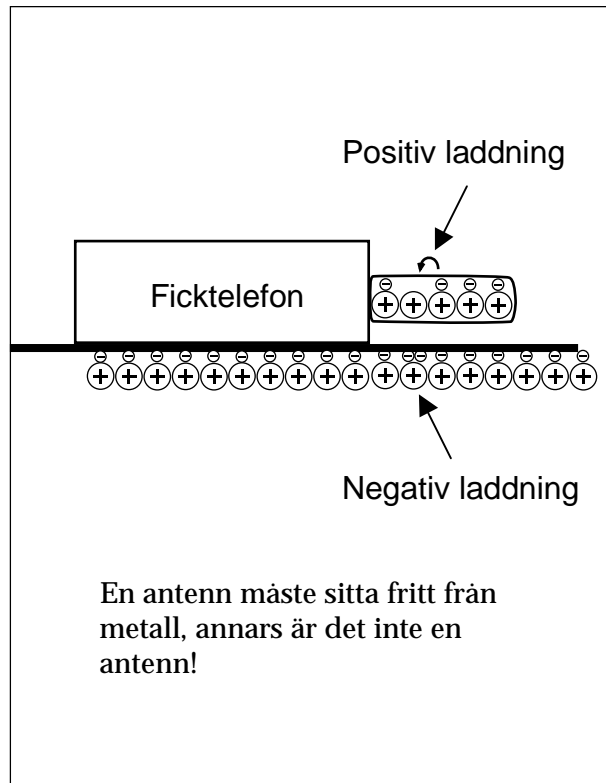
När man placerar komponenterna på ett mönsterkort med jordplan, eller stoppar in radioutrustning i plåtlådor, då förser man naturen med elektriskt ledande ytor (jordplan respektive plåtlåda) där den själv kan skapa de strömmar som erfordras för att minimera radiostrålning.

Lådan behöver inte vara tät

På vissa delar av dessa plåtar behöver naturen inte skapa några strömmar. Där behövs ingen plåt. Problemet är att strömmarna inte syns. Det är svårt att veta var man kan göra öppningar utan att skärmningsförmågan försämras.

Arbeta med bomullsvantar

Vissa skärmlådor, t ex filter, måste göras med lock som skruvas fast. Här arbetar man ofta med bomullsvantar för att inte riskera att få fingeravtryck på kontaktytor. Syran i fingerfettet kommer så småningom att oxidera metallen och elektriska kontakten försämras, något som kan ge strålning. Detta blir ett svårfunnet fel som först uppträder när ytan oxiderats.



Antenner: Att lura naturen

En antenn måste med nödvändighet placeras, så att inga ledande föremål finns, där naturen själv kan skapa strömmar som motverkar strålningen. Antennen måste sitta fritt.

5 — ANTENNER

- **Visst! Elektronen sänder ut radiostrålning. Men hur sätter vi fart på många elektroner?**
- **Hur ser den bästa antennen ut?**
- **Varför hör man så ofta talas om halvvågsantenner?**

Våglängd

Hertz hade ingen radiosändare

Hertz flyttade över elektroner tills det blev överlag i gnistgapet. När det blev överlag började inte elektroner utan laddningar att rusa fram och tillbaka med ljushastigheten mellan antennens ändar.

När laddningarna rusade åt ena hållet gungar elektronerna åt ett håll. När laddningarna rusade tillbaka gungar elektronerna åt andra hållet. Elektroner som gungar fram och tillbaka är växelström.

Hertz hade ingen radiosändare. Växelströmmen som han behövde för att få radiostrålning, den bildades direkt på antennen.

Vilken frekvens fick Hertz?

När laddningarna rusat fram och tillbaka har växelströmmen genomlöp en period. Den tid detta tar kallas periodtiden T . Frekvensen är antalet perioder per sekund.

Våglängd

Den sträcka man hinner med ljushastigheten c under periodtiden T är så viktig att den fått ett eget namn: våglängd (betecknas med grekiska bokstaven λ , lambda).

Halvvågsantenn

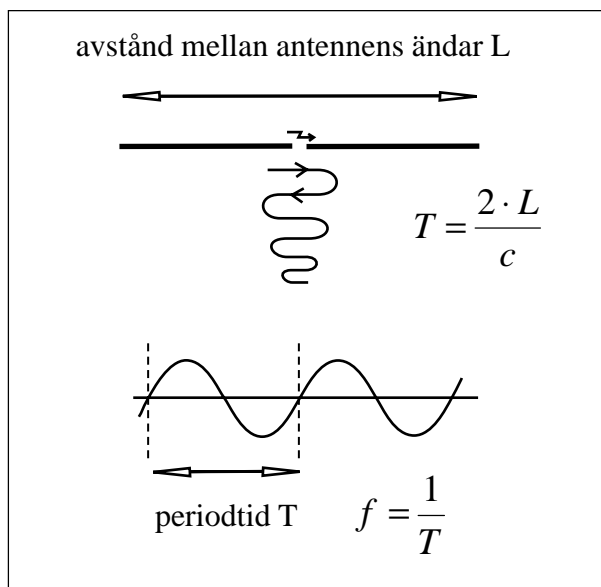
Hertz antenn var i halvvågsresonans. Den bar sig åt som en elektrisk pendel. Metallkulorna medförde att antennen var förkortad, se nästa avsnitt.

Dagens pendel sitter i radiosändaren

Idag låter vi inte växelströmmen bildas på antennen. Växelströmmen bildas i radiosändaren och matas ut på antennen. Men fortfarande alstras växelströmmen i en elektrisk pendel, antingen en resonanskrets med spole och kondensator, eller i en "hopvikt halvvågsantenn" som inte strålar (kvartsvågsresonator), eller i en mekanisk pendel (styrkristall, kvartskristall).

Kraftig radiostrålning: Många elektroner

Kraftig radiostrålning innebär att sätta fart på många elektroner. Det har visat sig vara lättast för radiosändaren att sätta fart på



$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \approx \frac{300}{f[\text{MHz}]}$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot c \cdot T = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{f} = \frac{1}{2} \cdot \lambda$$

T = periodtid [s]
 L = avstånd mellan antennens ändar [m]
 c = ljushastigheten $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s
 f = frekvens [Hz]
 λ = våglängd [m]

elektronerna om elektronerna själva vill gunga i den takt som sändaren "knuffar". Det är detta man uppnår på halvvågsantennen.

Två problem: "Många elektroner" — "strålning i rätt riktning"

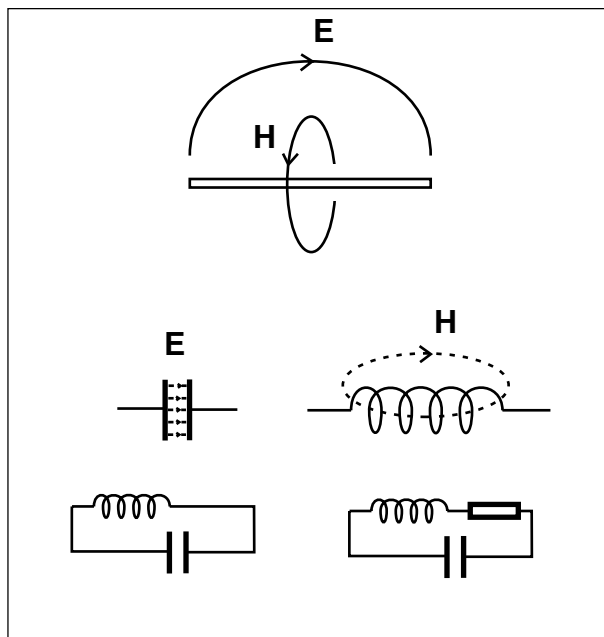
Halvvågsantennen är den bästa antennen när det gäller att underlätta för sändaren att sätta fart på många elektroner, att på enklast möjliga sätt åstadkomma radiostrålning.

Minst lika viktigt är att radiostrålningen går i rätt riktning. Men riktningsdiagrammet påverkar vi, inte genom att förändra antennen, utan genom att "störa" halvvågsantennen med metall i närheten, eller genom att kombinera flera halvvågsantenner.

Som en resonanskrets

Energin på halv vågsantennen växlar mellan elektriskt fält och magnetfält. Elektriskt fält finns i en kondensator, magnetfält i en spole. Om man kopplar ihop kondensatorn och spolen får man en resonanskrets där energin pendlar på samma sätt som på halv vågsantennen.

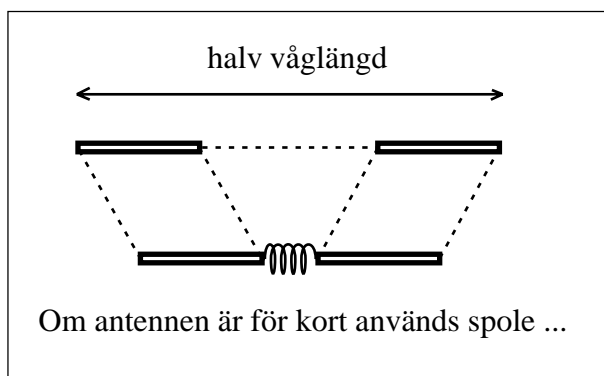
Fast halv vågsantennen strålar. Komplettera resonanskretsen med ett motstånd (som vi kallar strålningsresistansen). Den energi som blir till värme i motståndet motsvarar den energi som strålar ut från antennen som radiovågor. Detta är halv vågsantennens ekvivalenta schema (en krets som ser ut på samma sätt som halv vågsantennen. OBS att komponentvärdena ändras om vi byter frekvens.).



Om antennen är för kort

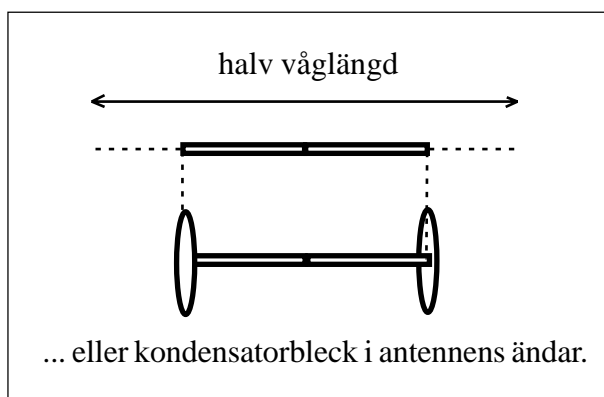
Om antennen mekaniskt är kortare än en halv våglängd, då kan man lägga till en liten del av det ekvivalenta schemat för att få den önskade resonansfrekvensen.

- Man kan komplettera med en del av spolen. För att göra nytta skall spolen placeras där antennen har sin magnetiska energi, i mitten.



- Eller man kan öka antennens elektriska energi genom att placera kondensatorbleck i antennens ändrar.

Hertz antenn med metallkulor i ändarna var förkortad på detta sätt.

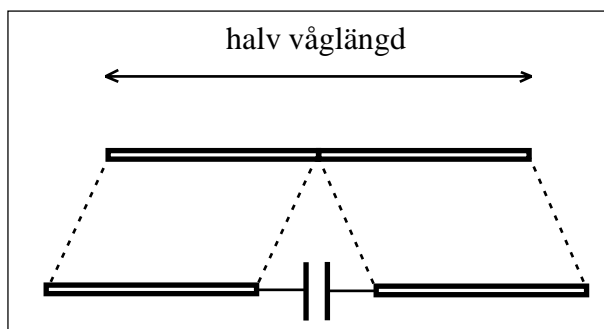


Om antennen är för lång

Om antennen är för lång sätter man en spole mitt på antennen för att antennen skall se längre ut.

Vad gör man om antennen är för lång? Då sätter man en "negativ spole" mitt på antennen. Du som räknat med j -metoden vet att det enda som skiljer kondensatorn från en spole är ett minustecken. Kondensatorn är en negativ spole.

"Glasantennens" metallbleck som limmas på bilens glasruta är en sådan kondensator.



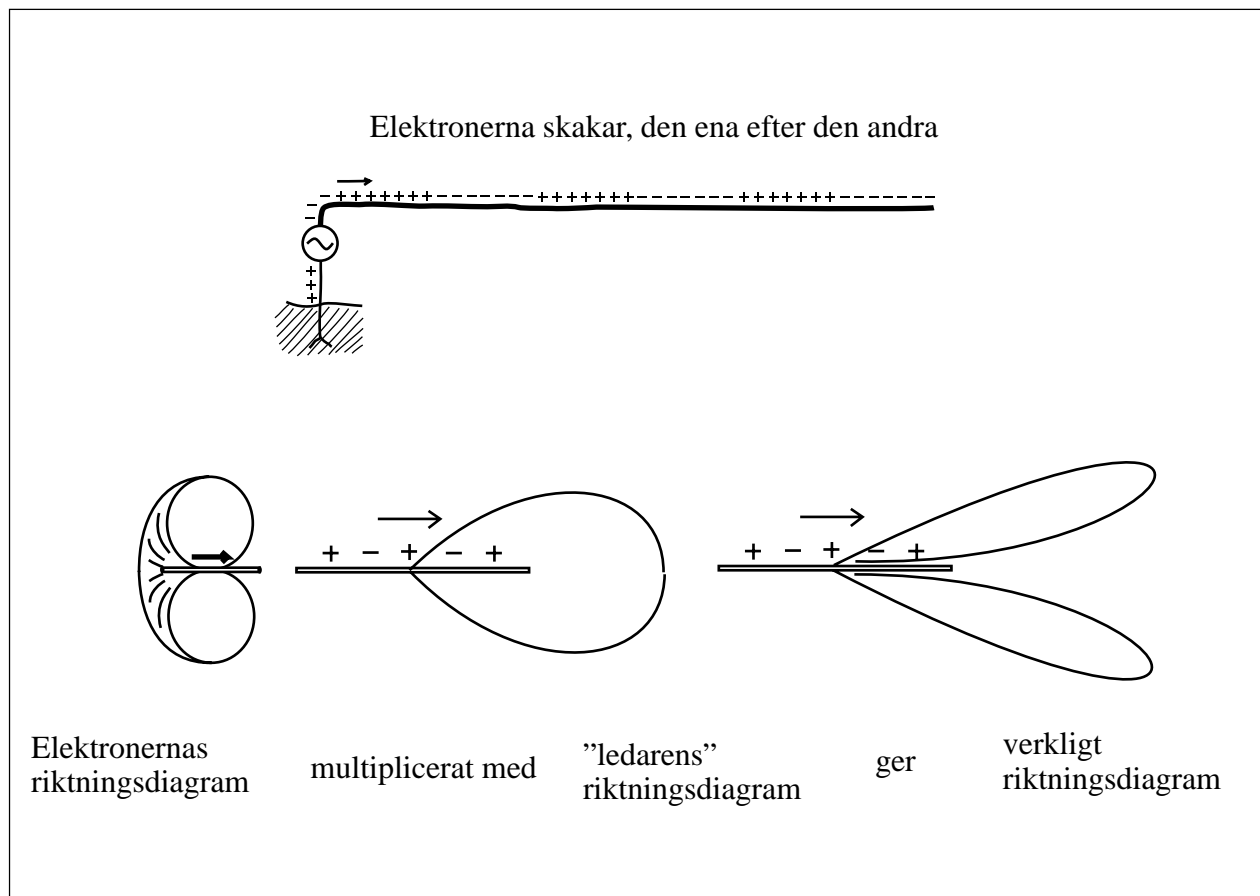
Långtråds-antenn

Anslut sändaren till en mycket lång ledare. När jag säger lång menar jag lång i våglängder räknat. Ledaren skall vara kanske 20 våglängder lång. Då händer följande:

- Sändaren matar ut laddningar på ledaren. Laddningarna rusar iväg med ljushastigheten. När laddningarna rusar förbi skakar elektronerna. Det kommer en positiv laddning, elektronerna gungar åt ena hållet. Det kommer en negativ laddning, elektronerna gungar åt andra hållet. Det blir radiostrålning. Energin i signalen minskar. Om ledaren är tillräckligt lång hinner all energi stråla ut innan laddningarna når ledarens ända.
- Elektronerna gungar inte i takt, utan den ena elektronen efter den andra. Detta innebär att radiostrålningen från elektronerna längs ledaren inte samverkar "bredsides" utan längs ledaren.

- Men eftersom de enskilda elektronerna inte strålar i den riktningen kommer det verkliga riktningsdiagrammet att bli elektronens riktningsdiagram multiplicerat med riktningsdiagrammet längs ledaren. Långtrådsantennen strålar i en "tratt".

Ett sådant trattformat riktningsdiagram är svårt att utnyttja. Rombantennen är en kombination av fyra långtrådsantennor som ger ett mycket smalt riktningsdiagram och dessutom är bredbandig, dvs kan användas över ett brett frekvensområde. Rombantennen användes när telefonsamtal mellan kontinenter förmedlades via kortvågsradio (fram till ca 1970, då satelliter och sedan optokabel tog över).



Helixantennen

Helixantennen är en långtrådsantenn där tråden lindats till en spole med omkretsen 1 våglängd. När elektronerna på ena sidan spolen är på väg uppåt kommer de att vara på väg uppåt även på andra sidan av spolen (strömmen går åt motsatt håll, men där finns laddningar av motsatt tecken). På detta sätt samverkar alla elektroner vinkelrätt mot cirkeln, och i cirkelns riktning.

Horisontell polarisation

Man säger att radiovågen är horisontal-polariserad om elektriska fältstyrkan i radiovågen ligger horisontellt. Horisontell polarisation får man när elektronerna skakar i horisontell riktning. TV-antennen är horisontal-polariserad.

Vertikal polarisation

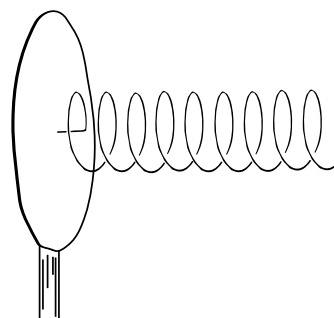
Vertikal polarisation får man när elektronerna skakar i vertikal riktning.

Det är lättare att åstadkomma en rundstrålande antenn om den är vertikalpolariserad. Detta är orsaken till att man använder vertikal polarisation för kommunikationsradio och mobiltelefoni. Det vertikala antensprötet på bilen är avsett för vertikal polarisation.

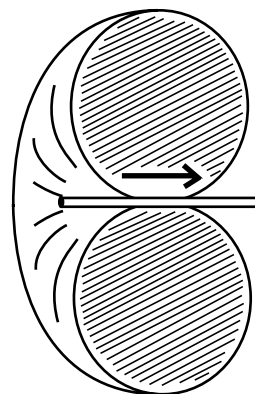
Cirkulär polarisation

Strålningen från en helixantenn har cirkulär polarisation, som en dipolantenn som snurrar ett varv på periodtiden T . Den cirkulära polarisationen kan vara vänstervriden, eller högerviden.

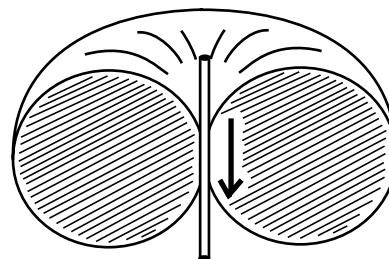
Det intressanta med cirkulär polarisation är att när vågen reflekteras, i t ex marken eller i en husvägg, då ändras polarisationen så att den snurrar åt andra hållet. Vänstervriden blir högerviden efter reflex. Och högerviden kan inte tas emot av vänstervriden antenn. På detta sätt undviker vi att ta emot reflexerna. Därför ser man denna antenn på sportarenor. Fotografen bär TV-kameran och efter springer teknikern med helixantennen på en pinne och försöker rikta antennen mot någon mottagarantenn.



Helixantenn – cirkulär polarisation



Horisontell polarisation



Vertikal polarisation

Avslutad kabel

Laddningarna rusar framåt på kabeln. Effekt utbreder sig framåt. Om kabeln avslutas med ett motstånd kommer viss del av effekten att absorberas av motståndet. Den effekt som ej absorberas vänder och går tillbaka.

Anpassad kabel

Om motståndet har samma värde som kabelns karakteristiska impedans, vanligen 50 ohm eller 75 ohm vid koaxialkablar, så absorberas all effekt. Ingen effekt vänder. Detta kallas anpassning. Det är så här vi vill använda kabeln.

Öppen kabel

Om kabeln är öppen vänder all effekt och går tillbaka. Då händer något märkligt:

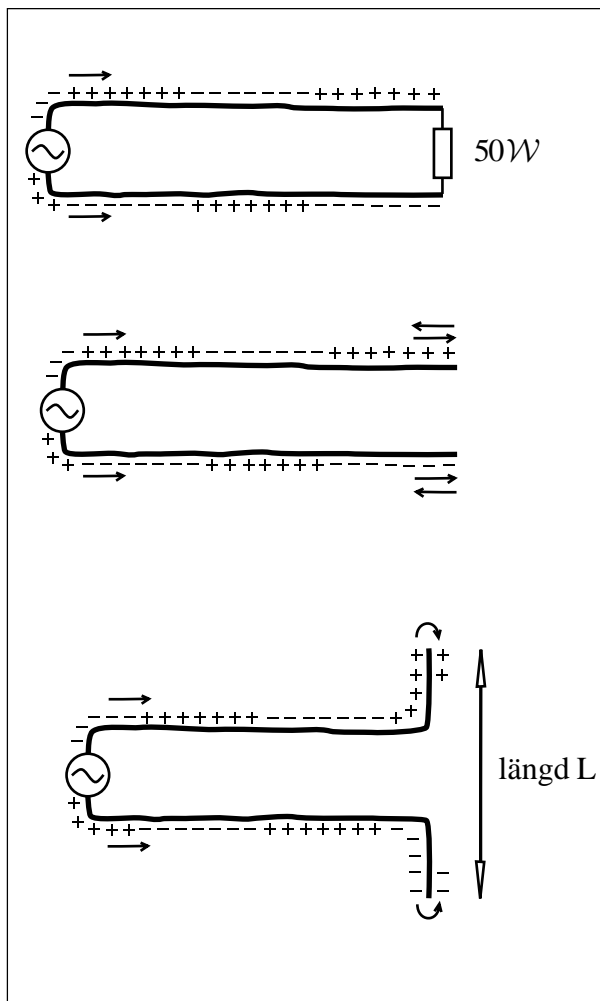
- När effekten bara går i en riktning på ledarna kommer elektronerna att skaka efter varandra, i takt med att laddningarna rusar förbi.
- När effekten går i båda riktningarna påverkas elektronerna av laddningar som rusar i båda riktningarna. Resultatet blir att alla elektroner inom en halv våglängd från kabeländan kommer att gunga i takt! Elektronerna rör sig inte efter varandra utan samtidigt!

Vik isär ledarna

Vik isär ledarna men inte mer än en halv våglängd, dvs antennlängden L skall vara maximalt en våglängd. Då får vi en antenn där alla elektroner som påverkas av framåtgående och reflekterade effekten skakar i takt. Detta betyder att deras strålning samverkar vinkelrätt ut från antennen.

Antennen kan ha vilken längd som helst upp till en hel våglängd

För att utnyttja detta fenomen att strålningen från alla elektroner samverkar, kan antennen ha vilken längd som helst, upp till en hel våglängd.

**Sändaren vill att antennen är en halv våglängd**

Antennens längd, så länge den är kortare än en hel våglängd, har ganska liten inverkan på riktningsdiagrammets utseende. Men däremot har sändaren synpunkter på antennlängden.

Om antennlängden L är en halv våglängd kommer den reflekterade effekten från antennens ändrar att återvända i takt med strömknuffarna från sändaren. Sändaren upplever det som att knuffa på en gunga och gungan gungar i takt med sändarens knuffar.

Halvvågsantennen underlättar för sändaren att få fart på så många elektroner som möjligt. Men ur strålningssynpunkt är det faktiskt aningen bättre om antennen är en hel våglängd lång. Fast då klarar inte sändaren att få fart på elektronerna.

Halvvågsdipol (dipol)

Den absolut vanligaste antennen är en halv våglängd lång och matas i mitten (dipol = två poler). Det är så här sändaren vill ha det. Radiomottagaren är inte lika kräsen utan klarar sig oftast hyggligt bra även om antennen inte är i halvvågsresonans.

Bilden visar en vertikalpolariserad basstationsantenn, t ex monterad på ett vattentorn.

Förkortad dipol

Om vi vill att antennen mekaniskt skall vara kortare än en halv våglängd, om längre antenn får inte plats, då ersätter vi den saknade längden med mittspole eller kondensatorbleck i ändarna.

Bilden visar en förkortad dipol. För att slippa ha alltför många varv i spolen har den även försetts med ändkapacitans. Detta gör antennen mer bredbandig än om enbart spole skulle använts.

Tjocka antennben ger bredbandig antenn

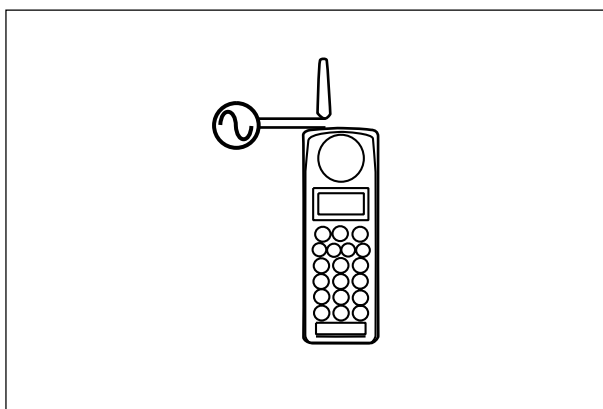
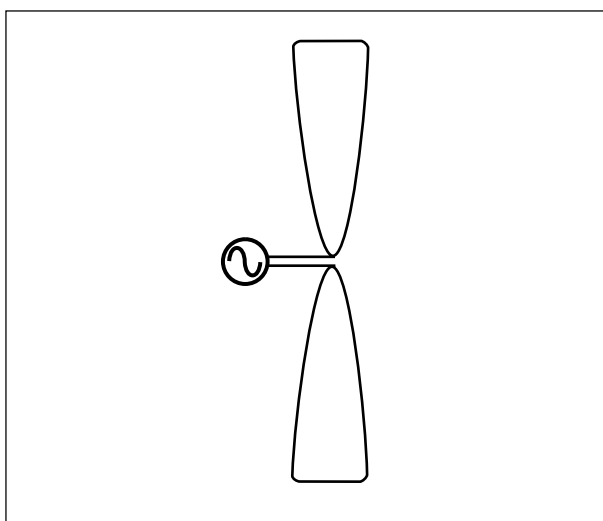
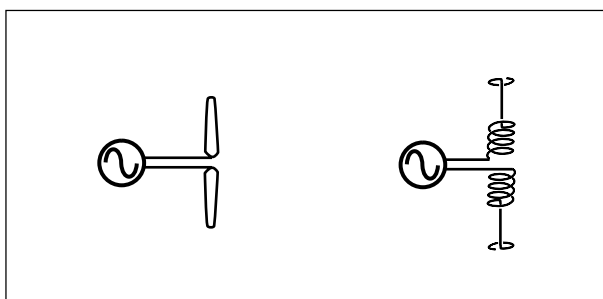
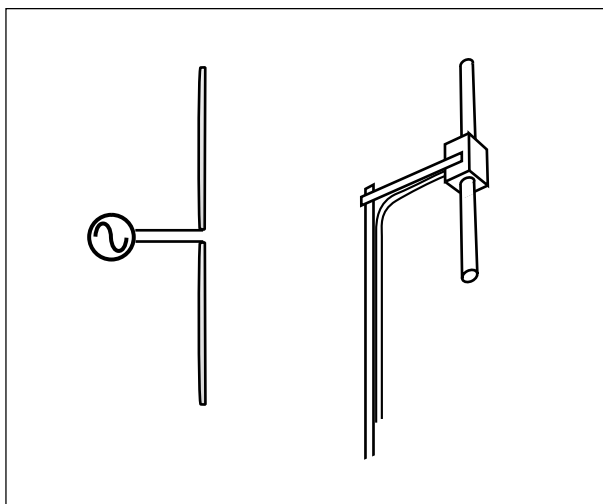
Vanligaste sättet att åstadkomma en antenn som sändaren klarar att mata över ett bredare frekvensområde, är att göra antennbenen tjocka. Tekniken används från pyttesmå mikrovågsantenner till jättestora kortvågsantenner.

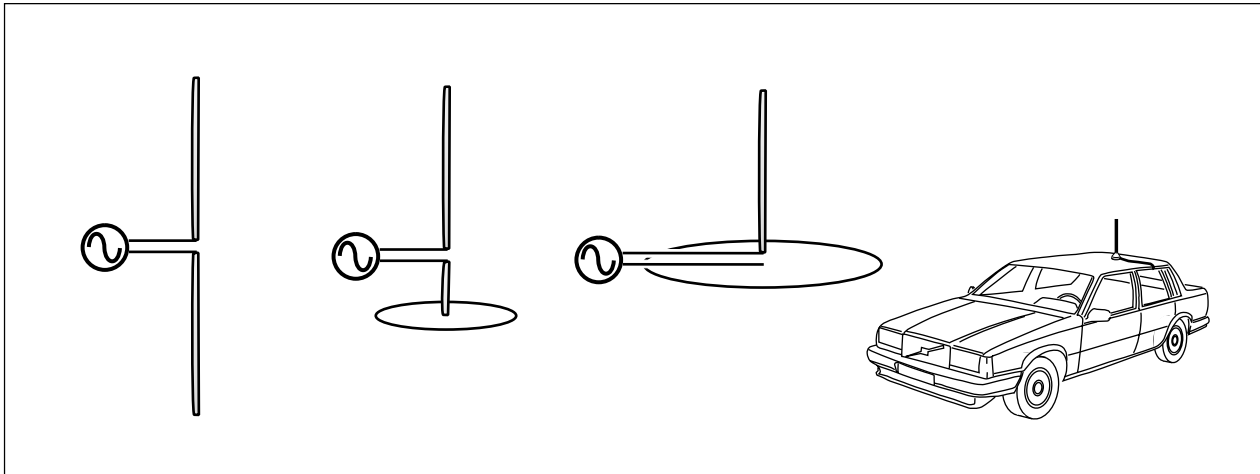
Ficktelefonen: Ett förkortat antennben och ett bredbandigt antennben

Ficktelefonen är exempel på en antenn där ena antennbenet är hälften av en förkortad halvvågsdipol, medan själva ficktelefonen utgör ett tjockt antennben, hälften av en bredbandig halvvågsdipol.

Det går alldeles utmärkt att kombinera två olika antennben på detta sätt. Man kan enkelt visa att det nästan enbart är det smalbandiga antennbenet som bestämmer antennens resonansfrekvens och bandbredd. Och tur är detta eftersom vi både håller i och lägger örat emot det bredbandiga antennbenet.

Med diverse knep kan man utforma ficktelefonen på sådant sätt att laddningarna håller sig i överkanten, i närheten av det smalbandiga antennbenet.





Kvartsvåg på jordplan

Om ena antennbenet förkortas med kapacitansbleck och man gör kondensatorn så stor att den ersätter hela antennbenet får vi kvartsvågsantennen på jordplan.

Bilplåten fungerar som kondensatorbleck, ett kraftigt förkortat antenspröt, åtminstone på frekvenser upp till ca 150 MHz.

Om jordplanet är större

Ju högre frekvensen blir, desto större blir biltaket, inte fysiskt, men i våglängder räknat.

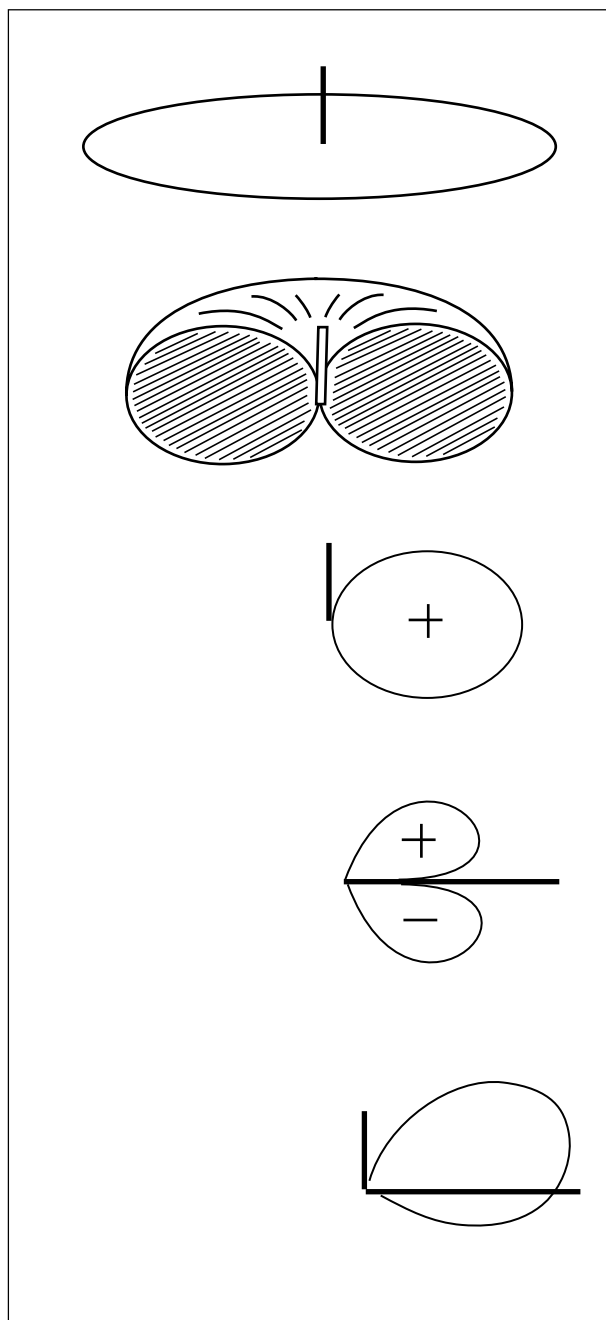
På 900 MHz och 1800 MHz kan biltaket ses som en stor mängd långtrådsantennor som ligger runt det vertikala antensprötet likt ekrarna i ett cykelhjul.

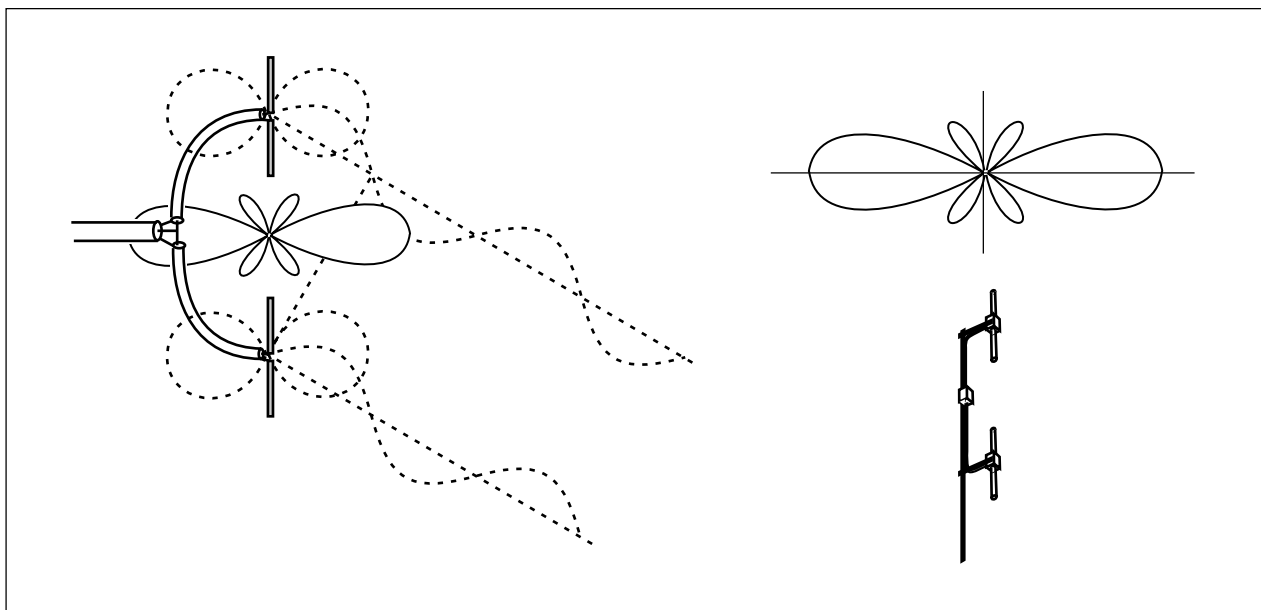
Andra bilden visar riktningsdiagrammet från det vertikala sprötet. Tredje bilden är samma diagram ritat i en riktning.

Fjärde bilden visar riktningsdiagrammet från en långtrådsantenn. Sådana diagram finns i alla riktningar runt om.

Femte bilden visar summan av diagram tre och fyra, det verkliga diagrammet för kvartsvågsantenn på ett stort jordplan. Det intressanta är att i riktningar snett uppåt adderas strålningen från det vertikala kvartsvågssprötet och långtrådsantennen, medan i riktningar snett nedåt blir strålningen skillnaden mellan diagrammen (något förenklat, fasläget är inte exakt 0° eller 180°).

Vid oändligt lång långtrådsantenn, som dessutom skall ha oändligt god ledningsförmåga, blir summadiagrammet det man får med den så kallade "speglingsteorin".





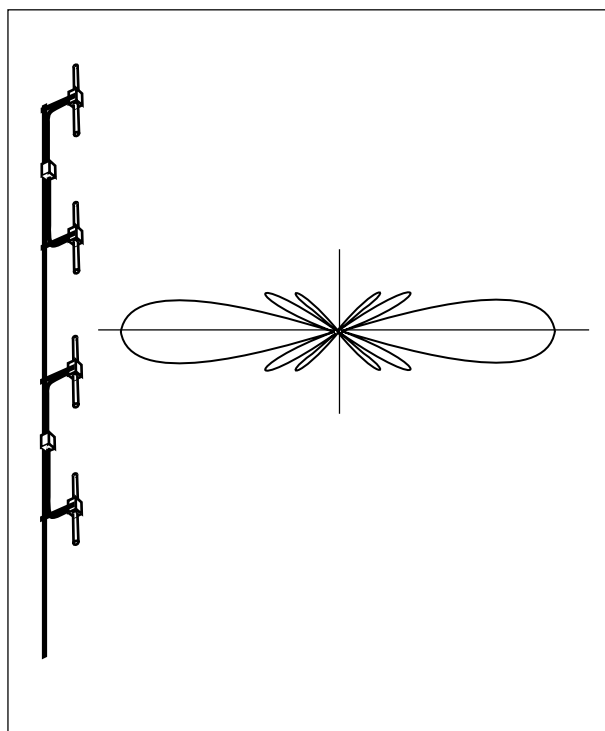
Antennvinst

Om två halvvågsdipoler placeras över varandra på en mast och ansluts till sändaren via lika långa antennkablar, kommer strålningen från de båda antennerna att ha gått olika lång väg i riktningar snett nedåt och snett uppåt. Vid någon viss vinkel har den ena signalen gått en halv våglängd längre. Då hamnar signalerna i motfas och tar ut varandra. I den riktningen kan det inte bildas någon radiostrålning.

Den enskilda antennen vill stråla i denna riktning, men antensystemet strålar inte. Vart tar effekten vägen? Den hamnar i detta fall i riktningen rakt ut från antensystemet. Vi får kraftigare signal. Men denna kraftigare signal tas från riktningar där signalen blir svagare. Detta är antennvinst (*gain*, felaktigt kallad antennförstärkning).

Antennvinst innebär att antennen strålar kraftigare i den önskade riktningen, men på bekostnad av andra riktningar där strålningen blir svagare.

Nästa bild visar fyra halvvågsdipoler på linje ovanför varandra (kollinjär antenn). I detta fall får vi ytterligare två vinklar där strålningen blir noll (de övre båda antennerna mot de båda undre antennerna) och antennvinsten blir ännu högre.



Riktantenner

De kollinjära antennerna på föregående sida har visserligen antennvinst men strålningen riktas fortfarande runt om i horisontalplanet. Dessa antenner är rundstrålände (men med hoptryckt antennlob, pannkakslob).

Verkliga riktantenner riktar strålningen i en riktning, eller i en sektor, i horisontalplanet.

Enkel riktantenn

Enklaste typen av riktantenn får man om två halv vågsdipoler placeras 0,25 våglängder från varandra och matas med kablar där ena kabeln är 0,25 våglängder längre.

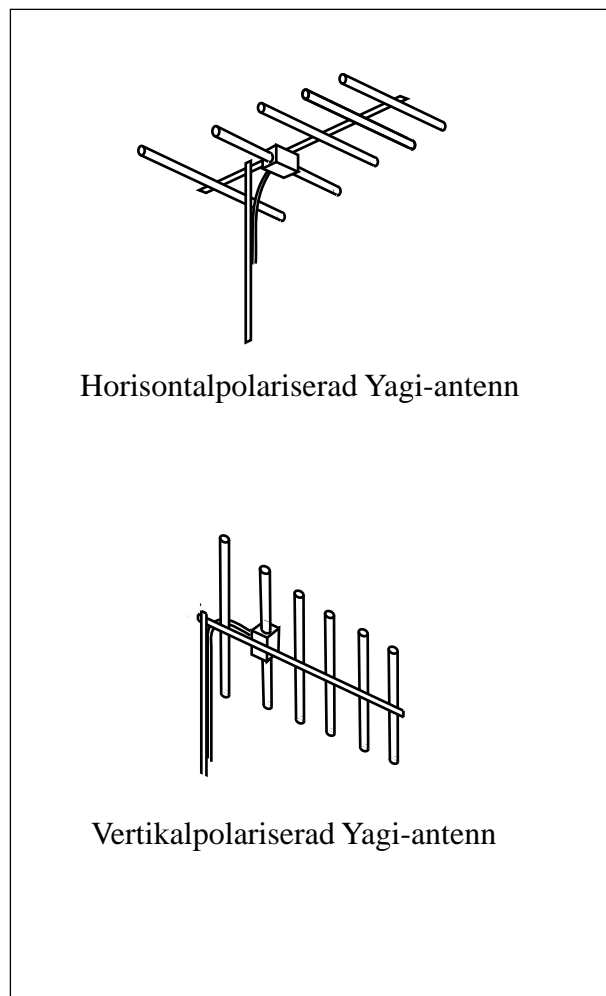
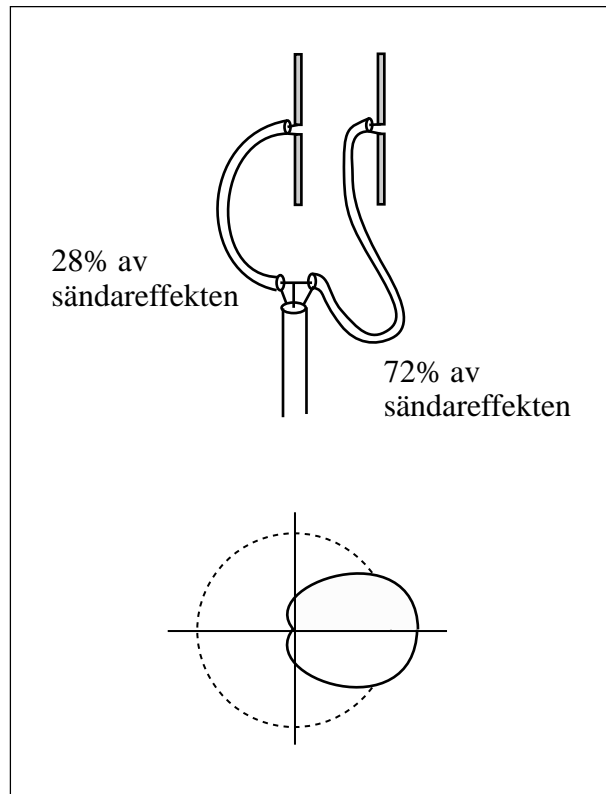
- Åt höger tar den extra gångvägen i luften och den längre kabeln ut varandra. Signalerna samverkar.
- Åt vänster har ena signalen gått först 0,25 våglängder längre i kabeln och sedan ytterligare 0,25 våglängder längre väg i luften, totalt 0,5 våglängder. I denna riktning hamnar signalerna i motfas och tar ut varandra.

Tekniken bakom riktantenner är att utnyttja flera strålningsskällor. I viss/vissa riktningar samverkar strålarna, i andra riktningar motverkar strålarna varandra. För att åstadkomma detta krävs utrymme. Strålarna måste gå med olika vägskillnad i olika riktningar. En riktantenn med viss antennvinst får normalt alltid en viss minsta storlek (i våglängder).

Yagi-antennen

Antennen ovan är enkel i teorin men svår att realisera. För att lika stark signal skall stråla ut från båda dipolerna måste det gå lika stor ström i de båda dipolerna.

Men dipolerna får inte bara signal via kablarna. De är även mottagarantenner i förhållande till varandra (antennerna "kopplar" till varandra). I detta fall blir det så att på ena dipolen samverkar signalen från kabeln och det som kommer genom luften. På andra dipolen motverkar dessa båda signaler varandra. För att strömmarna skall bli lika stora måste sändareffekten delas olika.



Om ena dipolen får så stark signal genom luften att den inte behöver någon signal från sändaren? Då kan vi ta bort den kabeln.

Detta är Yagi-antennen. Man kombinerar flera halv vågsantennar, men bara en av antennerna är ansluten med antennkabel till sändaren (mottagaren). De övriga är "anslutna" via strålning (koppling) genom luften, till det anslutna antennelementet.

Reflektorantennar

Dipolen kan placeras framför en plåt. Den signal som går mot plåten kommer att alstra ström i plåten. Denna ström ger radiostrålning. Vi får alltså strålning både från halv vågsdipolen och från plåten.

När avståndet mellan dipol och plåt är 0,25 våglängder samverkar de båda strålarna i riktningen rakt fram från plåten genom dipolen.

I dagligt tal säger man att signalen har reflekterats i plåten och samtidigt fasvridits 180°. Men reflexion låter så passivt, som något som inte kan påverkas. Vad som händer är att signalen från dipolen alstrar elektriskt fält som ger ström, men strömmens storlek och fas beror på plåtens utseende. Och denna ström i plåten ger strålning på nytt.

Parabolantennar

När reflektorn blir mycket stor i våglängder kommer radiovågorna att bära sig åt som ljuset. Radiovågornas strålgång mot parabolen och reflexion till fokus följer optikens lagar.

Mottagarantenn

Jag har mest talat om sändarantenn. Vad skiljer mottagarantenn från sändarantenn?

Samma riktningsdiagram och antennvinst

Antennen får exakt samma riktningsdiagram oberoende av om den används för sändning eller för mottagning. Därav följer att den även har samma antennvinst i båda fallen.

Samma impedans

Antennens inre impedans, sådan den upplevs av sändaren, och av mottagaren, är exakt densamma i båda fallen.

Inte samma bandbredd

Sändaren är en spänningsgenerator med extremt låg inre impedans som ansluts till antennimpedansen. Detta ger en resonanskrets där Q-värdet, bandbredden, enbart bestäms av antennens strålningsresistans.

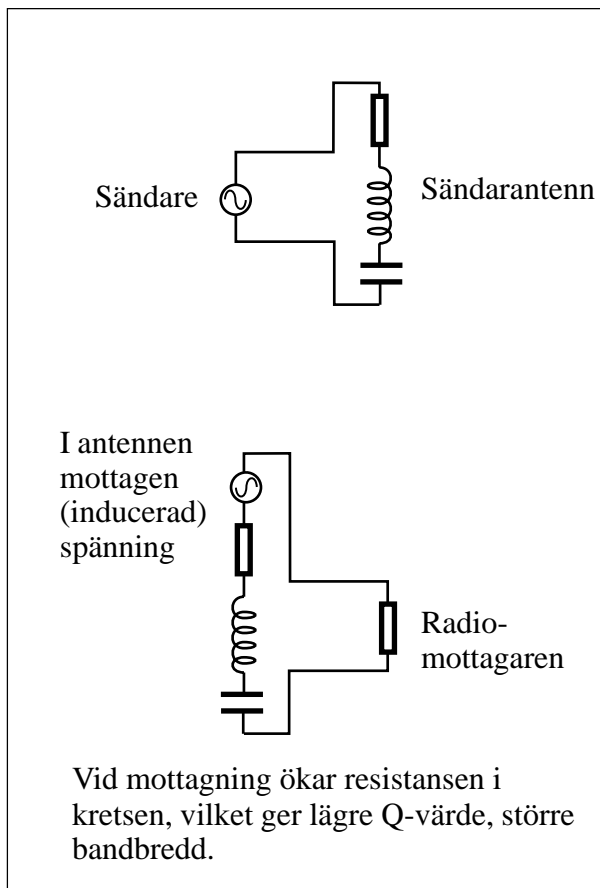
Radiomottagaren absorberar den mottagna effekten. Radiomottagaren ser ut som ett motstånd på ungefär 50 ohm. Därför får vi vid mottagning en resonanskrets som belastas med högre resistans, vilket ger lägre Q-värde, större bandbredd.

Om antennens strålningsresistans avviker från det nominella, t ex 50 ohm, så får vi en relativt kraftig förändring av den utstrålade effekten.

Vid mottagning kommer effekten som hamnar i radiomottagaren bara att ändras i ringa grad för samma förändring av antennens strålningsresistans.

OBS att detta resonemang är grovt förenklat eftersom transformation i antennkabeln tillkommer. Det förändrar dock inget i princip.

Varför fungerar Yagi-antennen bra som mottagarantenn över större delen av UHF-TV-bandet, medan den samtidigt är extremt smalbandig när den används som sändarantenn? Jo, vid mottagning accepterar vi större "missanpassning" därför att det inte inverkar lika kraftigt på effektöverföringen till mottagaren.



En annan orsak är att vi vid TV-mottagning inte alltid är ute efter så kraftig signal. Vi kan acceptera att tappa signal på grund av missanpassning, därför att vi först och främst är ute efter ett smalt riktningsdiagram för att undertrycka reflexer, skuggbilder.

Verkningsgraden inte alltid så viktig vid mottagning

En sändarantenn bör ha hög verkningsgrad. Effekten skall bli radiovågor, inte värme i antennen (ohmskt motstånd i antennledaren).

Vid mottagning är signal/stör-förhållandet viktigt, inte signalens absolutvärde. Om störningarna kommer in via antennen medför låg verkningsgrad att signal och störning dämpas lika mycket. Signal/stör-förhållandet är oförändrat.

Exempel på god mottagarantenn med extremt låg verkningsgrad är ferritantennen för mellanvågsmottagning (transistorradio för LF- och MF-bandet).

6 — HUR KRAFTIG BLIR SIGNALEN VID FRI SIKT?

- Hur kraftig blir signalen när vi använder rundstrålande antenner?
- Vad händer med signalen om vi går högre upp i frekvens men använder samma antenntyp?
- Vad händer med signalen om vi byter mot riktantenner?
- Hur kraftig riktverkan kan vi ha? Hur ”många riktningar” skall antennen täcka?

Lägre frekvens ger starkare mottagen signal. Det var detta Marconi utnyttjade för att få längre räckvidd.

På högskolorna experimenterade man med mindre antenner placerade i större parabler för att öka räckvidden. Mindre antenn alstrade högre frekvens, som visserligen borde innebära svagare mottagen signal, men detta kompensades av parabolantennernas större antennvinst vid högre frekvens.

I teorin är detta riktigt, som vi skall se. Men dåtidens radiomottagare hade låg känslighet, och ju högre frekvensen blev, desto sämre blev mottagarkänsligheten.

Högskolorna gjorde rätt i teorin men föll på för dålig mottagarkänslighet.

Men i dag, när man kan bygga känsliga mottagare för hög frekvens? Borde vi inte gå allt högre i frekvens?

Förutsättningen för att högre frekvens skall nå längre är dels fri sikt, dels att vi använder riktantenner.

Riktantenner gör exakt vad namnet säger. Som sändarantenn riktar de strålningen i viss riktning, som mottagarantenn är de bara känsliga för strålning som kommer från vissa riktningar. I andra riktningar är dessa antenner ingen antenn.

Den som stått på taket och försökt hitta satelliten med en 12 GHz parabol vet vad riktantenn innebär.

Men tekniska utvecklingen går faktiskt därhän att vi börjar få ”självinriktande” antenner. Antennloben, riktningen, styrs elektroniskt så vi slipper en brummande motor som svänger antennen, och inriktningen går så snabbt att antennen klarar att låta antennloben följa en rörlig motstation. Med sådan teknik kommer de riktigt höga frekvensbanden inte bara att betyda svårigheter utan även att innebära nya fördelar.

Fri rymd-utbredning

Isotrop antenn

Vid beräkningar utgår man från en antenn som är helt rundstrålande (isotrop), dvs den strålar lika kraftigt i alla riktningar. En sådan antenn kan inte byggas eftersom detta innebär att man måste få elektronerna att röra sig i alla riktningar samtidigt. Men man kan tänka sig en isotrop antenn. Den isotropa antennen är därför en tänkt antenn.

Signalstyrkan från en isotrop antenn

Signalstyrkan kan antingen beräknas som effekttäthet S [W/m^2] eller som elektrisk fältstyrka E [V/m]. Det är enkelt att omvandla mellan dessa eftersom rymden ser ut som 377 ohm.

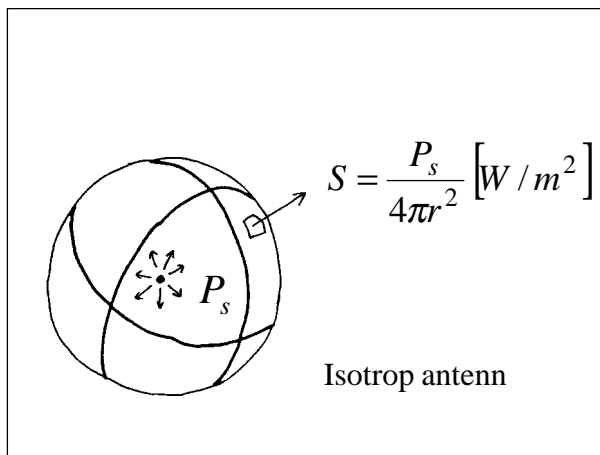
Om sändareffekten sprids, fördelas lika kraftigt i alla riktningar, beräknas effekttätheten på avståndet r genom att fördela effekten på sfärens yta.

Mottagarantennens antenntyta

När antennen används som mottagarantenn tycks antennen ha en viss antenntyta A [m^2] och all effekt som kommer inom denna yta fångas upp och matas till mottagaren.

Mottagen signaleffekt

Nu kan vi beräkna den effekt P_m som mottagarantennen levererar till en anpassad last (maximalt uttagbar effekt).


$$S = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$
$$S = \frac{E^2}{377}$$
$$A_i = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$
$$P_m = S \cdot A_i = \frac{P_s}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

S = effekttäthet [W/m^2]
 P_s = sändareffekt [W]
 r = avstånd [m]
 E = fältstyrka [V/m]
 A_i = antenntyta för isotrop antenn [m^2]
 λ = våglängd [m]
 P_m = mottagen effekt [W]

Decibel

Radioteknikern tycker det är trevligare att addera och subtrahera än att multiplicera och dividera. Därför räknar han om värdena till decibel [dB].

dBW eller dBm

Decibel är egentligen förhållandet mellan effekter. Hur många gånger signalen dämpas från sändarantennen till mottagarantennen är ett förhållande mellan effekter och kan uttryckas i dB.

Vad gör vi med sändareffekten respektive den mottagna effekten? Vi uttrycker dem relativt en referenseffekt som kan vara 1 W [dBW] eller 1 mW [dBm].

Dämpningen L_b [dB] mellan isotropa antenner

Vi definierar L_b [dB] som dämpningen mellan två isotropa antenner och kan t ex välja mellan följande två uttryck:

$$L_b [dB] = -22 - 20 \log \frac{r}{\lambda}$$

$$L_b [dB] = -32,4 - 20 \log r [km] - 20 \log f [MHz]$$

När vi beräknat dämpningen får vi den mottagna effekten på något av följande tre sätt,

$$P_m [dBW] = P_s [dBW] + L_b [dB]$$

$$P_m [dBm] = P_s [dBm] + L_b [dB]$$

$$P_m [dBm] = P_s [dBW] + 30 + L_b [dB]$$

och den verkliga effekten i W eller mW genom att omvandla tillbaka från decibel.

$$P [dBW] = 10 \cdot \log \frac{P}{1 [W]}$$

$$P [dBm] = 10 \cdot \log \frac{P}{1 [mW]}$$

$$10 \cdot \log P_m = 10 \cdot \log \frac{P_s}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} =$$

$$10 \log P_s - 20 \log 4\pi - 20 \log \frac{r}{\lambda}$$

$$P_m [dBW] = P_s [dBW] - 20 \log 4\pi - 20 \log \frac{r}{\lambda}$$

$$P_m [dBm] = P_s [dBm] - 20 \log 4\pi - 20 \log \frac{r}{\lambda}$$

$$P_m [W] = 10^{\frac{P_m [dBW]}{10}}$$

$$P_m [mW] = 10^{\frac{P_m [dBm]}{10}}$$

L_b [dB] vid olika frekvenser och avstånd:

Avstånd	450 MHz	900 MHz	1800 MHz	12 GHz
100 m	-65,5 dB	-71,5 dB	-77,5 dB	-94 dB
200 m	-71,5 dB	-77,5 dB	-83,5 dB	-100 dB
1000 m	-85,5 dB	-91,5 dB	-97,5 dB	-114 dB
5000 m	-99,5 dB	-105,5 dB	-111,5 dB	-128 dB
10 km	105,5 dB	-111,5 dB	-117,5 dB	-134 dB
100 km	-125,5 dB	-131,5 dB	-137,5 dB	-154 dB
36000 km	-176,7 dB	-182,7 dB	-188,7 dB	-205 dB

Dämpningen ökar 6 dB när avståndet fördubblas

Vi ser både av formlerna och tabellen ovan att den mottagna effekten minskar 6 dB när avståndet fördubblas (observera att vi har fri sikt).

Dämpningen ökar 6 dB när frekvensen fördubblas

Vi ser både av formlerna och tabellen ovan att den mottagna effekten minskar 6 dB när vi använder dubbelt så hög frekvens.

effekt	P_s [dBW]	P_s [dBm]
10 W	+10 dBW	+40 dBm
1 W	0 dBW	+30 dBm
100 mW	-10 dBW	+20 dBm
10 mW	-20 dBW	+10 dBm

Antennvinst G [dBi]

Isotropa antenner finns inte. De antenner vi använder på bilen eller ficktelefonen är ungefär en halv vågsdipol eller aningen förkortad halv vågsdipol. I bästa riktningen strålar en sådan antenn något kraftigare än en isotrop antenn, i sämsta riktningen aningen sämre.

Antennvinsten G anger hur mycket bättre vår antenn är i bästa riktningen, och för att visa att vi jämför med en isotrop antenn får antennvinsten storheten [dBi], där index i syftar på isotrop antenn.

Verklig mottagen effekt beräknas genom att addera antennvinsten, för både sändarantennen och mottagarantennen.

$$P_m [dBW] = P_s [dBW] + G_s [dBi] + G_m [dBi] + L_b [dB]$$

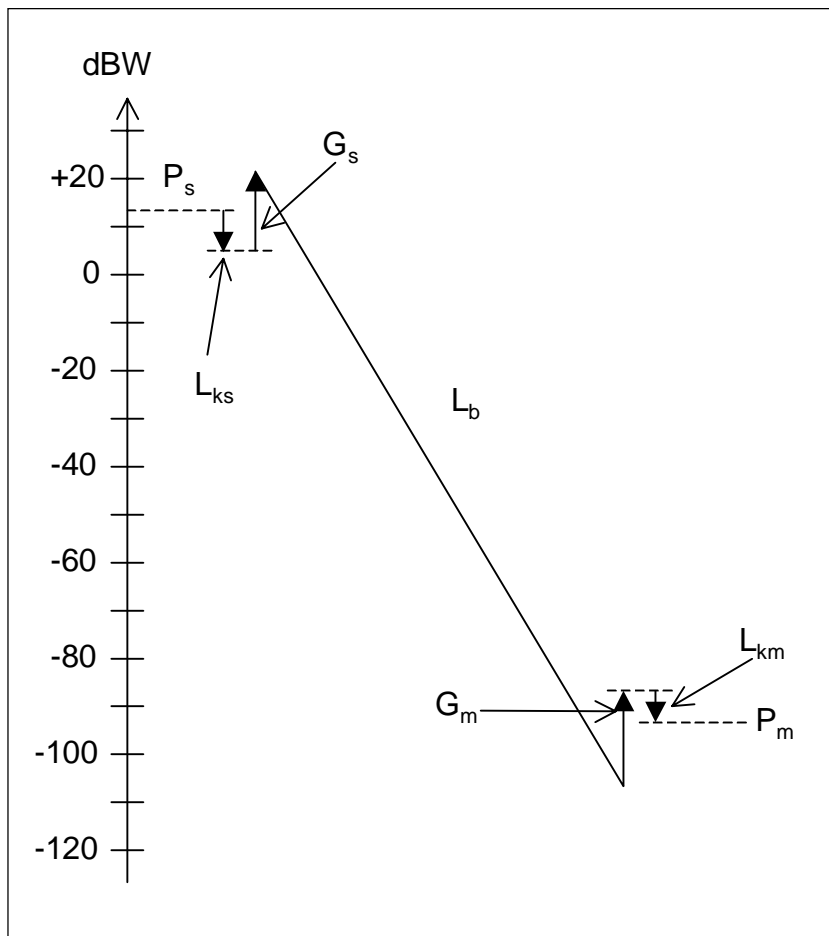
6 — HUR KRAFTIG BLIR SIGNALEN VID FRI SIKT?

Kabeldämpning

Vi kan lägga till ytterligare termer till vår utbredningsformel. Kabeldämpningen L_{ks} från sändaren upp till sändarantennen behöver subtraheras. Kabeldämpningen L_{km} från mottagarantennen till radiomottagaren skall subtraheras.

Länkbudget

På detta sätt kan vi rita en grafisk bild, en länkbudget, över förbindelsen.



$$P_m [dBW] = P_s [dBW] - L_{ks} [dB] + G_s [dBi] - L_b [dB] + G_m [dBi] - L_{km} [dB]$$

Vilka räckvidder kan man få?

Som exempel skall vi titta på några typiska värden för GSM och DECT. Kom ihåg att förutsättningen är fri rymd, om du tycker att räckvidden är lång!

Typiska värden på mottagarkänsligheten är -104 dBm (-134 dBW) för GSM och för DECT -86 dBm (-116 dBW).

Radiosystem	GSM	DECT
Sändareffekt	2 W +3 dBW	250 mW -6 dBW
mottagarkänslighet	-134 dBW	-116 dBW
antennvinst sändarantenn	+2,15 dBi	+2,15 dBi
antennvinst mottagarantenn	+2,15 dBi	+2,15 dBi
Högsta värde på L_b	-141,3 dB	-114,3 dB
Räckvidd i fri rymd	309 km	6,9 km

6 — HUR KRAFTIG BLIR SIGNALLEN VID FRI SIKT?

Den första boken om
DIGITAL RADIO

12 GHz satellit-TV

En satellitmottagare behöver ungefär -117 dBW för brusfri mottagning. Rymddämpningen är -205 dB. Detta betyder att satelliten skulle behöva sända med +84 dBW (251 miljoner W) om man använder halv vågsdipoler (+2,15 dBi), en helt orimlig siffra. Hur klarar vi detta?

Antennvinst

När halv vågsdipolen används som mottagarantenn har den en antenntyta A_d som är 2,15 dB större än för isotropa antennen. All signal som kommer inom denna yta fångas upp av antennen.

Antenntytan för halv vågsdipolen minskar ju högre frekvensen blir. Ytan minskar till 1/4 när vi ökar frekvensen till det dubbla. En fjärdedel av effekten motsvarar -6 dB. Det är dessa 6 dB som syns i L_b när vi dubblar frekvensen.

$$A_d = A_i \cdot 10^{\frac{2,15}{10}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot 1,64 \approx \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\lambda}{4}$$

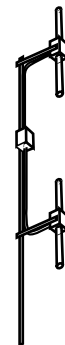
Parallellkoppla två antenner

Parallellkoppla två antenner och placera antennerna så långt från varandra att antenntyterna inte överlappar. Då ökar totala antenntytan till det dubbla (+3dB).

Vad händer om vi använder denna antenn för sändning? Jo, då ökar sändarantennvinsten G med 3 dB till 5,15 dBi.

Varifrån kommer vinsten?

En antenn som har +5,15 dBi antennvinst (3 dB bättre än halv vågsdipolen i någon viss riktning) måste vara sämre än halv vågsdipolen i andra riktningar. Bättre i en riktning medför automatiskt sämre i andra riktningar. Effekten som skulle gått i de sämre riktningarna "flyttas" till de bättre riktningarna.



*Dubbla
antennytan*

Parabolantennen

Parabolantennen fångar nästan in all radiostrålning som kommer inom dess tvärsnittsyta. Parabolantennens antennyta kan därför uppskattas till halva tvärsnittsytan (halva därför att det är svårt att utnyttja parabolens optimalt ända ut i kanten).

$$A_{parabol} \approx 0,5 \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_{parabol} = G_p [ggr] \cdot A_i$$

$$G_p [ggr] = \frac{A_{parabol}}{A_i}$$

$$G_p [ggr] = \frac{A_{parabol}}{A_i} \approx \frac{0,5 \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\lambda^2}{4\pi}} = 0,5 \cdot \left[\frac{\pi d}{\lambda} \right]^2 = \frac{50 \cdot \pi^2}{9} d^2 f^2 [GHz]$$

$$G_p [dBi] \approx 17,4 + 20 \log d [m] + 20 \log f [GHz]$$

Parabol för 12 GHz satellit-TV

Som exempel skall vi se på en parabol för 12 GHz satellit-TV med 1 m diameter. Antennvinsten G_p kan beräknas direkt ur formeln och vi får 39 dBi, eller vi kan resonera på följande sätt:

Vid 12 GHz har isotropa antennen en antennyta som är $0,497 \text{ cm}^2$. En parabol med 1 m diameter har ungefär antennytan (halva ytan) $0,3927 \text{ m}^2$. Parabolen fångar således in 7 901 ggr mer effekt. Detta motsvarar antennvinsten 39 dBi.

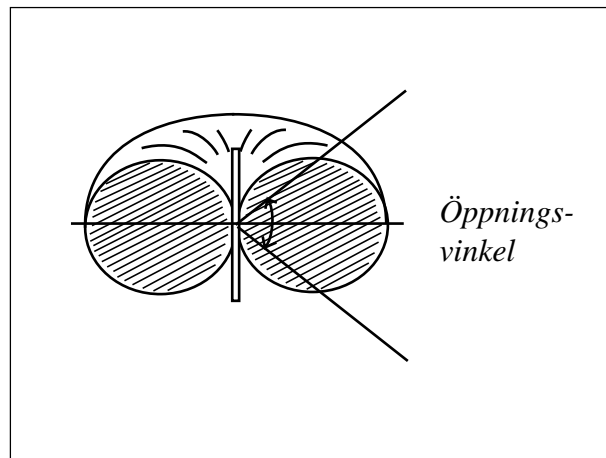
Verklig antennvinst beror på hur väl matarantennen i parabolens fokus klarar att utnyttja parabolens tvärsnittsyta utan att spilla effekt utanför parabolens kant. Dessutom finns alltid lite resistiva förluster. Beräkningen ovan är förenklad, men noggrannare beräkningar hamnar nära detta värde.

Vilket täckningsområde?

Effekten koncentreras inom en rymdvinkel

På samma sätt som antennvinsten beräknas som förhållandet mellan antennernas antenntytor, är antennvinsten även förhållandet mellan den yta av enhetssfären som bestrålas av antennerna.

- Isotropa antennen bestrålar hela enhetssfären med ytan 4π .
- Verkliga antenner kan antas koncentrera sin strålning inom de riktningar som begränsas av vinklarna där signalen minskat 3 dB jämfört med maxriktningen.
- En vertikal halvvågsdipol har 3 dB-öppningsvinkel på 78° . Med denna öppningsvinkel bestrålas 63% av enhetssfärens yta. Därför blir signalen 1,59 ggr starkare. Detta motsvarar 2,01 dBi, ganska nära det verkliga värdet 2,15 dBi.
- En parabol bestrålar en liten kalott på enhetssfären. Utgående från den yta på enhetssfären som bestrålas, kan man härleda ett uttryck för antennvinsten utgående från 3 dB-öppningsvinkeln.



$$G_p [dBi] \approx 47,2 - 20 \log(vinkel_{-3dB}^o)$$

Högre antennvinst, smalare öppningsvinkel

En geostationär satellit som skall täcka Europa med sin antennlob behöver en öppningsvinkel på ungefär 3° . Detta ger maximal $G_p = 37,7$ dBi. Högre antennvinst kan inte användas på satelliten för då täcker strålningsloben inte hela Europa.

12 GHz satellitmottagning

I satellitmottagningsexemplet behövdes +84 dBW på satelliten om man använder halvvågsdipoler. Om sändareffekten sänks till 50 W (+17 dBW) vilket är ett rimligt värde, behövs antenner med sammanlagd antennvinst 71 dBi. En parabol på satelliten som täcker Europa har antennvinsten 37,7 dBi. Då behöver mottagarparabolen på marken antennvinsten 33,3 dBi. Detta åstadkommer man med en parabol med diametern 52 cm.

Med rundstrålande antenn (halvvågsdipol) krävs högre effekt när frekvensen ökar

Om radiosystemet behöver rundstrålande antenner för att fungera, t ex mobiltelefoni, måste effekten ökas fyra gånger om man ökar frekvensen till det dubbla, för att uppnå likartade förhållanden. OBSERVERA att vi talar om fri sikt, exempelvis satellitmobiltelefon.

När det inte är fri sikt beror resultatet på vad det är som skymmer och vilken frekvens som avses, men som regel gäller att det krävs högre effekt när frekvensen ökar.

Med parabol krävs lägre effekt när frekvensen ökar

Parabolantennens antennvinst ökar +6 dB vid dubbla frekvensen. Med två parabolantennor, en för sändning och en för mottagning, ökar totala antennvinsten +12 dB, medan L_b bara ökar -6 dB. Det går lättare och lättare ju högre frekvensen är. Men samtidigt blir lobvinkeln smalare. Till slut blir lobvinkeln så smal att antennerna inte "hittar" varandra. Det är också svårare att åstadkomma hög sändareffekt vid hög frekvens.

Smart antenn

Vid mobiltelefoni måste dagens ficktelefoner ha rundstrålande antenn, dvs ungefär en halvvågs dipolantenn. Man kan därför varken utnyttja antennvinst eller hög sändareffekt för att uppnå lång räckvidd.

På basstationen kan man höja sändareffekten för att uppnå lång räckvidd vid sändning från bas till mobil. Man kan dessutom höja basstationmottagarantennens antennvinst för att uppnå lång räckvidd i riktning mobil till basen. Men hög antennvinst innebär smal antennlob, kanske så smal att loben inte bara måste riktas mot mobilen, utan dessutom måste följa mobilen i dess rörelser.

En sådan antenn med smal lob som inte styrs med motor utan riktas elektriskt genom att reglera signalens fas från flera kombinerade antenner, kallas elektriskt styrd antenn (ESA).

Det är mer komplicerat att ändra signalens fas vid höga signalnivåer (sändning). Därför används de första elektriskt styrda antennerna för mottagning.

Den tekniska utvecklingen gör det möjligt att använda samma teknik för sändning från basstationen.

"Dynamiskt cellutseende"

Elektriskt styrda antenner med smal antennlob innebär inte bara ökad räckvidd, utan även möjlighet att klämma in fler samtidiga samtal per frekvens och basstation.

Idag har vi basstationer som täcker en cell med rundstrålande antenn, eller som täcker tre celler med "sektorantennor". Med elektriskt styrd antenn får vi ett dynamiskt cellutseende. Cellen skapas som en smal korridor mellan basstationen och mobilen, och cellen vrider sig i takt med att mobilen flyttar sig. "Mikroceller — där de behövs"!

Den stora oredan!

Några ord om antennvinst, dBd eller dBi

Antennvinst innebär att man jämför sin antenn med en referensantenn. Jag har genomgående använt den isotropa antennen som referensantenn.

Teknikern som mäter antennvinst på antennmätplats utgår oftast från en halv vågsdipol som referensantenn. Det har därför varit vanligt att ange antennvinsten relativt en halv vågsdipol [dBd].

Matematiskt är det mer väldefinierat att utgå från den isotropa antennen. Antennforskarna har därför valt att ange antennvinsten relativt den isotropa antennen [dBi].

Enda skillnaden mellan dessa båda sätt är 2,15 dB. Men det leder till stor oreda. Är antennvinsten i antenndatabladet i dBd eller dBi? Är formeln avsedd för dBd eller dBi?

Samma oreda finns mellan dBm och dBW.

$$G[dBi] = G[dBd] + 2,15$$

$$P[dBW] = P[dBm] - 30$$

7 — VILKA FREKVENSER VÄLJER VI FÖR MOBIL KOMMUNIKATION?

- **Oavsett om elektronen gungar snabbt eller långsamt, oavsett frekvens, så får vi radiostrålning. Vilken frekvens väljer vi om vi får välja?**

Vid mobil kommunikation måste man släpa på både antennen och batteriet som matar sändaren.

Den effektivaste sändarantennen är en halv våglängd lång, eller en kvarts våglängd placerad på någon plåtyta som kan vara ett fordon eller själva radiostationen.

En förkortad sändarantenn får normalt lägre verkningsgrad, något som kan kompenseras med högre sändareffekt. Men då krävs större/tyngre batteri för att få samma drifttid, eller att sändaren matas från en motordriven generator.

Vid kommunikation "bortom horisonten" måste man antingen välja frekvenser under 1 MHz, där "ytvågen" följer jordytans krökning (sändarantennen blir så stor att sändarstationen ej är flyttbar), eller frekvenser i området 1 MHz – 30 MHz, där vi kan kommunicera via reflexion i jonosfären (övre atmosfären). Nackdelen är att jonosfärens reflekterande förmåga varierar med solfläckarna, årstid och tid på dygnet (solhöjden). Dessutom är risken stor att kommunikationen blir störd av andra radiosändare eftersom "täckningsområdet" i värsta fall kan omfatta halva jorden. Det är dessa frekvenser som försvaret måste använda vid kommunikation "bortom horisonten".

Vid 80 MHz är sändarantennen lagom stor (ca 1 m lång) att sätta på en bil. Vi har ytterst sällan vågutbredning via jonosfären, varför vi slipper störningar från avlägsna sändare på samma frekvens.

Vid 450 MHz kan sändarantennen sättas på en ficktelefon, men antennen upplevs som något för lång.

Vid 900 MHz och 1800 MHz får antennen acceptabel storlek.

När vi går högre i frekvens ökar dämpningen mellan antennerna.

Vid 5 GHz behövs högre sändareffekt för att klara räckvidden i ett mobiltelesystem för utomhusbruk. Men vi vill inte ha högre sändareffekt eftersom sändarantennen hålls nära huvudet. Dessutom minskar sändarens drifttid.

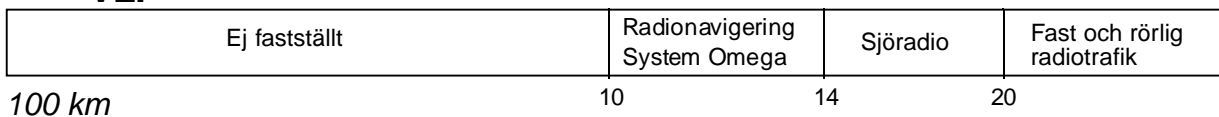
Det finns orsak till varför satellittelefoni använder relativt låg frekvens, ca 1600 MHz, och lågtflygande satelliter. Signalen når inte högre upp, med rundstrålande antenn på ficktelefonen.

Sändarantennens storlek sätter gräns för undre frekvensen, och sändareffekten begränsar den övre frekvensen.

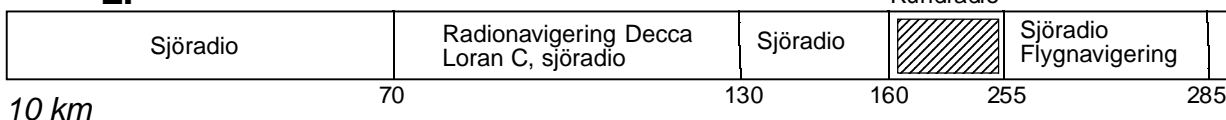
7 — VILKA FREKVENSER VÄLJER VI FÖR MOBIL KOMMUNIKATION?

Den första boken om
DIGITAL RADIO

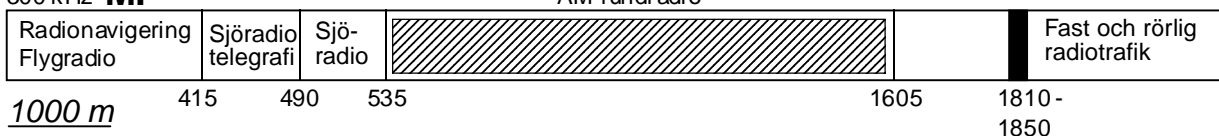
3 kHz **VLF** 30 kHz



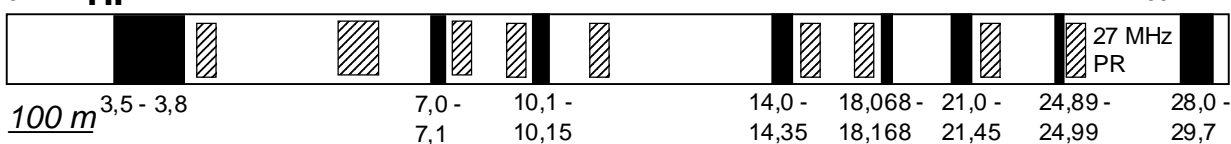
30 kHz **LF** 300 kHz



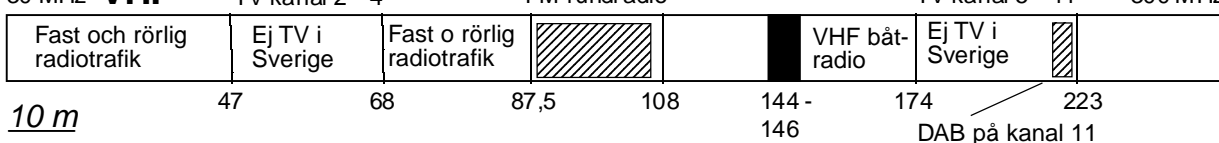
300 kHz **MF** 3000 kHz



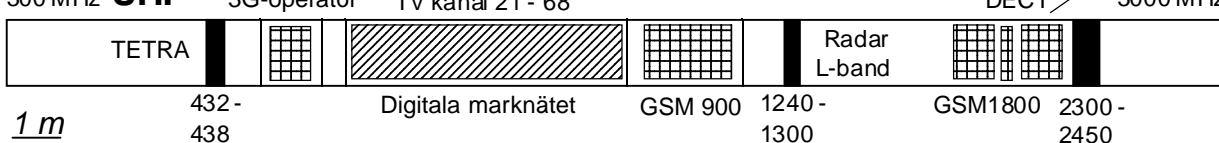
3 MHz **HF** 30 MHz



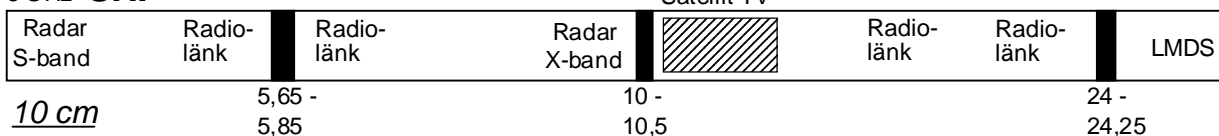
30 MHz **VHF** 300 MHz



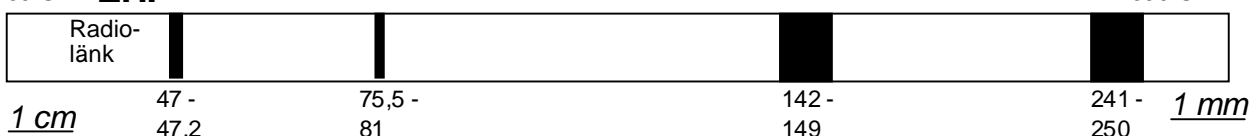
300 MHz **UHF** 3000 MHz



3 GHz **SHF** 30 GHz



30 GHz **EHF** 300 GHz



Rundradio (ljudradio och TV)

Amat radio

Mobiltelefoni

7 — VILKA FREKVENSER VÄLJER VI FÖR MOBIL KOMMUNIKATION?

3 kHz – 30 kHz 100 – 10 km våglängd
Sändarantennerna blir enormt stora. Fördelen med dessa frekvenser är att radiovågorna följer jordytans krökning (ytvåg).

Omega-systemet täcker jorden med bara 6 sändare. En sändare finns i Norge. Sändarantennen är uppspänd i en fjord!

30 kHz – 300 kHz 10 – 1 km våglängd
Sändarantennerna är fortfarande stora om de skall vara effektiva. Fördelen är att radiovågen täcker stor yta. Motala långvåg på 191 kHz täckte hela södra Sverige.

300 kHz – 3 MHz 1 km – 100 m
Fortfarande god utbredning via markvågen, speciellt över vatten. Sölvesborgs mellanvågsstation i Blekinge täcker hela södra Östersjön (markvåg) och nattetid stora delar av norra Europa (rymdvåg).

3 MHz – 30 MHz 100 m – 10 m
Dålig räckvidd via markvågen över land (några mil). Armén kommunicerar via reflex i jonosfären. Betydligt bättre markvågstäckning över vatten (400 km). Flottan kommunicerar direkt mellan fartygen via markvågen.

Används huvudsakligen för långväga kommunikation via reflex i jonosfären. Här finns rundradiosändningar till utlandet. Före satelliter och optokabel gick telefontrafiken mellan kontinenterna via kortvågsradio.

På 27 MHz (privatradiobandet) börjar sändarantennerna bli så små, kvartsvågen är 2,5 m, att de kan monteras på fordon.

30 MHz – 300 MHz 10 m – 1 m
Antennlängd lämplig för fordonsmontage. Här finner vi 80 MHz och 160 MHz kommunikationsradio och FM-rundradio. God räckvidd även i skogsområden.

VLF = Very Low Frequencies
LF = Low Frequencies
MF = Medium Frequencies
HF = High Frequencies
VHF = Very High Frequencies
UHF = Ultra High Frequencies
SHF = Super High Frequencies
EHF = Extremely High Frequencies

300 MHz – 3 GHz 1 m – 10 cm
Vid 450 MHz är antennen kortare och frekvensen högre men man får fortfarande hygglig räckvidd i skogsområden.

Vid 900 MHz är antennlängden lämplig för ficktelefon. Men 900 MHz går sämre än 450 MHz i skogsområden.

1800 MHz är avsevärt sämre i skogsområden, men "reflekterar" sig fram i stadsmiljö.

3 GHz – 30 GHz 10 cm – 1 cm
I detta frekvensområde får vi lämplig storlek på parabolantenn. Dock krävs normalt fri sikt eftersom dämpningen är betydande från vegetation. Även häftigt regn dämpar kraftigt.

Speciella radiosystem som täcker korta avstånd, t ex inomhus eller i stadskärnor med stora reflekterande ytor, kan klara sig utan direkt sikt, men bara om det finns gott om reflexer.

30 GHz – 300 GHz 1 cm – 1 mm
Vid 60 GHz är atmosfärdämpningen mycket hög. Frekvenser runt 60 GHz prövas för extrem korthållskommunikation, t ex trafik-säkerhetskommunikation mellan närliggande bilar på motorväg.

7 — VILKA FREKVENSER VÄLJER VI FÖR MOBIL KOMMUNIKATION?

*Den första boken om
DIGITAL RADIO*

8 — NÄR DET INTE ÄR FRI SIKT

- Påverkar luften radiovågorna?
- Påverkar regn, snö och dimma radiovågorna?
- Om jag tar med ficktelefonen ut i skogen?
- Finns inga fördelar med att gå högre upp i frekvens?
- Fädningsmarginal, vad är det?

Länkbudget:

Sändarens uteffekt:	+ ____	[dBW]
Antennkabelns dämpning:	- ____	[dB]
Sändarantennens antennvinst:	+ ____	[dBi]
Sträckdämpning mellan isotropa antenner:	- ____	[dB]
Dämpning i atmosfärgaser:	- ____	[dB]
Dämpning vid regn:	- ____	[dB]
Dämpning om sikten är skymd av träd:	- ____	[dB]
Dämpning vid reflexion mot husväggar:	- ____	[dB]
Fädningsmarginal (korta reflexer):	- ____	[dB]
Mottagarantennens antennvinst:	+ ____	[dBi]
Antennkabelns dämpning:	- ____	[dB]
Summa effekt till radiomottagaren:	____	[dBW]

Länkbudget är, som namnet anger, en budget som visar vilka vinster och förluster man har på sin radioförbindelse. När alla parametrar anges i dB är det bara att addera och subtrahera.

Vid mobiltelefoni måste man ställa upp länkbudget såväl för nedlänken, från basstation till mobilen, som upplänken, från mobil till basstation. Mobiltelefoni innebär att förbindelsen skall fungera i båda riktningarna. Därför blir den "svagaste" budgeten den som begränsar räckvidden.

Denna budget är inte på något sätt fullständig utan skall endast ses som ett exempel på hur det kan se ut.

Några viktiga punkter:

- Antennvinsten, känner du den i [dBi] eller [dBd]?
- Sändareffekt och effekt till mottagaren, [dBW] eller [dBm]?

Dämpning i atmosfären

När radiovågen går genom en gas kommer elektriska fältet att skaka gasmolekylerna i takt med radiovågens frekvens. Om gasmolekylens egenresonans stämmer med radiovågens frekvens kan gasmolekylen stjäla effekt från radiovågen. Radiovågen dämpas.

Vattenånga

Atmosfären består av en blandning av flera gaser. Vid frekvenser under 100 GHz finns främst vattenångemolekylen som dämpar radiovågor, ju mer ju högre frekvensen blir. Dessutom uppvisar vattenånga en dämpningstopp vid ca 23 GHz. Dämpningstillskottet vid 23 GHz är dock fortfarande relativt lågt, ca 3 dB vid ett radiolänkhopp på 15 km.

Dämpningen på grund av vattenånga innebär att vi får lägre atmosfärdämpning vid 36 – 42 GHz än vid 23 GHz.

Syre

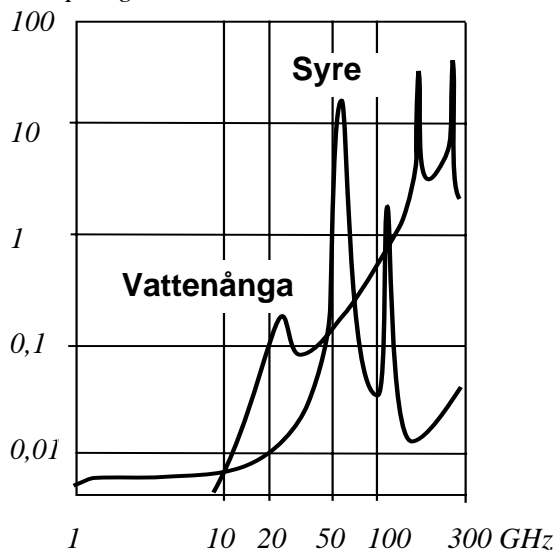
Syreatomen/molekylen uppvisar en markant dämpningstopp vid 60 – 70 GHz.

I detta frekvensband pågår sedan flera år utveckling av radiosystem som skall öka trafiksäkerheten på vägarna. Man tar fram radarsystem som håller reda på fordonen runt omkring, både framför och vid sidorna. Avsikten är att minska risken för olyckor vid dålig sikt, i mörker och dimma. Man studerar även system för informationsöverföring, t ex från vägstolpar (varningsskyltar) direkt till fordonet, och mellan fordon (bromsinformation).

Vid radiosystem av detta slag är det fördel att ha hög atmosfärdämpning eftersom man vill att signalen skall dämpas ut så fort som möjligt bortom den bil man vill nå. Atmosfärdämpningen innebär att signalen avtar med ungefär r^{-3} i stället för r^{-2} som gäller utan atmosfärdämpning. Samma resultat kan därför inte åstadkommas på annan frekvens genom att använda låg sändareffekt.

Atmosfärdämpning

Dämpning dB/km



Regndämpning

Vattendroppar är vattenånga i flytande form. Vatten har relativ dielektricitetskonstant på 80. Regndämpning är därför inte i första hand absorption av effekt, utan snarare spridning av radiovågen på grund av blandning av dielektrika med olika brytningsindex. Radiovågen sprids åt alla håll av vattendropparna, och den del av radiovågen som fortfarande går rakt fram minskar. Detta upplever vi som dämpning, minskning av den mottagna signalen.

Frekvensband under 10 GHz

Frekvensbanden 4 GHz, 6 GHz och 7 GHz används för långdistansradiolänkar med hopplängder på 40 – 60 km. I Sverige har vi ytterst sällan så häftiga skyfall att regndämpningen ställer till besvär på dessa frekvensband. I tropikerna är förhållandena besvärligare.

23 – 42 GHz

Atmosfärdämpningen på grund av vattenånga innebär att 40 GHz skulle kunna vara en lämpligare frekvens än 23 GHz. Men vad händer när det regnar?

Regndämpningen är avsevärt högre vid 40 GHz än vid 23 GHz. Därför måste man ha högre fädningsmarginal (reserv för dämpningsvariation) vid 40 GHz för att vara säker på att upprätthålla förbindelsen även när det regnar.

12 GHz satellit-TV

Speciellt vid åskskurar kan regndämpning ställa till besvär vid mottagning av TV från satellit med egen parabol.

Lustigt nog är det vanligtvis inte signalen från satelliten till hemmaparabolen som är för svag. Där finns oftast tillräckliga marginaler. Hemmaparabolen riktar mot den "kalla" himlen med brustemperatur 5 – 20 K medan den stackars satelliten har sin mottagarparabol riktad mot den varma jorden med brustemperaturen 290 K. Brustörningen från den varma jorden gör att satellitens mottagare får omkring 7 dB sämre känslighet än satellitmottagaren i

hemmet (räknat på 0,8 dB brusfaktor hos båda mottagarna).

För att kompensera för denna lägre känslighet hos satellitens mottagare använder man högre sändareffekt och större parabol på marken (jordstationen).

Dessutom sker sändningen från jorden till satelliten på högre frekvens, 12 – 14 GHz eller 18 GHz. Detta ger högre antennvinst hos parabolantennerna. Men samtidigt ökar risken för dämpning vid regn. Det behövs större fädningsmarginal.

Dämpning vid regn, snö, dimma

dämpning dB/km

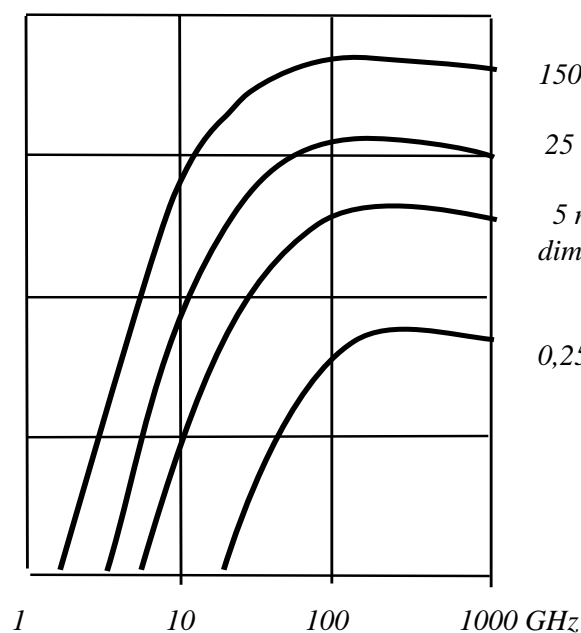
100

10

1

0,1

0,01



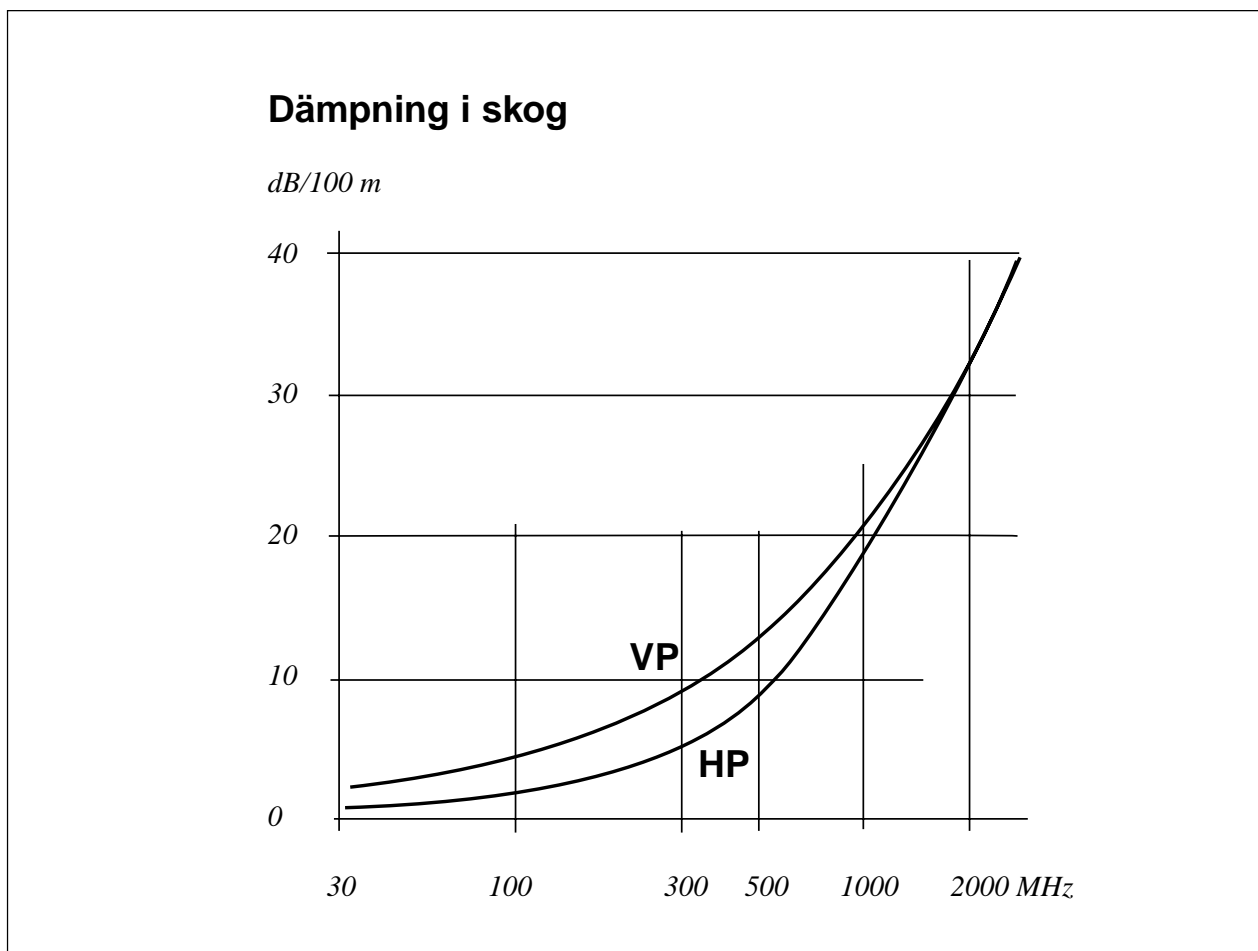
150 mm/h

25 mm/h

5 mm/h

dimma sikt 50 m

0,25 mm/h



Dämpning i skog

Träd innehåller sav som är elektriskt ledande.

Lövträd innehåller mer sav på våren vid lövsprickningen och under sommaren, än under vintern när det är kallt. Därför påverkar skogen radiovågen mer på våren, sommaren och hösten än under vintern.

När radiovågen kommer till skogen rycker den i savens elektroner och det uppstår ström, växelström. Hur kraftig strömmen blir beror på längden hos trädet, som är vår elektriska ledare.

Är ledaren i resonans? En eller flera halva våglängder lång? Eller är den så kort att det knappast blir någon ström alls? Om det inte induceras ström får vi ingen påverkan på radiovågen.

Vertikal polarisation inducerar vertikal ström i träden. Träden är högre än de är breda. Därför induceras mer vertikal ström än hori-

sontell ström så länge trädets diameter understiger en halv våglängd.

Av diagrammet ser vi att vertikal polarisation dämpas mer än horisontell polarisation upp till ca 2 GHz (halv våglängd = 8 cm).

Över 1 GHz kommer trädets grenverk och löv att fungera som ett nät. Radiovågen får små möjligheter att ta sig igenom.

Det händer flera saker med radiovågen när den går genom skog:

Radiovågen dämpas

Det induceras ström i träden. Träden är resistiva. Då blir det varmt. Denna värme tas från radiovågen. Därför dämpas radiovågen.

Radiovågen återutstrålas

När vi får ström uppstår strålning. Radiovågen återutstrålas.

På TV-frekvenser (200– 800 MHz) är en del av den radiovåg som tar sig igenom skogen återutstrålad. Om det blåser så att träden vajar är reflexpunkterna i rörelse. Detta ger ibland försämrad bildkvalitet.

Radiovågen fördröjs. Den går inte med ljushastigheten när rymden består av luft blandat med träd. Det blir interferens mellan olika delvågor och även detta uppfattas som dämpning av radiovågen.

Strömmen i träden innebär att radiovågorna som återutstrålas sprids åt alla håll. På detta sätt kan radiovågor nå till platser som egentligen skulle legat i radioskugga. Detta gäller dock bara vid låg frekvens. Vid 900 MHz mobiltelefoni överväger dämpningen.

Vegetationsdämpning vid mobiltelefoni

Diagrammet visar dämpningen när signalen går genom 100 m skog. Hur utbreder sig egentligen signalen?

Om du går in i skogen med din ficktelefon kan du räkna med att signalen efter kanske 100 meter har slingrat sig upp genom träden och därefter går i det fria området över trädhöjd. Diagrammet ger därför en ungefärlig bild av skillnaden mellan att gå ut på ett stort kalhygge respektive att gå in bland träden med sin ficktelefon.

Om skogen ger en tillsattdämpning på 10 dB vid 450 MHz, så kan man räkna med att tillsattdämpningen blir 20 dB vid 900 MHz och 30 dB vid 1800 MHz.

Denna extra dämpning uppstår i ficktelefonens omedelbara närhet, de närmaste 100 meterna runt ficktelefonen. Vi måste därför även addera den normala sträckdämpningen fram till basstationen, en dämpning som ökar med 6 dB när frekvensen fördubblas.

Vegetationsdämpning vid 12 GHz

För några år sedan skaffade en granne parabol för att se på satellit-TV. Han monterade parabolen på skorstenen, men fick bara brus.

Naturligtvis hämtade han mig, antenn-experten. Jag kontrollerade inriktning, mätte spänning till mikrovågshuvudet m m men fann inga fel.

Dagen efter, på söndag, var det inte längre jag utan den andre grannen som gällde. Han hade motorsåg. Detta var i maj, och 10 meter framför parabolen stod en ännu ej utslagen björk. Jag försökte förmå honom att vänta till måndag och kontrollera att satellitmottagaren verkligen fungerade innan han fällde skogen. Men nej, björken skulle ner. Och när björken var fälld hade han perfekt bild.

TV-signalen från satelliten är FM-modulerad. Detta innebär att skillnaden mellan bara brus och perfekt TV-bild inte är särskilt många dB. Han kanske bara hade 6 – 10 dB dämpning av signalen när den gick genom björken, men detta kan ha räckt för att hamna under bruströskeln.

28 GHz eller 40 GHz i accessnätet

Det finns frekvensband runt 28 GHz och 40 GHz som är avsedda för telekommunikation till abonnenter, ersättning av koppartråden från telestationen. Användningsområdet kan vara dubbelriktad telefoni och datakommunikation, och enkelriktad TV/video.

Kostnaderna att lägga nytt kabelnät, t ex optokabel är störst i villaområden där det är glest mellan husen. Här är behovet störst av radiolösningar. Men samtidigt är risken störst att här finns höga träd, vegetation, som omöjliggör den fria sikt som är nödvändig för kommunikation vid 28 GHz och 42 GHz.

De antenner som används vid 28 GHz eller 42 GHz har hög antennvinst. Antennloben är smal. Därför måste antennen sitta still, den får inte gunga eller vrida sig i blåsten. Detta ställer krav på mekanisk stabilitet hos eventuella antennmaster.

Även tekniskt avancerad radioutrustning kan idag produceras till låg kostnad om volymerna är stora. Men man kan inte massproducera fri sikt. Kommer man i framtiden att förbjuda träd som är högre än takhöjd därför att de stör radiokommunikationen?

Fresnel-zon

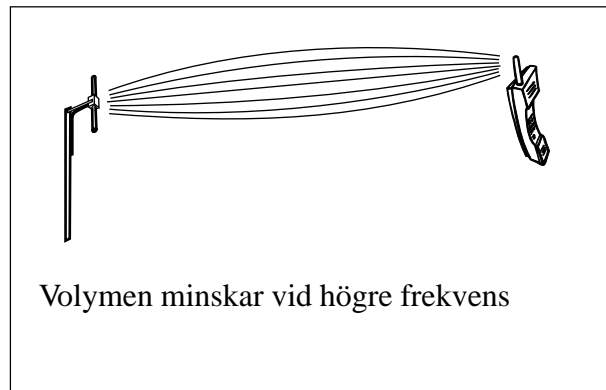
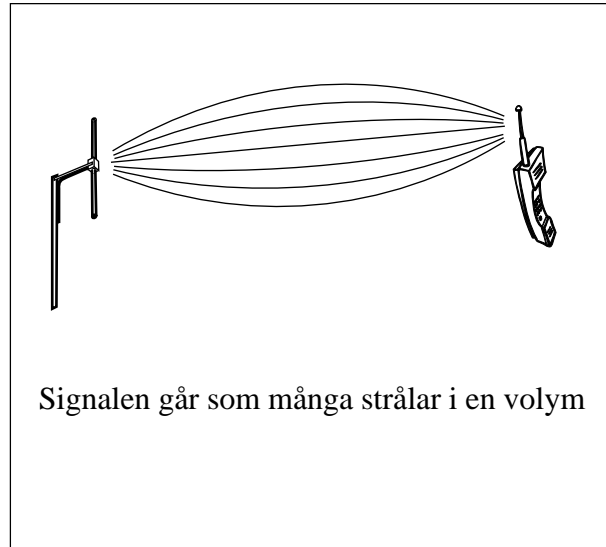
Mätresultat visar att radiosignalen ej kan betraktas som en smal stråle mellan sändar- och mottagarantennerna, utan måste ses som ett stort antal strålar som fördelar sig i volymen mellan antennerna. De strålar som i första hand bidrar till signal i mottagarantennen omfattar alla strålar som är upp till 0,5 våglängder längre än mittstrålen. Den yta som begränsar denna volym kallas 1:a Fresnel-zonen.

Observera att denna volym inte har något med antennens riktningsdiagram att göra. I stället för att rita ett smalt streck mellan antennerna och säga att signalen går "i strecket" bör man därför rita en cigarrformad ellipsoid som begränsas av 1:a Fresnel-zonen och säga att signalen går i denna volym.

Fri sikt

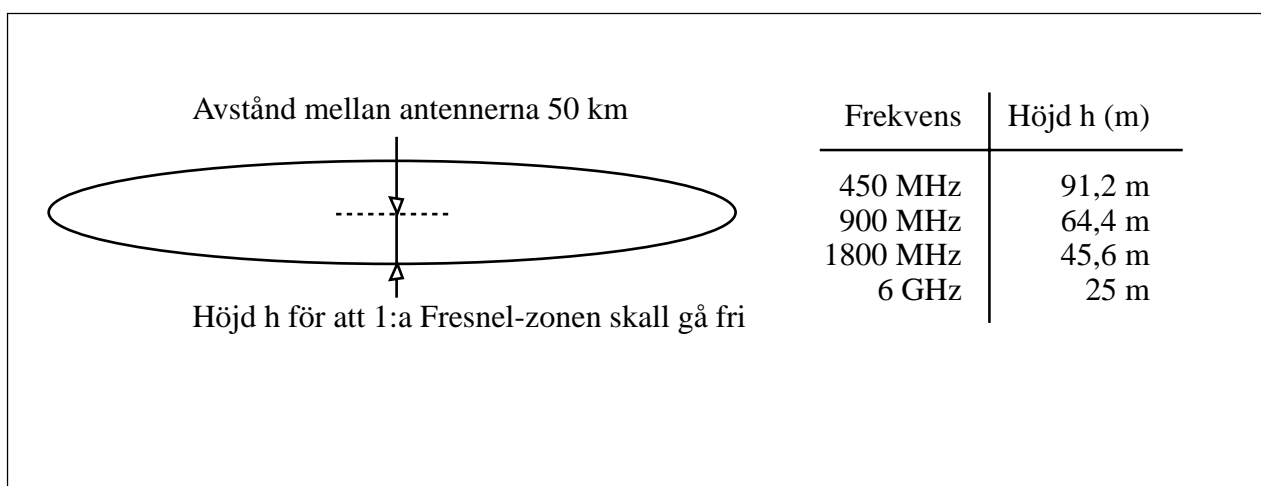
Fri sikt innebär att hela 1:a Fresnel-zonen skall vara fri från avskärmande föremål. När man bygger radiolänkar räcker det alltså inte att sätta antennerna så högt att man ser från ena antennen till den andra. Antennerna måste sitta så högt att hela 1:a Fresnel-zonen går fri över marken, se figuren.

Om antennerna sitter så att det precis är fri sikt mellan antennerna kommer bara strålar i "halva cigarren" att komma fram. Halva antalet strålar innebär halva mottagna signalspänningen, dvs 6 dB lägre signal än om hela 1:a Fresnel-zonen är fri.



Hög frekvens – mindre diameter

Ju högre frekvens, ju kortare våglängd, desto smalare blir "cigarren".



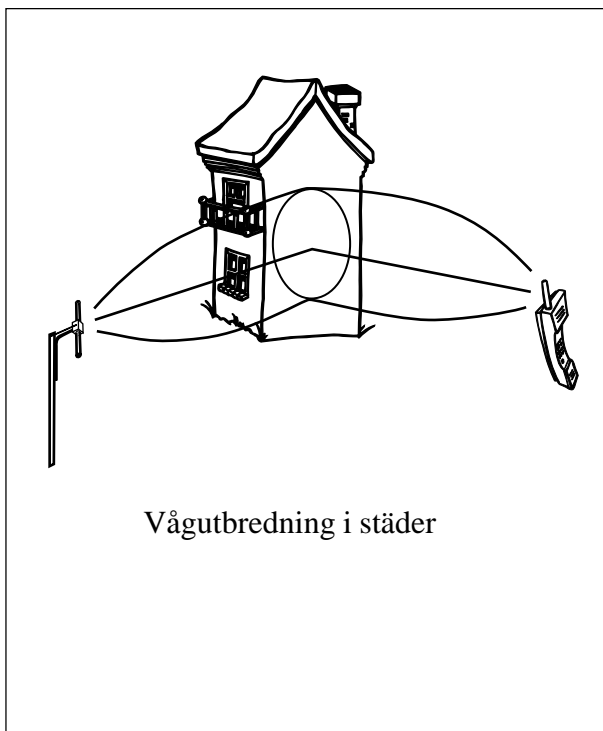
Om hela 1:a Fresnel-zonen når fram

För att "fri rymd-utbredning" skall gälla är villkoret att hela 1:a Fresnel-zonen når fram till mottagarantennen. Hög frekvens har lättare att ta sig in i byggnader därför att större del av 1:a Fresnel-zonen slinker in genom öppningar som fönster och liknande.

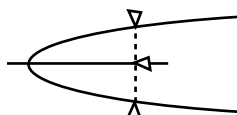
Gäller även vid reflexion

Om man studerar vad som händer vid reflexion får man det förbluffande resultatet att om hela 1:a Fresnel-zonen reflekteras, så utbreder sig signalen som om det vore fri sikt. Detta resultat erhålles om man betraktar den reflekterande ytan som en mottagarantenn med antenntytan lika med den reflekterande ytan, kopplad till en sändarantenn med motsvarande antennvinst (passiv repeterare).

Konsekvensen av detta är att om signalen träffar en reflekterande yta, t ex en husvägg klädd med metall, och ytan är så stor att hela 1:a Fresnel-zonen reflekteras, sker ingen dämpning utan signalen utbreder sig som om det vore fri sikt mellan antennerna. Detta gör att högre frekvens, t ex 1800 MHz, utbreder sig lättare i städerna. Den reflekterar sig fram och klarar sig med mindre reflekterande ytor än 900 MHz och 450 MHz.



1:a Fresnel-zonens diameter i närheten av någon av antennerna



Frekvens	diameter	
	avstånd 10 m	avstånd 100 m
450 MHz	2,6 m	8,2 m
900 MHz	1,8 m	5,8 m
1800 MHz	1,3 m	4,1 m
6 GHz	0,7 m	2,2 m
28 GHz	0,3 m	1 m

Verklig vågutbredning

Ett intressant specialfall får man vid fri sikt med kort reflex:

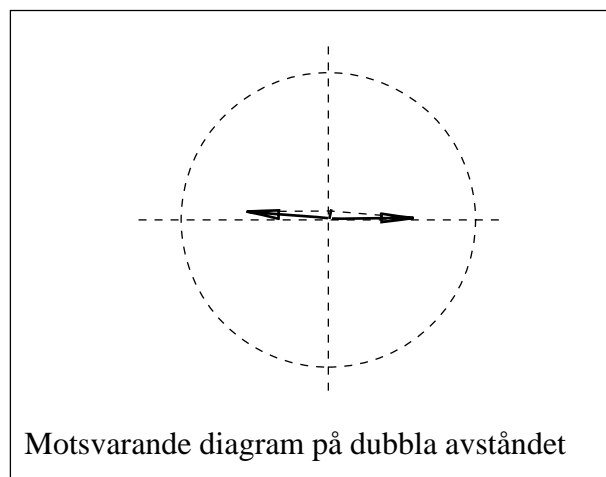
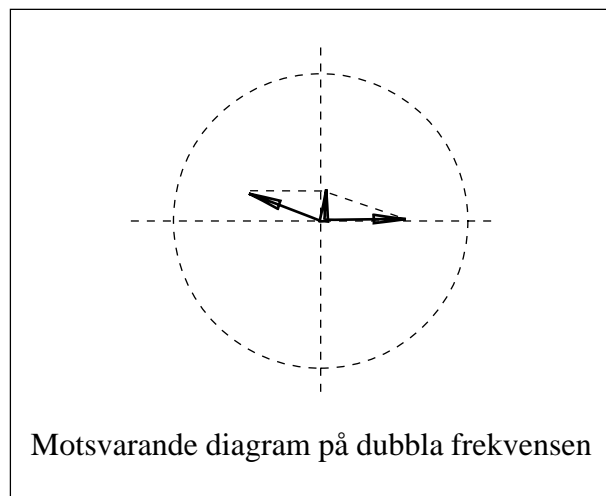
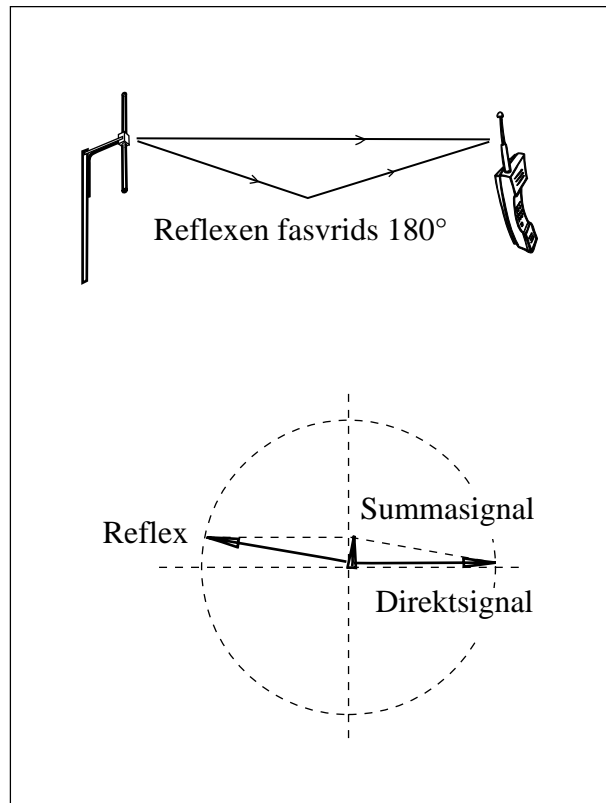
- När vertikal polarisation reflekteras mot marken vrids fasan 180° . Denna fasvridning får vi när polarisationen är vinkelrät mot spegelplanet. Vi får alltså ingen fasvridning när vertikal polarisation reflekteras i väggarna (polarisationen parallell med väggen).
- Dessutom går reflexen aningen längre väg än direktsignalen, i detta exempel 3% av våglängden vilket ger 10° fasvridning. Visardiagrammet visar de spänningar som de båda signalerna alstrar i mottagarantennen. Summasignalen blir i detta fall svag eftersom signalerna nästan ligger i motfas.

Utbredning vid dubbla frekvensen

Vid dubbla frekvensen men samma avstånd mellan basstation och ficktelefon kommer direktsignal och reflex att alstra hälften så stora spänningar (-6 dB) i mottagarantennen (halva antenntytan). Men eftersom våglängden är hälften så lång ger samma vägskillnad 20° fasvridning hos reflexen. Summaspänningen och därmed även P_m blir lika stor som vid halva frekvensen. Vi har alltså utbredning där mottagen effekt inte påverkas av frekvensen! Men observera att detta bara gäller under mycket speciella förutsättningar: Vertikal polarisation reflekterad mot marken och en våglängd som är så lång att vägskillnaden mellan reflex och direktsignal är mindre än ca 30° . Rundradiosändarna (TV och FM-radio) använder horisontell polarisation där man inte får 180° fasvridning vid reflex i marken. I detta fall summeras reflex och direktsignal nästan i fas till dubbla summaspänningen.

Samma frekvens men dubbla avståndet

Spänningsvektorerna för direktsignal och reflex minskar till hälften (-6 dB) vid dubbla avståndet. Men samtidigt kommer vägskillnaden mellan reflex och direktsignal att minska till hälften (när "basen" i triangeln görs dubbelt så lång) och detta innebär att vinkeln minskar till 5° . Därför sjunker summaspänningen till 25% (-12 dB) vid dubbla avståndet. Summasignalen avtar med r^{-4} .



Uppmätta värden

Mätningar vid 450 MHz, 900 MHz och 1800 MHz mobiltelefoni visar att mottagna effekten P_m minskar med ökande frekvens, normalt med minst -6 dB vid dubblering av frekvensen.

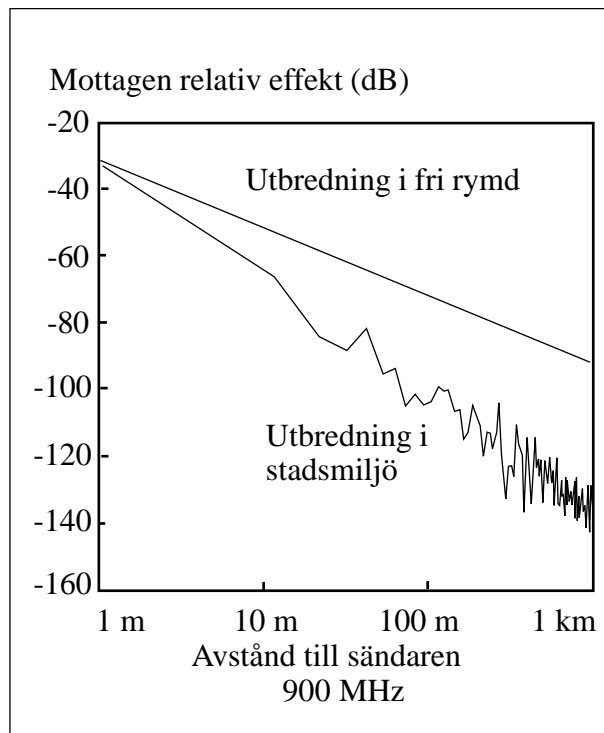
Diagrammet här intill visar exempel på hur P_m kan minska med avståndet vid utbredning i stadsmiljö på 900 MHz.

Utbredning i fri rymd beskrivs av (jfr kapitel 5):

$$P_m = \frac{P_s}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \cdot r^{-2}$$

En rät linje som följer kurvan "utbredning i stadsmiljö" får man med följande uttryck:

$$P_m = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \cdot r^{-3,5}$$



- Utbredning i fri rymd:

P_m proportionell mot r^{-2}

$$L_b[dB] = -32,4 - 20 \log r[km] - 20 \log f[MHz]$$

- Utbredning i typisk stadsmiljö:

P_m proportionell mot $r^{-3,5}$

$$L_b[dB] = -32,4 - 35 \log r[km] - 20 \log f[MHz]$$

Vilka räckvidder kan man få i typisk stadsmiljö?

Om vi tillämpar den nya formeln för L_b får vi följande räckvidd (jfr kapitel 5):

Radiosystem	GSM	DECT
Sändareffekt	2 W +3 dBW	250 mW -6 dBW
mottagarkänslighet	-134 dBW	-116 dBW
antennvinst sändarantenn	+2,15 dBi	+2,15 dBi
antennvinst mottagarantenn	+2,15 dBi	+2,15 dBi
Högsta värde på L_b	-141,3 dB	-114,3 dB
Räckvidd i fri rymd	309 km	6,9 km
Räckvidd i typisk stadsmiljö	26,5 km	3 km

Mobiltelesystemen påverkas mest

Vid lång räckvidd i fri rymd, som hos GSM-systemet, kommer den ändrade lutningen hos utbredningskurvan att innebära stor skillnad i dB. Detta ger en avsevärd minskning av räckvidden. Vi ser att basstationen når 309 km i riktningar snett uppåt, medan räckvidden bara är ca 25 km snett nedåt, i staden, det område man vill täcka.

Överräckvidder i fria riktningar ger störningsproblem

Den långa räckvidden i fria riktningar innebär att signalen kan nå in i avlägsna celler och där skapa störningsproblem.

DECT-systemet inte lika påverkat

Om räckvidden är kort även vid fri rymd kommer den ändrade lutningen hos utbredningskurvan inte att innebära så mycket.

Dämpning vid passage genom väggar

När radiosignalen går genom väggar, antingen för att ta sig in i byggnaden (GSM) eller ta sig mellan rummen inne i byggnaden (DECT) dämpas signalen olika beroende på hur mycket metall som finns i väggen. Typiska värden ligger i området 6 – 20 dB, eller ännu mer.

Fädningsmarginal som skydd mot kort reflex

Vid korta reflexer som kommer i motfas minskar den mottagna signalen. Då behövs marginaler. Därför överdimensioneras radio-utbredningen, så att man har marginaler för signalstyrkevariationerna (fädningen).

DECT: ett exempel

Radiosystem	DECT
Högsta värde på L_b	-114,3 dB
Dämpning i vägg	-20 dB
Fädningsmarginal (korta reflexer)	-20 dB
Typisk räckvidd inomhus	69 m

9 — RADIOKOMMUNIKATION, PROBLEM

- När vi har byggt basstationer och har radiotäckning, när det finns signal, men kommunikationen ändå inte fungerar, **DÅ HAR VI PROBLEM!**

Hittills har vi behandlat hur mycket signal som kommer fram till mottagaren. Är detta något problem? Egentligen inte. Frågeställningen har inskränkt sig till ”— finns signal?” eller ”— finns ingen signal?”

Om det inte finns någon signal är svaret enkelt. Då måste vi fixa signal på något sätt. Höja sändareffekten, skaffa antenner med högre antennvinst, eller bygga en basstation med bättre läge ur radiosynpunkt. Detta är egentligen inget problem.

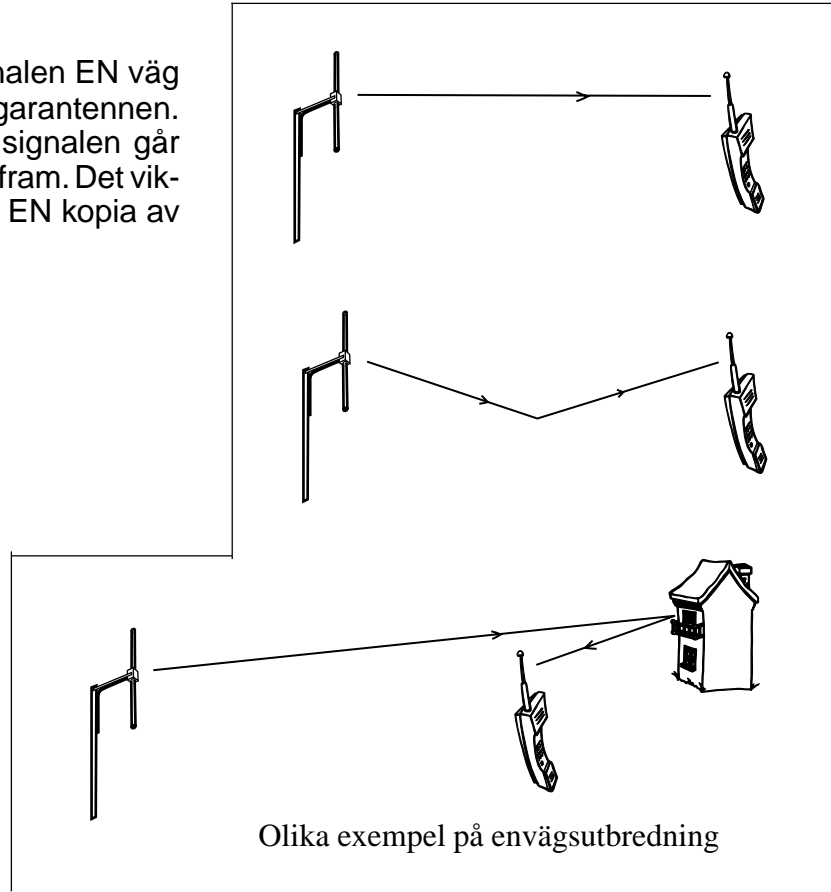
Vad vi nu skall komma in på är när det finns signal, för det är då problemen börjar.

Normalfallet är nämligen inte att signalen kommer fram som EN signal, utan att signalen kommer fram som MÅNGA signaler, som dessutom inte kommer fram samtidigt utan lite tidsförskjutna. Och detta ger problem, verkliga problem.

Envägsutbredning

Vid envägsutbredning går signalen EN väg från sändarantennen till mottagarantennen.

Det spelar ingen roll om signalen går raka vägen eller reflekterar sig fram. Det viktiga är att mottagaren bara får EN kopia av den utsända signalen.

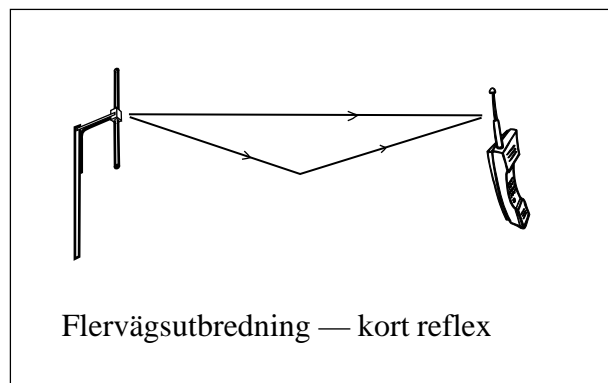


Flervägsutbredning

Vid flervägsutbredning får mottagaren två eller flera kopior av den utsända signalen. Om kopiorna gått olika lång väg kommer de inte fram samtidigt.

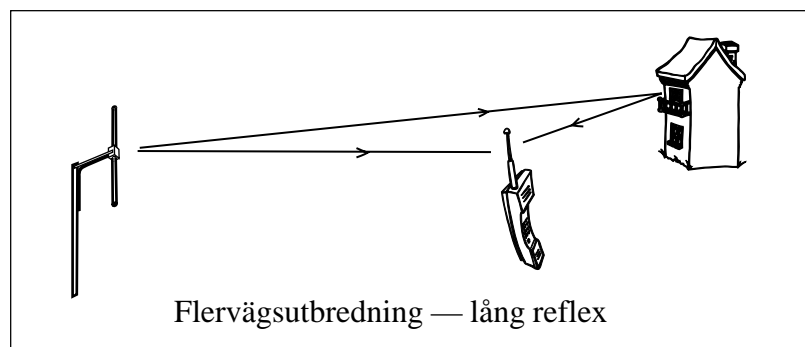
Kort reflex

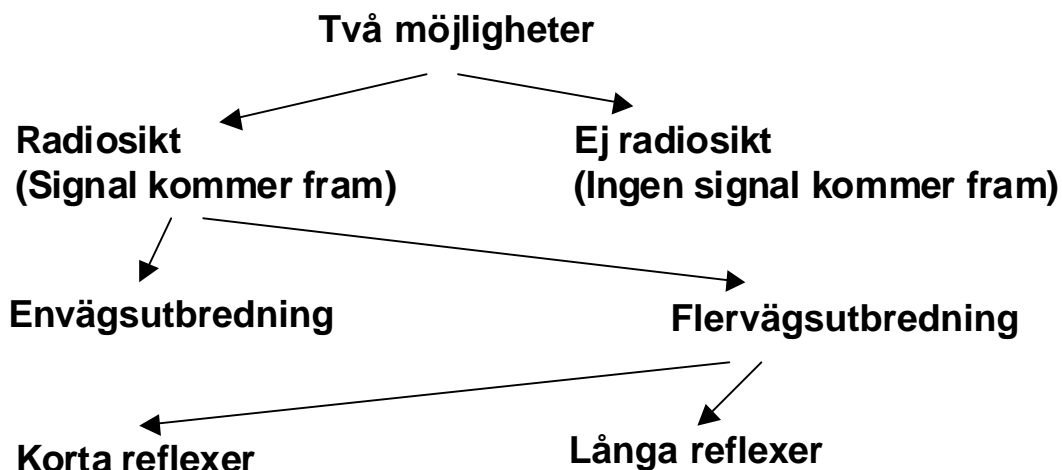
Om skillnaden i gångtid mellan huvudsignalen och ekot är så kort att båda signalerna tycks innehålla samma information, då är ekot en kort reflex.



Lång reflex

Om skillnaden i gångtid mellan huvudsignalen och ekot är så lång att signalerna inte innehåller samma information, dvs om det "ekar", då är ekot en lång reflex.





Vid korta reflexer kan summasignalen från mottagarantennen variera kraftigt och ibland försvinna helt.

I analoga system får man trafikavbrott som är lika långa som signalbortfallet.

I digitala högkapacitetsradiolänkar kan man få breddning av avbrottet p g a att mottagarmodemet tappar synk. Digitala mobiltelesystem utnyttjar inte fasriktig detektering som behöver synkroniseras. Därför slipper man breddningen i trafikavbrottet.

Långa reflexer gör att informationen kommer fram flera gånger men med så stor fördröjning att man uppfattar ekon.

I analoga system får man t ex skuggbild på TV.

I digitala system går databitarna in i varandra, intersymbolinterferens (ISI).

Vad gör man åt korta och långa reflexer?

Analoga system

I analoga system kan flervägsutbredning (korta och långa reflexer) inte åtgärdas i radiomottagaren. Man använder något av följande:

- Väljer lämplig antenn för att slippa reflexer.
- Växlar mellan två antenner och väljer den som lämnar "bästa" signalen.
- Växlar mellan två kompletta radiosystem som arbetar på olika frekvenser.

Digitala system

I digitala system finns möjlighet att åtgärda flervägsutbredning i själva radiomottagaren. Nackdelen är vanligtvis tidsfördröjning.

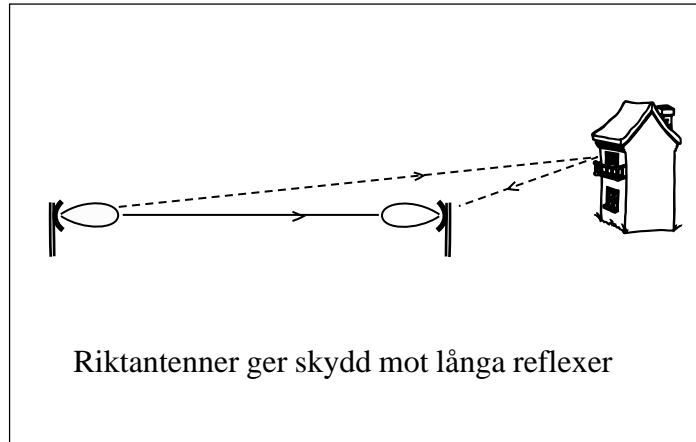
- Man sänder samma databit vid två olika tillfällen och hoppas reflexerna förändras under tiden. Denna metod ger tidsfördröjning.
- Man sänder samma databit på flera olika frekvenser. Detta behöver inte ge tidsfördröjning.
- Genom databearbetning kan man utnyttja både direktsignalen och ekon. Detta kan ge säkrare mottagning än om ekon inte fanns.

Analoga system

Riktantenn skyddar mot långa reflexer

För att ekofördröjningen skall bli lång måste signalen ha reflekterats långt ut åt sidan eller bakom en av antennerna.

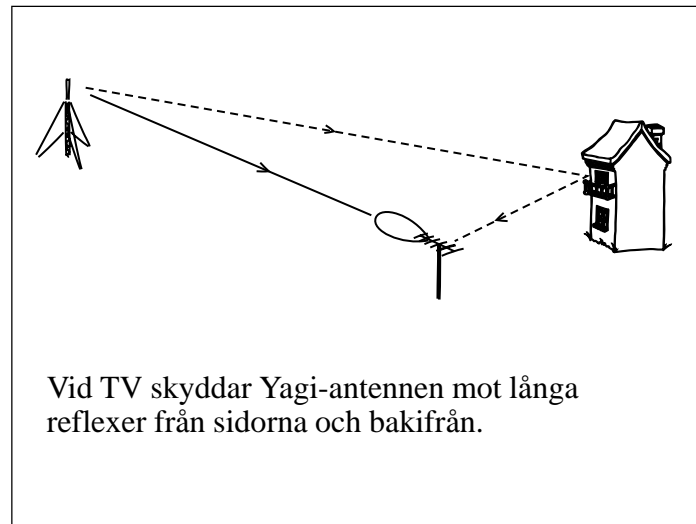
Radiolänk använder parabolantenner, riktantenner som bara sänder och tar emot i en smal sektor rakt fram. Det finns därför ingen risk för långa reflexer vare sig från sidan eller bakifrån vid radiolänk.



Vid TV använder sändarstationen rundstrålande antenn eftersom sändningarna skall vara yttäckande. Men som mottagarantenn används Yagi-antenn, oftast inte för att signalen är för svag, utan för att undertrycka långa reflexer från sidorna och bakifrån.

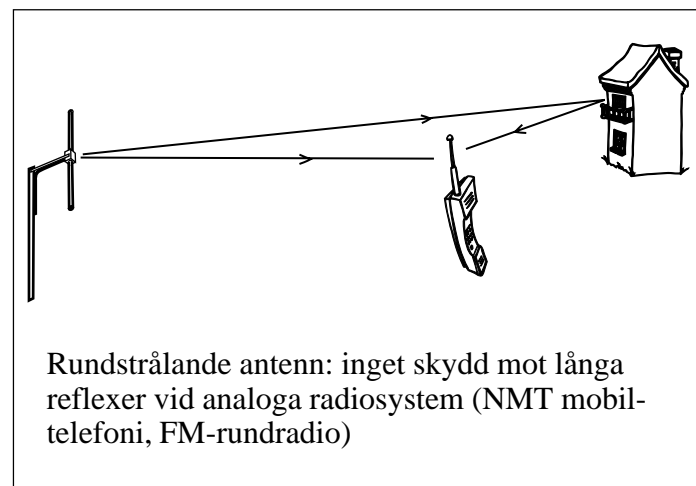
Fortfarande finns möjlighet att få långa reflexer mot berg eller byggnader på motsatta sidan av TV-sändarmasten. Nära TV-sändarmasten kan mottagarantennen hamna under TV-sändarantennens antennlob som är rund men "platt", pannkaksformad. Då kan direktsignalen bli svag och ekon från andra sidan TV-masten bli störande.

Enda sättet att bli av med ekon som kommer från samma riktning som den önskade signalen är att sänka mottagarantennen och hoppas att byggnader och vegetation dämpar ekona mer än direktsignalen.



Rundstrålande antenner

Det går inte att göra något åt långa reflexer vid analoga radiosystem som använder rundstrålande antenn. Lång reflex ger ekoeffekt eller distorsion. Detta har du hört på bilradion, FM-mottagning, när du stannat för rött ljus och fått distorderat ljud. (Vid kort reflex försvinner signalen, du får brus. Lång reflex ger distorsion på FM-radion och skuggbild på TV.)



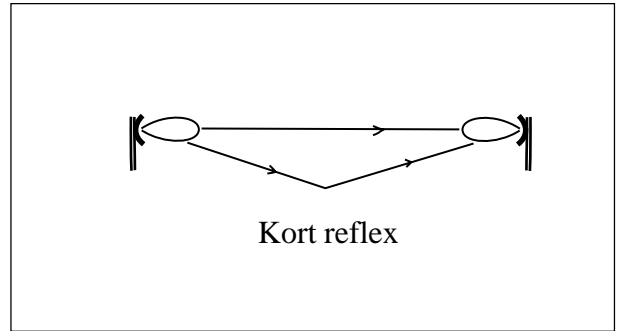
Kort reflex

Riktantenn hjälper inte mot kort reflex.

Man kan försöka sätta antennerna på sådan höjd att huvudsignal och eko hamnar i fas, adderas. Men temperaturfördelningen i luften gör att huvudsignalen inte går "exakt rakt" utan något böjt. Och denna böjning ändras med annan temperaturfördelning i luften.

Vid reportagelänkar för TV, t ex vid idrottsevenemang, åker man ut på morgonen och sätter upp länken och trimmar till perfekt bild. Hur ofta händer det inte att bilden är dålig på eftermiddagen. Luften är uppvärmd och orolig.

Ett sätt som blir allt vanligare för att undvika dessa problem är att rikta antennen mot himlen och upprätta ett länkhopp via satellit. Även korta avstånd, från Stockholms innerstad till Kaknästornet, körs idag via satellit.



Diversitet

Med diversitet menas att det finns flera olika kommunikationsvägar för signalen, och man väljer den väg som går bäst.

Frekvensdiversitet

Två radiolänkar i olika frekvensband, som använder samma antenner, får inte avbrott samtidigt på båda frekvenserna (olika våglängd ger olika fasskillnad på reflexerna).

När signalen försvinner på ena radiolänken växlar man till den andra. Sannolikheten är stor att där finns signal.

Rumsdiversitet (rymd-diversitet)

Genom att använda två mottagarantennor kan man välja den antenn som ger signal. I detta fall har direktsignalerna gått ungefär lika lång väg, men det har inte reflexerna.

Vinkeldiversitet

Genom att förse mottagarantennen med dubbla matarhorn, jfr satellitantenn för flera satellitpositioner, kan man välja mellan två antennlobor med olika amplitudförhållanden mellan direktsignal och reflex. Om direktsignal och reflex är lika starka och i motfas på ena matarhornet, så är de inte lika starka på andra matarhornet.

Diversitet vid mobil- telefoni

Mikrodiversitet

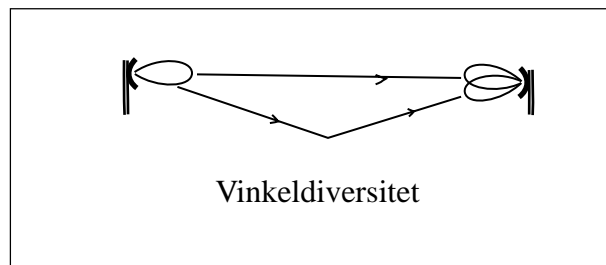
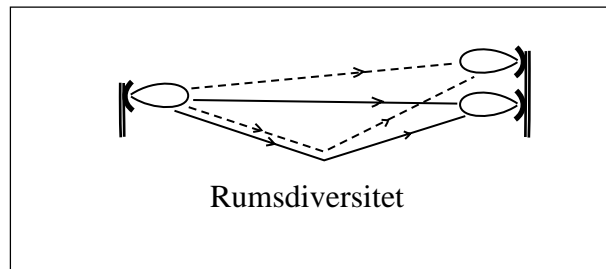
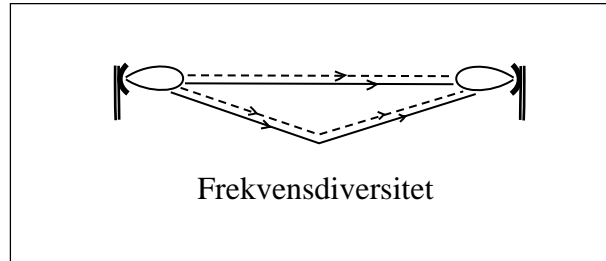
Med mikrodiversitet menas att man kopplar om förbindelsen, t ex byter antenn (antenndiversitet) eller byter bärvågskanal (frekvensdiversitet), men ligger kvar på samma basstation.

Makrodiversitet

Med makrodiversitet menas att man kopplar över samtalet till annan basstation.

Antenndiversitet

Under begreppet antenndiversitet inryms såväl rumsdiversitet, vinkeldiversitet som



polarisationsdiversitet. Dessa metoder är inte likvärdiga utan ger olika skydd beroende på den reflekterande geometrin.

Antenndiversitet ger skydd mot korta reflexer och samtidigt visst skydd mot långa reflexer eftersom man försöker hålla direktsignalen så stark som möjligt.

Frekvensdiversitet

Frekvensdiversitet kan vara att byta frekvens mellan varje datapaket för att skapa en "föränderlig" transmissionskanal, så man inte förlorar flera datapaket i följd. Felrättningskoderna i GSM kräver en föränderlig transmissionskanal.

Frekvensdiversitet kan även vara att byta frekvens när det går dåligt. Byta till annan frekvens på samma bas.

10 — VÄXELSPÄNNING

- Hela radiotekniken består av växelspanningar — eller växelströmmar.

Växelspanning är spänning vars amplitud varierar när tiden ändrar sig.

Växelström är ström vars styrka varierar när tiden ändrar sig.

$$V(t)$$

$$I(t)$$

Spänningen och strömmen ändrar sig i tiden, de är funktioner av tiden.

Man kan alstra växelspanningen genom att vrida på spänningsratten till ett likspänningsaggregat, i takt med växelspanningens amplitudändring.

Vi är vana att avbilda växelspanningen som funktion av tiden. Det är så vi ser växelspanningen på en oscilloskopskärm.

Det finns ytterligare ett sätt

Men växelspanningen kan alstras på ytterligare ett sätt: Genom att lägga ihop många sinusformade växelspanningar med olika amplitud, frekvens och fas, kan vi också åstadkomma exakt samma växelspanning.

När växelspanningen skall beskrivas på detta sätt måste vi tala om vilka frekvenser de ingående sinusspanningarna har. Växelspanningen beskrivs som funktion av frekvensen f , eller vinkelfrekvensen ω .

$$V(f)$$

$$V(\omega)$$

$$I(f)$$

$$I(\omega)$$

Nu finns ingen anledning att blanda in tiden. Sinusspanningarna klarar sig själva. De varierar på det sätt som bestäms av frekvensen.

Frekvensspektrum

Att beskriva växelspanningen som funktion av frekvensen kallas växelspanningens frekvensspektrum.

Hoppa mellan tidplanet och frekvensplanet

Båda dessa sätt att beskriva signalen är matematiskt korrekta. Vi omvandlar från ena presentationen till andra genom Fouriertransformen.

Varför? Behöver vi två sätt?

Ja, vi behöver olika sätt att se växelspanningen.

- Om vi matar signalen genom en förstärkare som begränsar toppspänningen, klipper topparna, då måste vi beskriva växelspanningen på tidsaxeln.
- Om vi matar signalen genom ett filter, då vill vi beskriva växelspanningen på frekvensaxeln.

Vi måste vänja oss vid att hoppa mellan tids- och frekvenspresentation av växelspanningen. Och komma ihåg att vi inte kan göra någon förändring i tiden när signalen presenteras på frekvensaxeln. Där får inget hända.

Vi kan inte starta eller stoppa spänningen. Detta måste ske på tidsaxeln. Sedan får vi räkna om till frekvensaxeln.

Att stoppa växelspanningen så att amplituden avklingar mot noll är inte samma sak som att alla frekvenskomponenter försvinner. Stoppet kommer i sig själv att alstra frekvenskomponenter. Vilka frekvenskomponenter som skall finnas beror bl a på hur snabbt vi stänger av spänningen.

Växelspänning

En spänning vars amplitud är konstant i tiden kallas likspänning. En spänning vars amplitud ändrar sig i tiden kallas växelspänning.

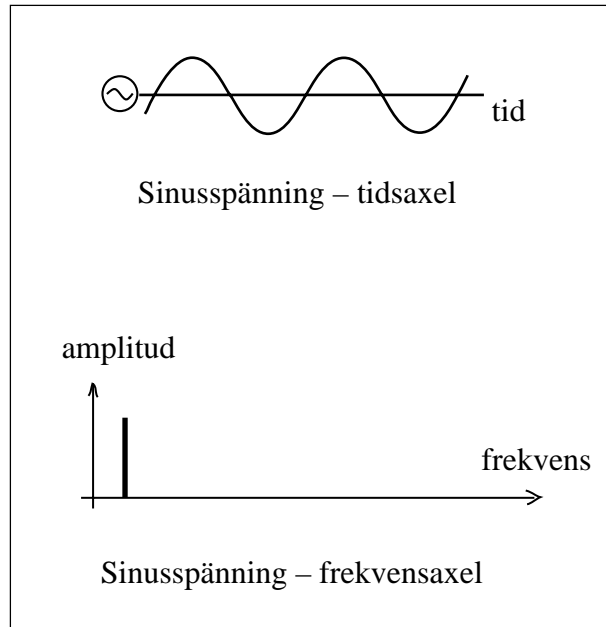
Likspänningar är positiva eller negativa och har viss amplitud. Detta karakteriserar alla olika typer av likspänningar.

Det gemensamma för alla olika växelspänningar är att amplituden ändrar sig i tiden. Vi börjar med den viktigaste växelspänningen: sinusspänning.

Sinus-spänning

Växelspänningen från en växelspänningsgenerator, t ex generator i kraftverk, ändrar sig så att amplituden uppritad på en tidsaxel följer sinuskurvan. Sinusspänningen karakteriseras av amplitud (t ex 308 V toppvärde) och periodtid (t ex 20 ms) eller som man vanligen uttrycker sig: perioder per sekund (t ex 50 Hz).

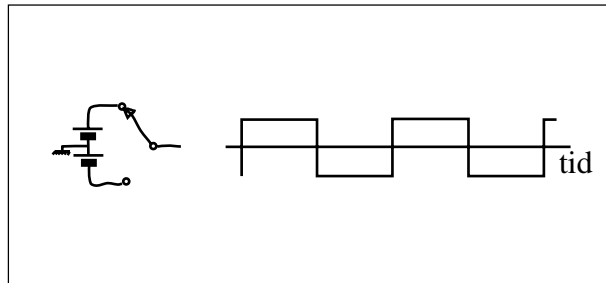
Figuren visar två olika sätt att åskådliggöra samma sinusspänning: antingen uppritad på tidsaxeln — eller på frekvensaxeln.

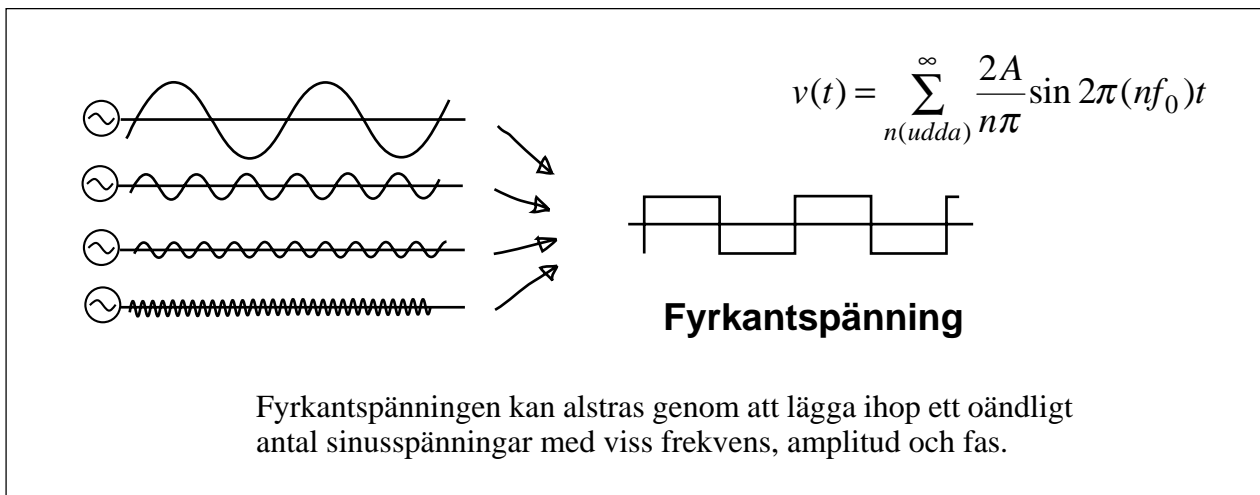


Fyrkantspänning

Fyrkantspänning kallas växelspänningen när den växlar mellan två likspänningsnivåer. Bilden visar en fyrkantspänning som växlar mellan lika stor positiv och negativ spänning och har lika lång positiv som negativ halvperiod.

Fyrkantspänningen är extra intressant därför att ettor och nollor transporteras inuti datorn som olika likspänningsnivåer, som en sorts fyrkantspänning.





$$v(t) = \sum_{n(\text{udda})}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin 2\pi(nf_0)t$$

Fyrkantspänning

Fyrkantspänningen kan alstras genom att lägga ihop ett oändligt antal sinusspänningar med viss frekvens, amplitud och fas.

Fourier-transform

Fransmannen J.B.J. Fourier kom fram till att det går att alstra vilken växelspanning som helst genom att lägga ihop ett antal (ändligt eller oändligt antal) sinusspänningar, där varje sinusspänning har sin speciella amplitud och fas, och frekvensen är en multipel av en viss grundfrekvens f_0 .

Två sätt att alstra fyrkantspänningen

Exakt samma fyrkantspänning som när man växlar mellan två batterier får man alltså genom att lägga ihop spänningarna från ett oändligt antal sinus-generatorer med frekvenserna f_0 , $3f_0$, $5f_0$, $7f_0$ osv. Fyrkantspänningen kan därför alstras på två olika men fullt likvärdiga sätt!

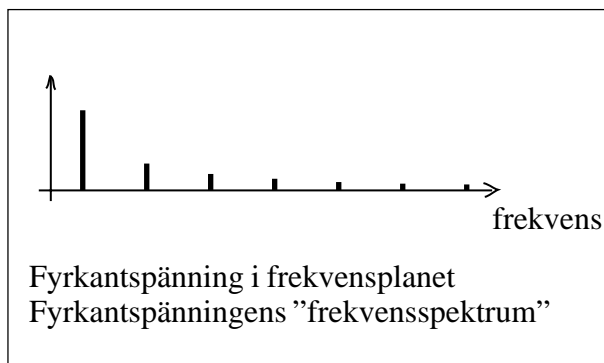
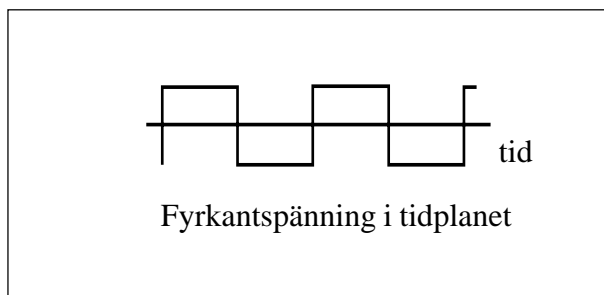
När fyrkantspänningen väl har alstrats kan ingen längre avgöra vilken metod vi använde: Växling mellan två likspänningar eller summering av oändligt antal sinusspänningar.

Två sätt att beskriva fyrkantspänningen

Om vi alstrar fyrkantspänningen genom att växla mellan två likspänningar är det naturligt att visa fyrkantspänningen på tidsaxeln.

Om vi alstrar fyrkantspänningen genom att lägga ihop alla sinusspänningarna är det naturligt att visa fyrkantspänningen på frekvensaxeln.

Men inget hindrar att vi alstrar fyrkantspänningen på ett sätt och visar den på andra sättet.



Talspänningen

När ljudvågorna påverkar membranet i mikrofonen bildas växelspanning som varierar i takt med ljudvågorna. Men exakt samma talspänning kan även alstras som summan av många sinusspanningar som inte ändrar amplitud, frekvens eller fas, sinusspanningar som är konstanta.

Talspänningen i tidplanet

På tidsaxeln kan vi rita upp hur talspänningen ändrar sin amplitud i tiden.

Talspänningen i frekvensplanet

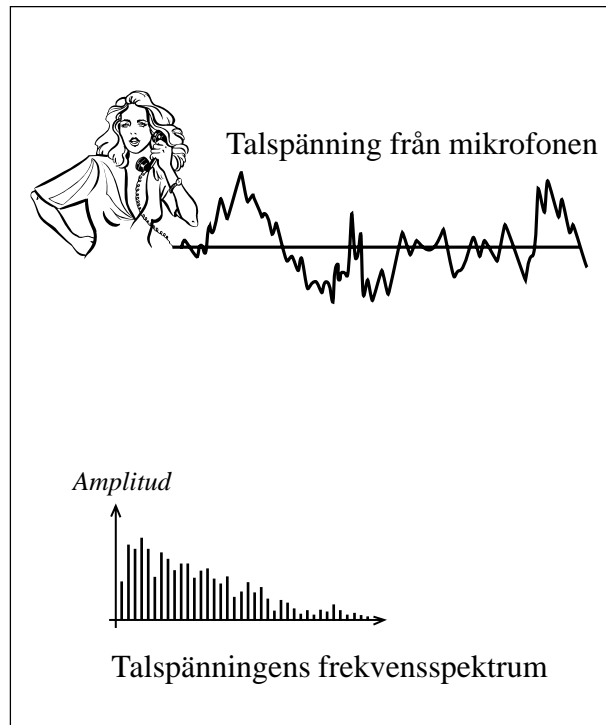
På frekvensaxeln kan vi rita de sinusspanningar som erfordras för att summan skall variera som talspänningen från mikrofonen. Denna bild kallas talspänningens frekvensspektrum.

I talspänningens frekvensspektrum finns sinusspanningar från ungefär 50 Hz till ca 10 kHz. Gränserna varierar något från individ till individ.

Smalare bandbredd

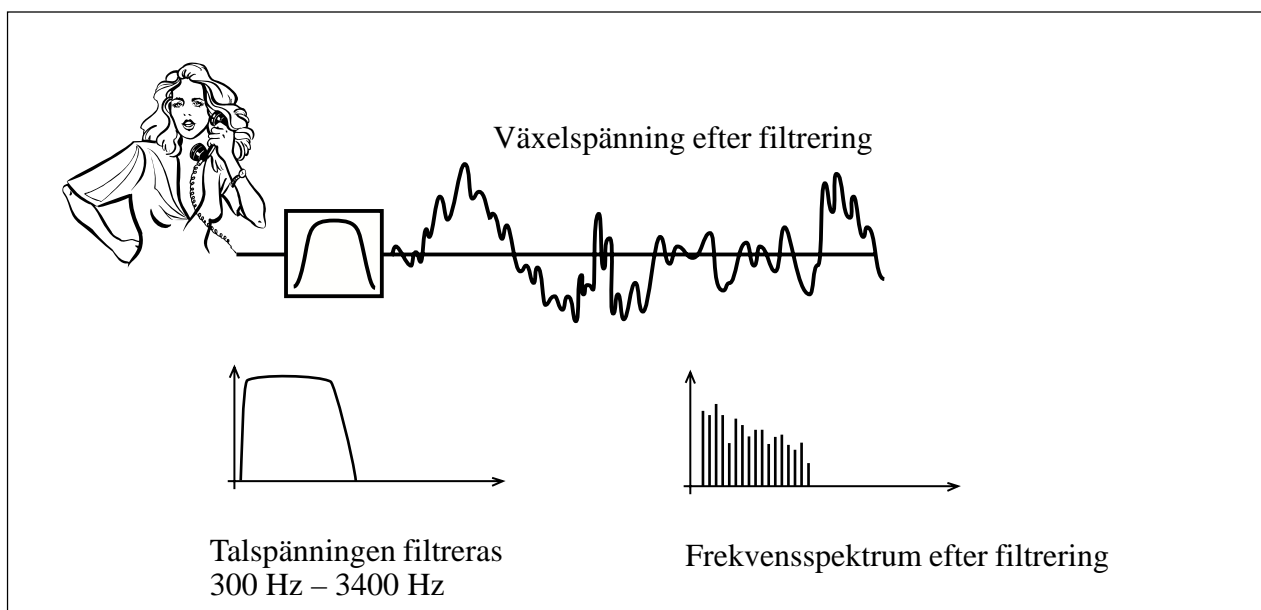
För att få plats med så många radiosändare som möjligt inom tillgängliga frekvensband måste man begränsa övre frekvensen i det frekvensspektrum som överförs.

Praktiska prov har visat att man oftast uppnår fullgod uppfattbarhet om man vid mobiltelefoni överför ett frekvensspektrum som sträcker sig upp till 3,4 kHz. Dessutom



sparar man sändareffekt om man tar bort frekvenser under 300 Hz. Därför matas talspänningen genom ett bandpassfilter som bara släpper igenom detta frekvensområde.

Den växelspanning man får efter filtret avviker något från den ursprungliga. Frånvaron av höga frekvenser gör spänningen "mer avrundad". Växelspanningen är ändå tillräckligt lik originalspänningen för att man skall känna igen vem som talar. Det kan vara svårt att höra skillnad mellan "f" och "s", men då får man fråga om.



11 — INFORMATIONSOVERFÖRING, MODULERING

- Den information vi vill överföra är växelspanning i ett visst frekvensområde.
- Den frekvens vi vill använda i vår radiosändare är oftast en helt annan frekvens.
Hur gör vi? Vilka olika möjligheter finns?

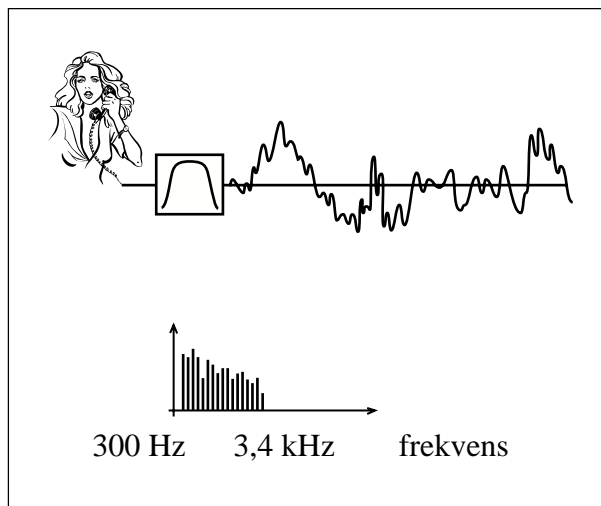
Informationen, nyttosignalen

Informationen, nyttosignalen vi önskar överföra, får representeras av den filtrerade talspänningen från mikrofonen. Signalens frekvensspektrum, de sinussignaler som behövs för att alstra signalen, sträcker sig från 300 Hz till 3,4 kHz.

Andra nyttosignaler har annat frekvensspektrum:

- TV-signalen, växelspanningen från TV-kameran, har frekvensspektrum 0 Hz – 5,5 MHz.
- Musik, stereosignalens frekvensspektrum, omfattar 30 Hz – 53 kHz (två kanaler).

På detta sätt kan varje nyttosignal presenteras med de sinusspanningar som behövs för att alstra växelspanningen. Detta utgör samtidigt nyttosignalens frekvensspektrum.

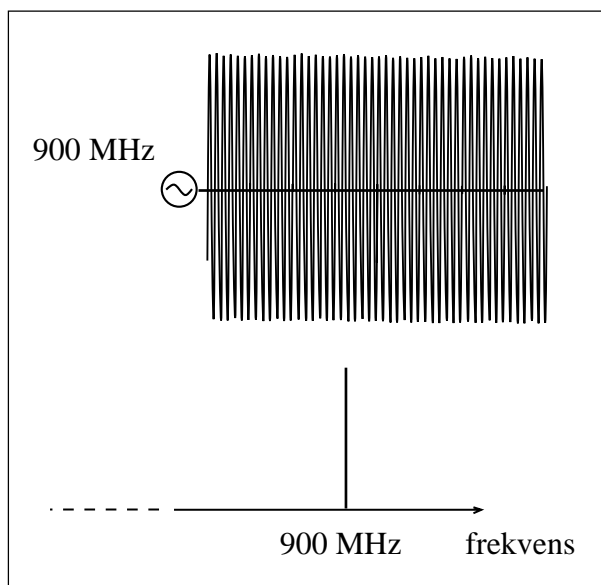


Bäraren, bärvåg

Radiosändaren alstrar en sinussignal med hög frekvens. Det är denna signal som matas till antennen och strålar ut som radiovågor.

Eftersom denna signal skall "bära" informationen kallas den bärvåg.

Bilden visar bärvågen på tidaxeln respektive på frekvensaxeln.



Modulering

Bärvågen innehåller ingen information (mer än att sändaren är igång). Vi vill att nyttosignalen påverkar bärvågen på sådant sätt att vi i radiomottagaren kan återskapa nyttosignalen. Denna process, att påverka bärvågen, kallas modulering. Nyttosignalen modulerar bärvågen.

Amplitud- eller frekvensmodulering

Nyttosignalen kan påverka bärvågen på två olika sätt:

- Bärvågens **amplitud** kan ändras i takt med nyttosignalen.
- Bärvågens **frekvens** kan ändras i takt med nyttosignalen.
- Det finns även **fasmodulering**, men detta är en variant av frekvensmodulering.

Amplitudmodulering

Bilden visar hur vi med en dämpsats mellan radiosändaren och antennen ändrar bärvågens amplitud i takt med nyttosignalen.

Är inte sinusformad

En signal som ändrar sin amplitud är inte sinusformad. För att skapa denna signal med sinusspänningar behövs många sinusgeneratorer.

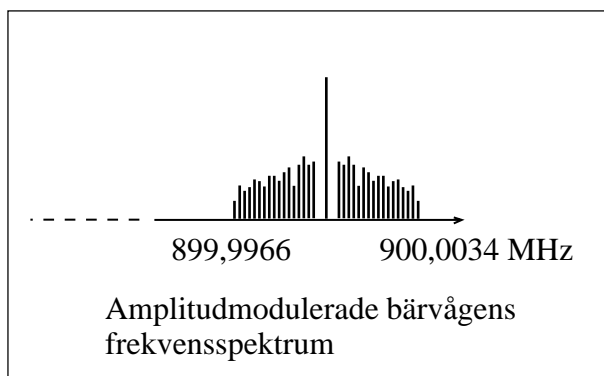
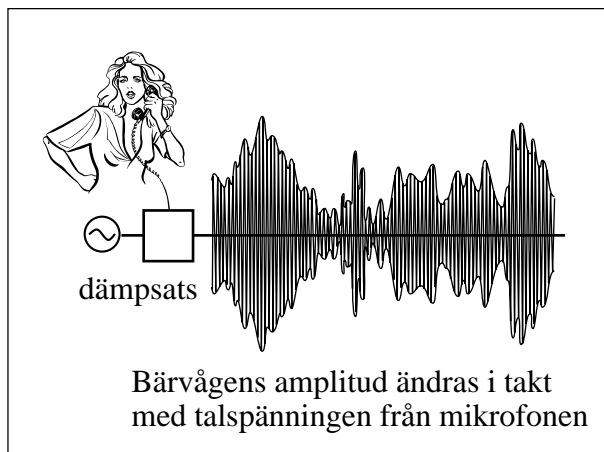
Frekvensspektrat visar vilka sinusspänningar som behövs för att skapa den amplitudmodulerade sändarsignalen. Förutom den ursprungliga bärvågen behövs sinusspänningar som är identiska med nyttosignalens frekvensspektrum, grupperade på båda sidor om bärvågen.

Amplitudmodulerade signalens bandbredd

När bärvågen amplitudmoduleras är den inte längre sinusformad. De sinusspänningar som behövs för att återskapa den modulerade bärvågen ligger inom ett frekvensband som sträcker sig $\pm 3,4$ kHz runt bärvågen.

Den amplitudmodulerade signalens bandbredd, frekvensområdet som upptas av frekvensspektrat, sträcker sig $\pm 3,4$ kHz runt bärvågen.

Den amplitudmodulerade sändaren belägger 6,8 kHz, två gånger högsta frekvenskomponenten hos nyttosignalen. Vi ser orsaken till varför talspänningen filtreras.



Frekvensmodulering

Radiosändaren kan frekvensmoduleras. Frekvensen ändras i takt med talspänningen. Det absolut minsta frekvensområde som behövs för att överföra en frekvensmodulerad signal är lika stort som för den amplitudmodulerade sändaren, $\pm 3,4$ kHz.

Brusfriare mottagning

Amplitudmodulering

Enda möjligheten att få brusfriare mottagning vid amplitudmodulering är att öka sändareffekten. Men högre sändareffekt innebär att radiosignalen stör, "smutsar ner", över ett större landområde. Man måste längre bort innan samma frekvens kan användas igen. Det får plats färre radiosändare inom givet landområde.

Frekvensmodulering

Vid frekvensmodulering har man möjlighet att öka den mottagna nyttsignalen i högtalaren utan att bruset ökar, dvs man får brusfriare mottagning, genom att sändarens deviation ökas, så att bandbredden blir avsevärt större än $\pm 3,4$ kHz.

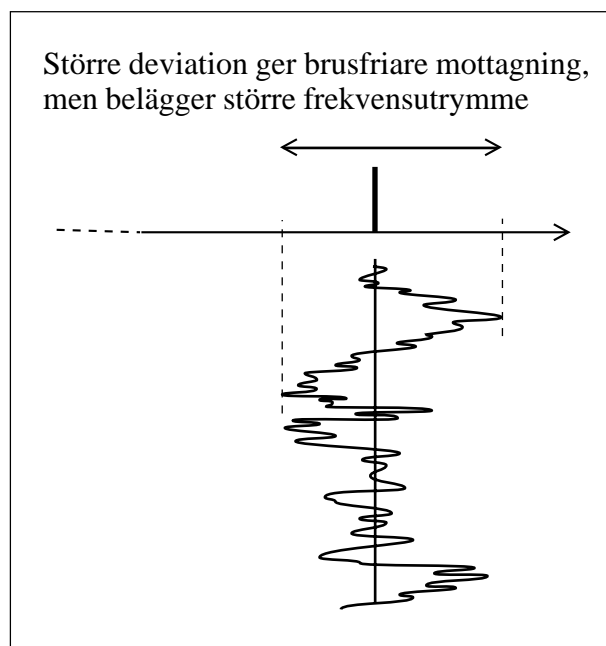
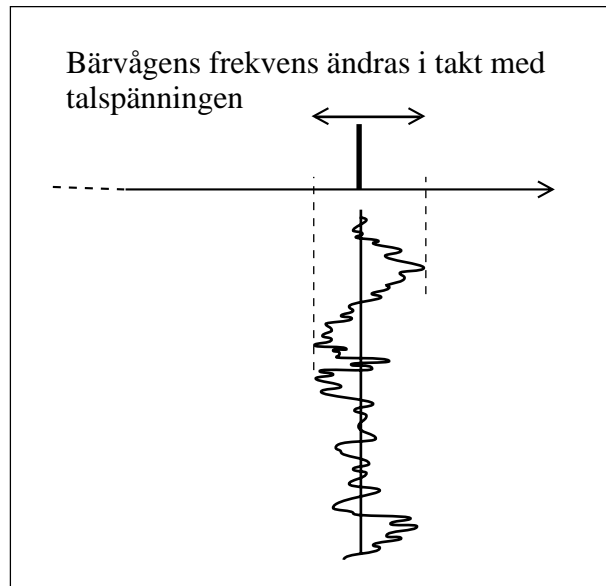
Vi behöver alltså inte öka sändareffekten som vid amplitudmodulering. Sändaren når därför inte längre. I stället slösar vi med frekvensutrymme.

- FM-sändarna på FM-bandet moduleras med ljudfrekvenser upp till 15 kHz, och varje FM-sändare belägger ett frekvensutrymme på över 200 kHz för att mottagningen skall bli brusfri.

Slösa med landområde, eller frekvensutrymme

Brusfriare radiomottagning innebär att vi antingen måste slösa med landområde som vid amplitudmodulering, eller slösa med frekvensutrymme. I båda fallen innebär brusfriare mottagning att man måste minska antalet sändare inom ett visst geografiskt område.

Radiofrekvenserna räcker bara till ett visst antal samtidiga användare oavsett vilken modulationsmetod vi väljer.



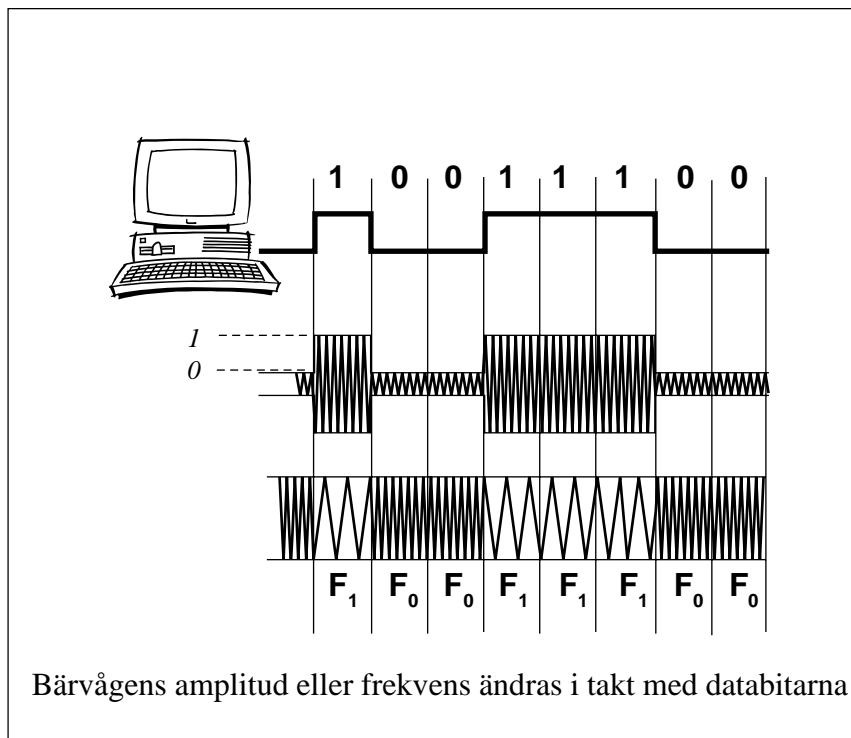
Inget frekvensspektrum

Bilderna ovan innehåller både en frekvensaxel och en tidsaxel. Tidsaxeln går rakt ner.

Bilderna visar hur sändarens bärvåg ändrar frekvens i tiden. Frekvensaxeln är däremot inget frekvensspektrum. Frekvensspektrat består av många sinusspänningar som ligger still i frekvens och sträcker sig en bit utanför de frekvensgränser som bilderna visar. Summan av alla dessa sinusspänningar, som ligger still, blir en växelspänning som rör sig, ändrar frekvens, enligt bilden.

12 — ERFORDERLIG BANDBREDD

- Det är ont om frekvenser. Vi får inte breda ut oss hur som helst.
- Vad är bestämmande för hur brett frekvensområde vi belägger med vår radiosändare?
- Hartley har formulerat en lag som sätter övre gränsen för signaleringshastigheten.



Hur ofta kan bärvågen ändras?

För att information skall överföras måste bärvågen ändras. En bärvåg som är påslagen hela tiden innehåller nästan lika lite information som ingen bärvåg alls.

- Om man växlar mellan bärvåg respektive ingen bärvåg så innehåller detta information. Bärvåg kan vara "etta", medan ingen bärvåg betyder "nolla".
- Säkrare är att växla mellan två olika amplituder (tar jag emot en "nolla" eller är sändaren trasig?). Ena amplituden får representera "etta", den andra amplituden får representera "nolla".
- Eller bärvågen kan växla mellan två olika frekvenser. Ena frekvensen representerar "etta", den andra frekvensen representerar "nolla".

Signaleringshastighet, [baud]

Vi växlar mellan olika symboler

Det vi skickar på bärvågen är symboler. Ena symbolen, bärvåg, representerar informationen "etta", andra symbolen, ingen bärvåg, representerar informationen "nolla".

Vi skickar symboler per sekund [baud]

Det vi skickar är symboler. Alltså blir signaleringshastigheten C på transmissionskanalen det antal symboler som överförs per sekund. Enheten för symboler/s är [baud].

Signaleringshastighet mäts i baud = symboler per sekund

När bärvågen ändras är den inte längre sinusformad.

Så snart bärvågen ändras, den kan stängas av eller slås på, man kan ändra amplituden, man kan ändra frekvensen, så är bärvågen inte längre en enda sinussignal utan summan av flera sinussignaler.

Låt bärvågens amplitud ändras av ett flöde av databitar, varannan "etta", varannan "nolla". Om nyttsignalen, databitarna, filtreras så att fyrkantspänningen blir lite avrundad kommer bärvågen att se ut som på figurerna. Amplituden varierar som om bärvågen moduleras med en nyttsignal som är en sinussignal, vars frekvens är halva datatakten (en period hos nyttsignalen betyder två databitar).

När bärvågen moduleras på detta sätt får den ett frekvensspektrum med bärvåg och två sidband som ligger nyttsignalfrekvensen ifrån bärvågen.

Övre bilden hög signaleringshastighet

Övre bilden visar amplitudmodulering där databitarna kommer i snabb takt. Signaleringshastigheten är hög. I detta fall upptar signalen stor bandbredd, vilket framgår av frekvensspektrat.

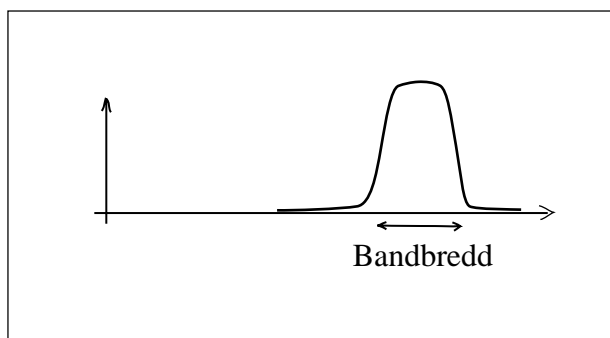
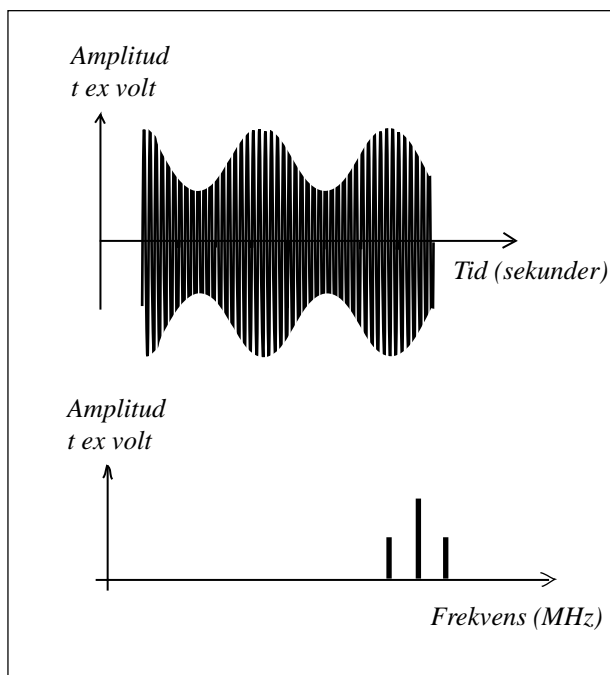
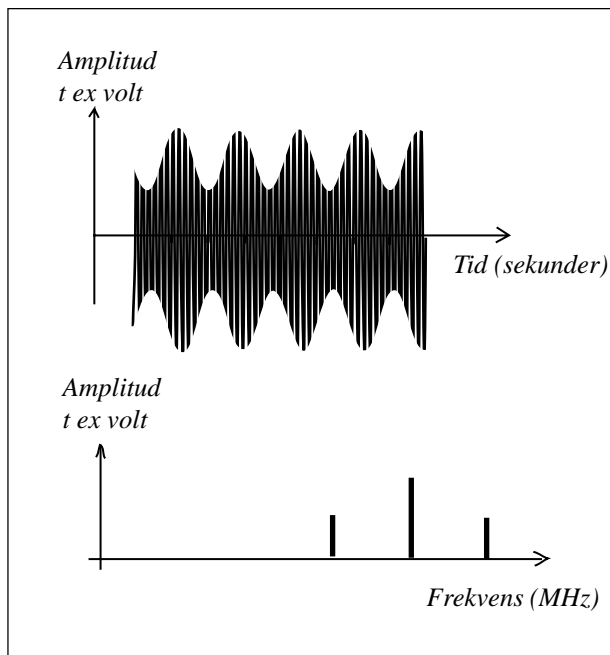
Undre bilden låg signaleringshastighet

På den undre bilden kommer databitarna inte lika snabbt, och signalen blir betydligt smalbandigare.

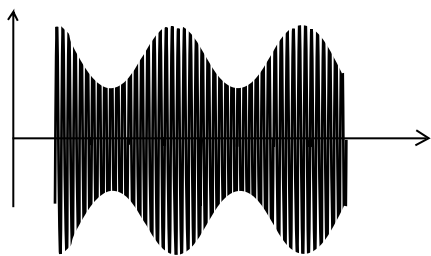
Transmissionskanalen har begränsad bandbredd

Alla transmissionskedjor har begränsad bandbredd. Även om sändaren sänder ut ett brett frekvensspektrum finns i radiomottagaren filter som begränsar bandbredden på den mottagna signalen.

Även i telenätet sitter filter på telefonstationen som begränsar bandbredden hos talspänningen till 300 Hz – 3400 Hz. Alla transmissionskedjor innehåller därför någonstans ett eller flera filter som begränsar bandbredden.



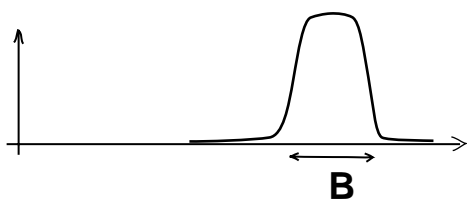
Den amplitudmodulerade signalen ändras av låg signaleringshastighet ...



... och får sidband som ligger nära bärvågen.



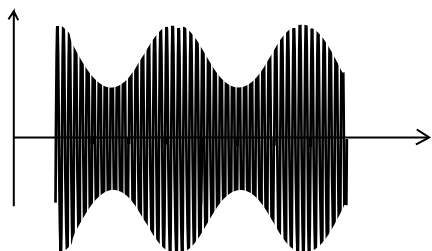
När denna signal matas in i filtret ...



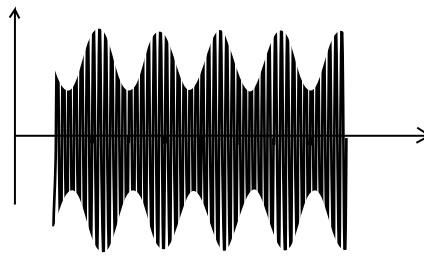
... kan såväl bärvåg som sidband passera.



Fram till mottagarens detektor kommer bärvågen modulerad med nyttosignalen.



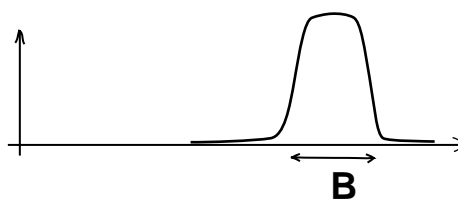
Den amplitudmodulerade signalen ändras av hög signaleringshastighet ...



... och får sidband som ligger långt från bärvågen.



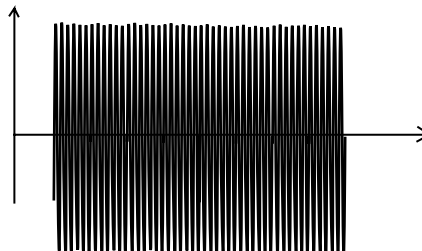
När denna signal matas in i filtret ...



... kan bara bärvågen passera.



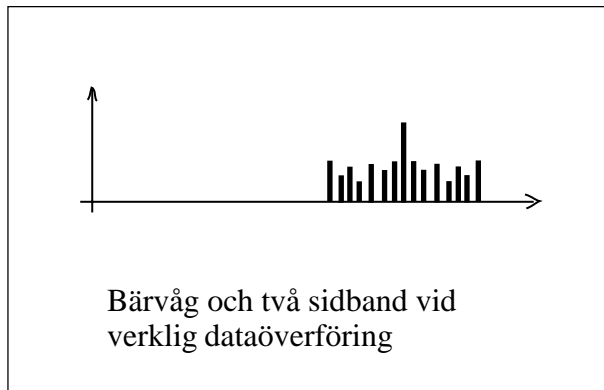
Fram till mottagarens detektor kommer bara bärvågen. Vi har förlorat nyttosignalen.



Sidbanden vid dataöverföring

Vid dataöverföring växlar inte symbolerna hela tiden mellan "etta" och "nolla", utan databitarna är slumpvis blandade. Detta innebär att nyttsignalen antar alla former, från låg frekvens när vi har många "ettor" eller "nollor" i följd, till hög frekvens när informationen växlar fram och tillbaka mellan "ettor" och "nollor".

Frekvensspektrat för en verklig dataöverföring kommer att fylla ut hela frekvensområdet mellan bärvågen och övre respektive undre frekvensgränserna vid högsta växlingstakten.



Bandbredd vid frekvensmodulering

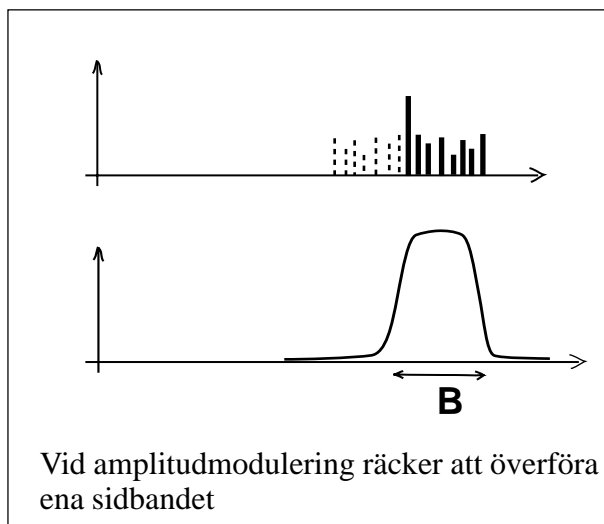
Vid den typ av frekvensmodulering som används vid datatransmission blir frekvensspektrat ungefär lika brett som vid amplitudmodulering. Man får frekvenser både över och under bärvågen, ett övre och ett undre sidband, och bandbredden blir i stort sett två gånger högsta frekvensen i nyttsignalen.

Bandbredd vid amplitudmodulering

Vid amplitudmodulering får vi två sidband, men till skillnad från frekvensmodulering är sidbanden två exakta kopior av nyttsignalen. Den ena kopian ligger som övre sidband, den andra kopian ligger spegelvänd som undre sidband.

Två identiskt lika sidband leder till något intressant: Visserligen bildas alltid båda sidbanden vid amplitudmodulering, men det räcker om det ena sidbandet kommer fram till mottagaren för att mottagarens detektor skall kunna tyda nyttsignalen.

Signalen kan filtreras i sändaren innan den skickas ut i luften. Detta sändningssätt kallas SSB (Single Side Band), eller ESB (enkelt sidband).



Hartleys lag

Detta resonemang leder fram till Hartleys lag, som beskriver absolut minsta bandbredd B [Hz] som erfordras för viss signaleringshastighet C [baud] för felfri överföring på brusfri transmissionskanal, alltså en övre teoretisk gräns för signaleringshastigheten.

Signaleringshastigheten C kommer vid amplitudmodulering, om nyttsignalen filtreras (avrundas), att ge upphov till sidband, ett övre och ett undre, som sträcker sig $C/2$ upp i frekvens från bärvågen, och $C/2$ ner i frekvens från bärvågen. Eftersom all information finns i var och ett av sidbanden, behöver bara ett sidband överföras. Detta innebär minsta bandbredd $B = C/2$ [Hz].

$$C[\text{baud}] = 2 \cdot B[\text{Hz}]$$

C = signaleringshastighet,

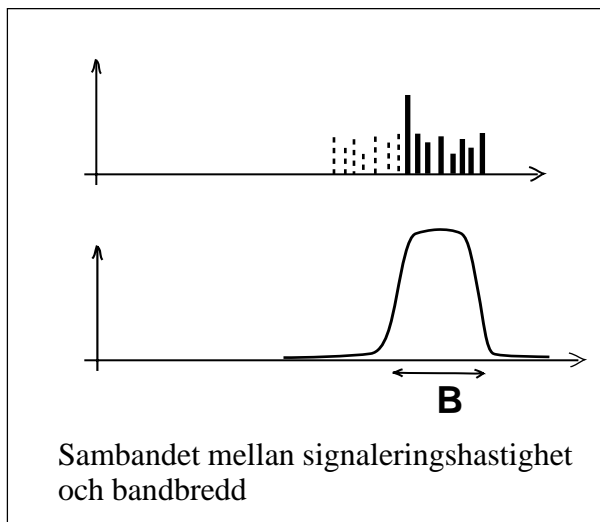
symboler per sekund [baud]

B = transmissionskanalens bandbredd [Hz]

I telenätet

I fasta telenätet överförs frekvenser mellan 300 Hz och 3400 Hz. Bandbredden blir 3100 Hz. Högsta signaleringshastighet C blir 6200 baud.

Högsta datahastigheten med modem via telenätet skulle alltså vara 6,2 kbit/s om vi inte kan hitta på något annat!



I praktiken används lägre signaleringshastighet

Om man skall pressa absolut högsta signaleringshastighet genom kanalen får man bara plats med bärvåg och ett sidband. Som vi skall se i nästa avsnitt vill man både amplitud- och frekvensmodulera samtidigt. I så fall behövs båda sidbanden, och signaleringshastigheten begränsas till att bli lika med kanalens bandbredd, eller aningen högre.

System:	Bandbredd:	Signaleringshastighet:
Telenätet	3,1 kHz	≈ 3,2 kbaud
Radiolänk	28 MHz	35 Mbaud
GSM	200 kHz	≈ 270 kbaud
D-AMPS	30 kHz	24,3 kbaud
PDC	25 kHz	21 kbaud
CT2	100 kHz	72 kbaud
DECT	1,728 MHz	1,152 Mbaud

13 — FLERNIVÅMODULERING

- Hur hög datahastighet går att överföra i den frekvenskanal jag fått mig tilldelad? Finns någon övre gräns?
- Den gränsen har beräknats av Shannon!

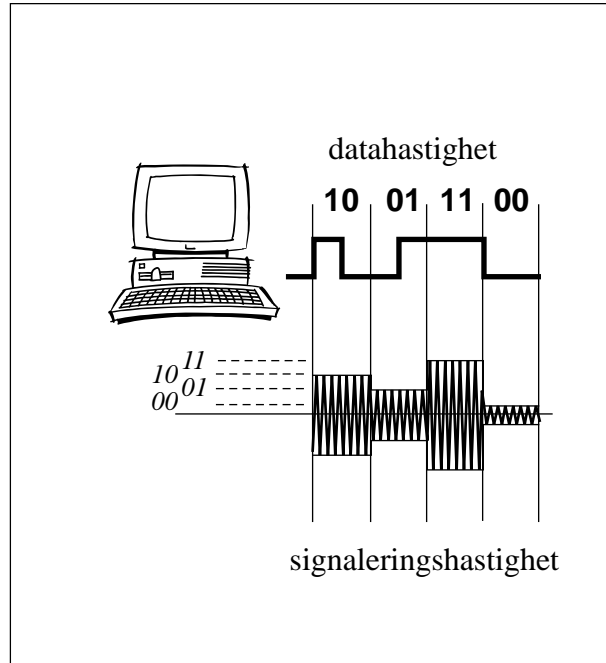
Fler nivåer

I förra avsnittet växlade bärvågen mellan två olika utseenden, två symboler. Ena utseendet (amplituden, frekvensen) betydde "etta", andra utseendet betydde "nolla".

Om bärvågen kan anta fyra utseenden, fyra olika amplituder eller fyra olika frekvenser, kan varje symbol överföra två databitar:

- Ena utseendet på symbolen betyder 00
- Nästa utseende på symbolen betyder 01
- Tredje utseendet på symbolen betyder 10
- Fjärde utseendet på symbolen betyder 11

På detta sätt kan vi överföra dubbla antalet databitar utan att behöva öka signaleringshastigheten, symbolhastigheten. Men datahastigheten har ökat till det dubbla.



2 utseenden	1	<i>Telefonmodem</i>
	0	<i>2400 Baud 2,4 kbit/s</i>
4 utseenden	11	<i>Telefonmodem</i>
	10	<i>2400 Baud</i>
	01	<i>4,8 kbit/s</i>
	00	
8 utseenden	111	<i>Telefonmodem</i>
	110	<i>2400 Baud</i>
	101	<i>7,2 kbit/s</i>
	100	
	011	
	010	
	001	
	000	

16 utseenden	4 databitar/symbol	<i>Telefonmodem 2400 Baud 9,6 kbit/s</i>
32 utseenden	5 databitar/symbol	
64 utseenden	6 databitar/symbol	<i>Telefonmodem 2400 Baud 14,4 kbit/s</i>
128 utseenden	7 databitar/symbol	
256 utseenden	8 databitar/symbol	<i>Telefonmodem 2400 Baud 19,6 kbit/s</i>
512 utseenden	9 databitar/symbol	
1024 utseenden	10 databitar/symbol	

Tabellen stämmer inte riktigt. Vid högre datahastigheter, t ex 14,4 kbit/s, 19,6 kbit/s, 28,8 kbit/s och 33,6 kbit/s, som följer V.34-rekommandationen, kan symbolhastigheten justeras till olika värden inom området 2400 baud – 3429 baud, beroende på telefonförbindelsens överföringskvalitet.

Bärvågen

Även bärvågens frekvens anpassas till telefonförbindelsens överföringskvalitet. Den signal som moduleras väljs i området 1600 – 1959 Hz, dvs mitt i telefonpassbandet.

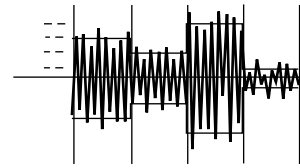
Hur många olika utseenden kan man ha på symbolen?

Kravet är att mottagaren skall kunna särskilja symbolerna. Skillnaden måste vara så stor mellan de olika symbolerna att mottagaren med säkerhet kan avgöra vilken symbol, vilken kombination av ettor och nollor, som tagits emot.

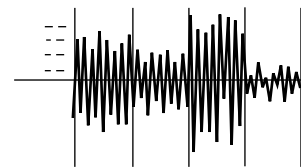
Mottagaren tar inte bara emot signalen, utan även brus. Bruset kan vara atmosfärbrus eller störningar från andra stationer vid radiokommunikation, eller brus alstrat i elektronikkomponenter vid kommunikation över kabel.

Vid radiolänk, där man använder riktantenner, kan man undvika störningar från andra stationer. Då är det radiomottagarens eget grundbrus som begränsar antalet symboler. I detta fall är bruset oftast så svagt att man kan använda 16, 32 eller t o m 64 olika symboler för att få upp datahastigheten.

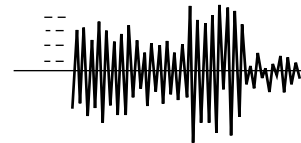
Vid mobiltelefoni är radiotransmissionen så osäker och störningarna från andra mobiltelefoner så oberäknliga att man nöjer sig med 2 eller 4 olika utseenden på symbolerna, en eller två databitar per symbol.



Bärvåg när den kommer fram till mottagaren



Mottagaren skall inte bara avgöra vilken nivå som avses ...



... mottagaren vet dessutom inte när sändaren växlar från en nivå till nästa.

Shannons lag

Claude Shannon angav 1936 en övre gräns för den högsta bithastighet som felfritt kan överföras på en transmissionskanal när man känner bandbredden B (Hz) och signal/störförhållandet (S/N effektförhållande).

Följande uttryck gäller vid "vitt gaussiskt brus", dvs bruset innehåller lika mycket av alla frekvenser (vitt) och amplituderna på brustopparna är normalfördelade (gaussisk sannolikhetsfördelning).

Shannon förklarade inte hur denna bithastighet skall uppnås. Men bandbredden är bestämmande för maximala symbolhastigheten, och S/N bestämmer hur många olika utseenden på symbolerna som går att urskilja i bruset.

Datahastighet i fasta telenätet

Vid vanligt telefonabonnemang går signalen som analog spänning på kopparkabel till telefonstationen, där den passerar ett filter som bara släpper igenom frekvenser inom 300 Hz till 3,4 kHz. Detta filter bestämmer symbolhastigheten.

Därefter sker omvandling från analog till digital signal i A/D-omvandlaren.

Vid mottagarens telestation, om man ringer någon med vanligt teleabonnemang, går digitala signalen in i D/A-omvandlaren och omvandlas till analog spänning som går på kopparkabeln hem till mottagaren.

A/D-omvandlingen ger "kvantiseringsbrus"

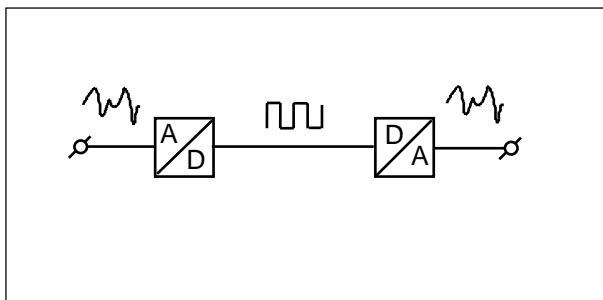
Vid omvandling från analog signal till digital signal skall spänningsnivån kodas med 8 databitars noggrannhet. Detta innebär att vi får ett avrundningsfel.

I andra ändan, vid D/A-omvandlingen, omvandlar vi tillbaka till analog signal som motsvarar dataordet. Då stämmer inte spänningsnivån. Vi får avrundningsfelet. Detta avrundningsfel är en felsignal och uppfattas av modemmet som brus, kvantiseringsbruset.

$$\text{Max bithastighet} = \frac{B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)}{\log 2}$$

B = transmissionskanalens bandbredd [Hz]

S/N = signal/brusförhållande (effektförhållande)



$S/N = 30$ dB

Kvantiseringsbruset motsvarar ett signal/brusförhållande på drygt 30 dB, dvs signal-effekten är 1000 ggr starkare än brus-effekten.

Om vi sätter in de siffror som gäller för telenätet:

$$B = 3,1 \text{ kHz}$$

$$S/N = 30 - 37 \text{ dB (endast kvantiseringsbrus, ingen hänsyn till överhörning m m)}$$

blir resultatet 31 – 38 kbit/s. Vi använder idag modem som klarar 28,8 kbit/s och oftast även 33,6 kbit/s. Tekniken att bygga modem är så högt utvecklad att man ligger på gränsen till vad som är teoretiskt möjligt.

56 kbit/s i fasta telenätet

Om den teoretiskt högsta datahastigheten i telenätet uppgår till ca 35 kbit/s, hur klarar man då 56 kbit/s?

ISDN-nätet

Den som har ISDN-abonnemang är digitalt ansluten ända hemifrån. Telestationens A/D- och D/A-omvandlare sitter i den egna ISDN-telefonen, eller i adaptorn/routeren som omvandlar till analog telefon.

Samtal från ISDN-nätet

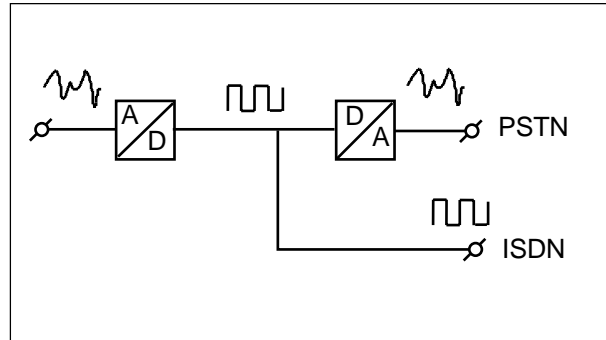
Om jag ringer från ISDN-nätet till någon med vanligt analogt teleabonnemang, går min digitala signal först genom ISDN-nätet, sedan in i digitala delen av PSTN-nätet (analogt nät) fram till telestationen, in i D/A-omvandlaren där digitala orden omvandlas till spänningsnivåer, och sedan som analog signal på kopparkabeln fram till abonnenten.

A/D-omvandlaren alstrar 8-bitsord 8000 ggr per sekund. Detta blir 64 kbit/s. På samma sätt tar D/A-omvandlaren 8 databitar i taget och omvandlar detta till en spänningsnivå, med 8000 nya spänningsnivåer per sekund.

D/A-omvandlaren kan ses som sändande delen av ett modem, 8 databitar per symbol, 8000 symboler per sekund. Och här uppstår inget kvantiseringsfel. Kvantiseringsfelet uppstår när man går från analog signal till digital kodning, ej tvärt om.

Din Internet-operatör ansluter Internet direkt till ISDN-nätet. Han förbikopplar sin A/D-omvandlare och matar ut 8-bitsord på ISDN-nätet. ISDN-nätet tror att dessa 8-bitsord är digitaliserat tal och matar dem vidare in i vanliga telenätet, PSTN-nätet, där de når din telestations D/A-omvandlare. Men 8-bitsorden innehåller inte digitaliserat tal, utan 7 av databitarna är Internet-data.

I din telestations D/A-omvandlare omvandlas 8-bitsorden till spänningsnivåer, och ditt modem innehåller en så avancerad signalprocessor att den klarar att särskilja de olika spänningsnivåerna. Vid uppkopplingen sker bl a kalibrering då modemmet lär sig vilka nivåer som betyder vad.

**Varför bara 7 databitar?**

Endast 7 av databitarna i 8-bitsorden är Internet-data. Men varför bara 7 databitar, varför inte 8 databitar?

I digitala delen av det amerikanska PSTN-nätet används 1,5 Mbit/s-förbindelser, uppdelade på 24 telefonkanaler, var och en på 64 kbit/s. Men man behöver även databitar för signalering. Därför "stjäl" man en databit ut vart sjätte 8-bitsord och använder dessa stulna databitar som signaleringskanal. Men dessa signaleringsdatabitar fortsätter ändå till abonnentens D/A-omvandlare. Den minst signifikanta databiten i varje 8-bitsord kan alltså vara felaktig. Detta märks inte vid talöverföring, men är katastrofalt vid dataöverföring. Därför utnyttjas bara de 7 databitar som garanterat är riktiga.

Sju databitar i varje symbol, 8000 symboler per sekund, ger 56 kbit/s.

Europeiska 2 Mbit/s-standarderna har 32 kanaler om 64 kbit/s. Endast 30 kanaler används som talkanaler. Av de övriga två används en kanal för synkronisering och den andra som signaleringskanal. Här är alla 8 databitarna korrekta. Men tekniken är utvecklad i USA. Därför bara 56 kbit/s.

14 — FAS-AMPLITUD-MODULERING

Hur transporteras digitala signaler?

Som ljuspulser på optokabel

Efter analog/digitalomvandling i telestationen transporteras databitarna i optofiber som ljuspulser. Grovt förenklat kan man säga att lampan är släckt (nolla) eller tänd (etta).

Att tända och släcka lampan är en brutal metod som kräver stor bandbredd. Men man är ensam på glasledaren. Ingen störs, ingen stör mig.

Som spänningsnivåer på kopparkabel

Databitarna kan skickas som spänningsnivåer på kopparkabel (parkabel eller koax). En etta kan vara positiv spänning och en nolla negativ spänning. Men även detta är "brutalt", på samma sätt som ljuspulserna i optofibern. De fyrkantiga spänningsspulserna får frekvenskomponenter högt upp i frekvens. Digitaliseringen av telestationerna medförde en väsentligt höjd brusnivå på 80 MHz kommunikationsradiobandet i städerna, störningar som främst kommer från 2 Mbit/s-förbindelser.

Som olika analoga signaler

Bättre utnyttjande av analoga förbindelser får man om ettan utformas som en analog signal, och nollan som en annan analog signal. Denna omvandling från digital signal till analog och tvärt om utförs av ett modem (modulator/demodulator). Modemets uppgift är att på bästa sätt anpassa de analoga signalerna till överföringskanalen. Extremt viktigt är hur man tar sig från en analog signal till nästa. Häftiga förändringar i amplitud eller fas ger alltid stor bandbredd. Speciellt i radiosammanhang är det viktigt att bandbredden blir minsta möjliga.

Digital radio är analog!

Digital radio innebär att en analog radio förses med modem, radiomodem. Radiomodemet måste åstadkomma analoga signaler som inte upptar större bandbredd än nödvändigt (det är ont om frekvenser), samtidigt som radiomottagaren måste klara att skilja på ettor och nollor vid de störningar som kan uppträda på radiosträckan.

Det går åt minsta möjliga bandbredd och man klarar sig med minsta möjliga signal/brusförhållande, om man modulerar sändarbärvågens fas, eller både fas och amplitud vid flernivåmodulering.

Noggrann modulering av bärvågens fasläge åstadkommer man genom att amplitudmodulera på ett smart sätt!

När "börjar" sinussignalen?

För att beskriva en sinussignal räcker det inte med signalens amplitud och frekvens. Man måste också tala om när den börjar, dvs när en ny "period" börjar, i förhållande till någon viss tidsreferens.

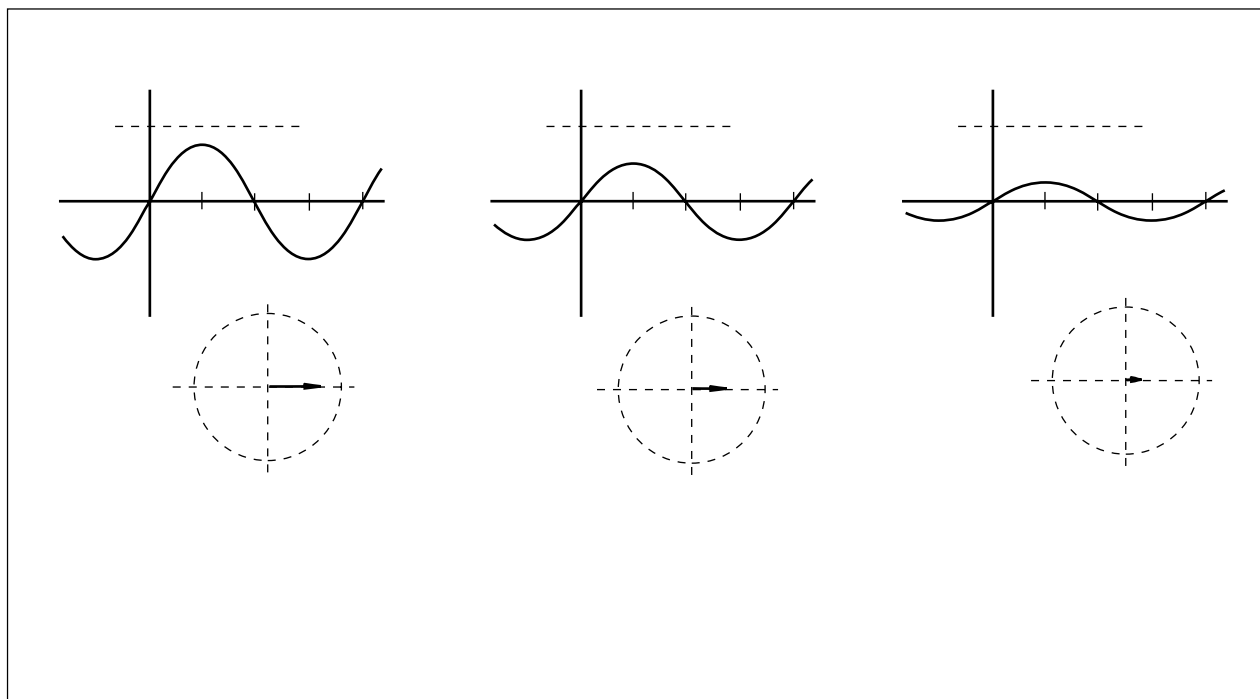
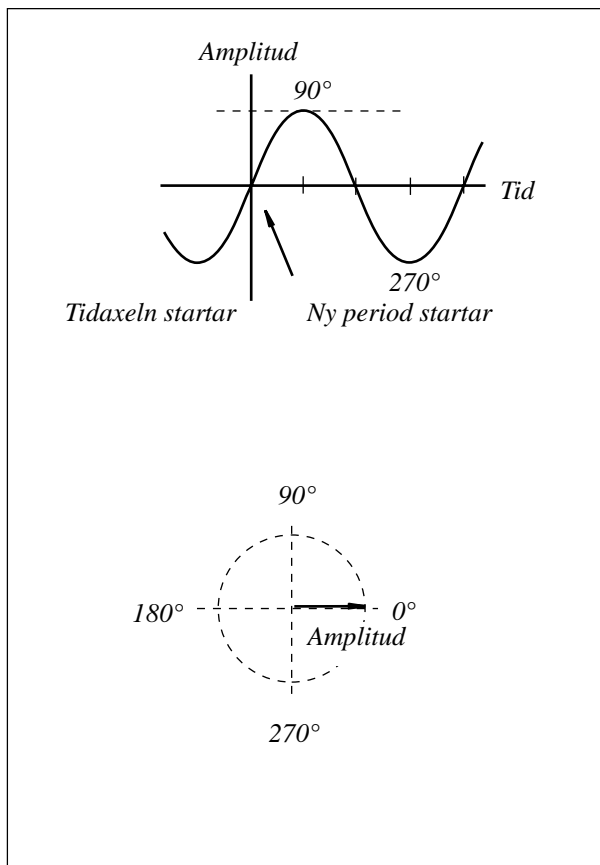
I bilden påbörjar sinussignalen en ny period precis i det ögonblick vi börjar mäta tiden, i det ögonblick då tidsaxeln startar.

Visardiagram, ett annat sätt

Ett annat sätt att beskriva sinussignalen är som spänningsvisare i cirkeldiagrammet. Pilens längd motsvarar sinussignalens amplitud. Pilens riktning talar om signalens fasläge vid tiden noll.

Om amplituden ändras

Bilden nedan visar hur det ser ut i cirkeldiagrammet när sinussignalens amplitud ändras.



Fasläget

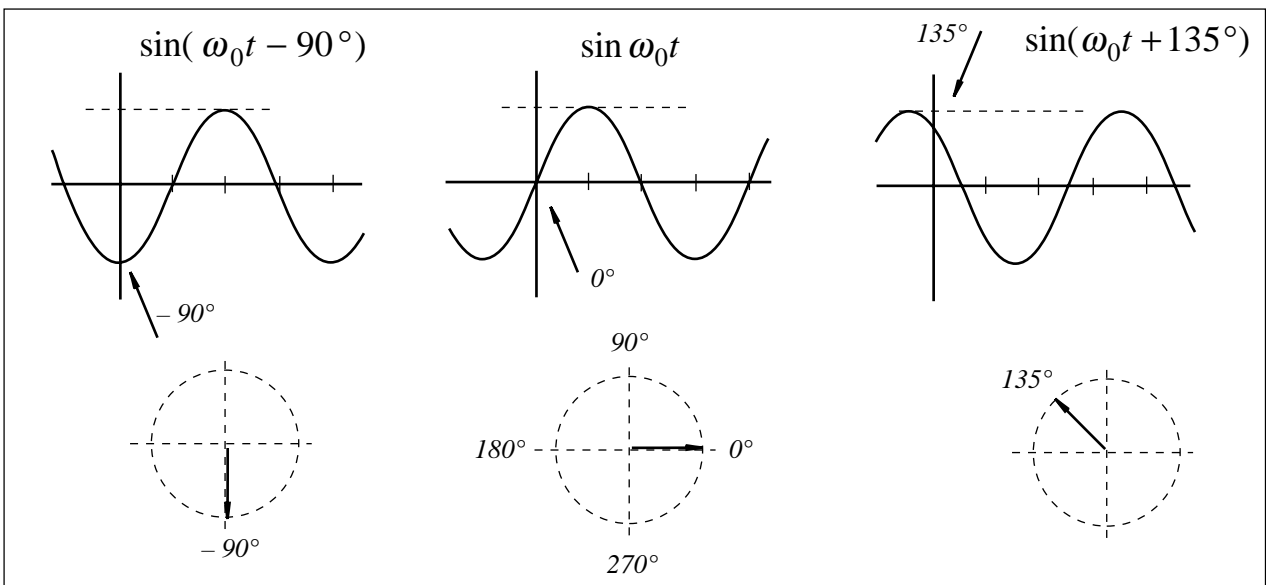
Här ser vi hur det ser ut i cirkeldiagrammet, och på tidaxeln, om sinussignalen har annat fasläge.

Fasmodulation

Om nyttosignalen modulerar bärvågens fasläge, så att fasvinkeln är direkt proportionell mot nyttosignalens amplitud, då kallas detta fasmodulation.

$$A \sin(\omega_0 t \pm \varphi^\circ)$$

Fasmodulering



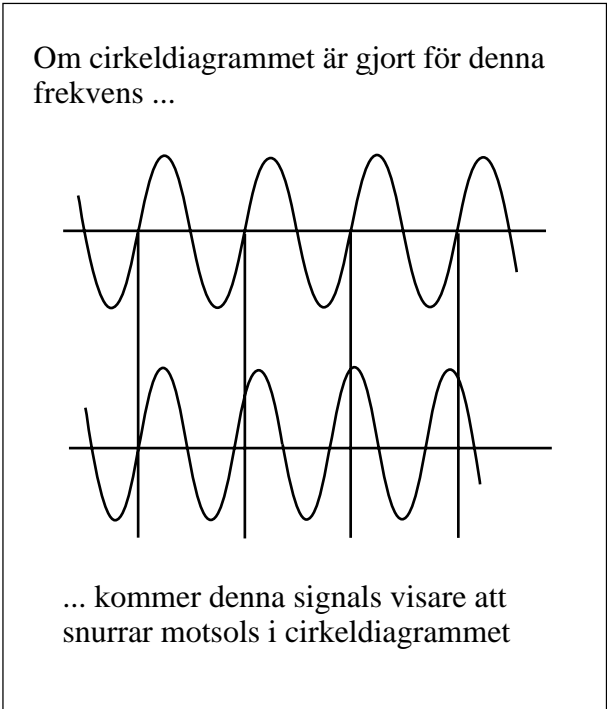
Annan frekvens

Om cirkeldiagrammet är gjort för den övre frekvensen i diagrammet, hur ser visaren ut för en signal som har högre frekvens?

Cirkeldiagrammet kan beskrivas på följande sätt: Sinussignalens visare snurrar motsols, ett varv på en period. Samtidigt belyser man diagrammet med en stroboskoplampa som blinkar med referensfrekvensen, den övre kurvan.

Vid varje blinkning kommer den övre kurvans visare att ligga vid 0° , medan den undre kurvans visare vid varje blinkning rör sig lite längre än ett varv. Den högre frekvensens visare snurrar motsols med skillnadsfrekvensen.

En lägre frekvens snurrar medsols med skillnadsfrekvensen.

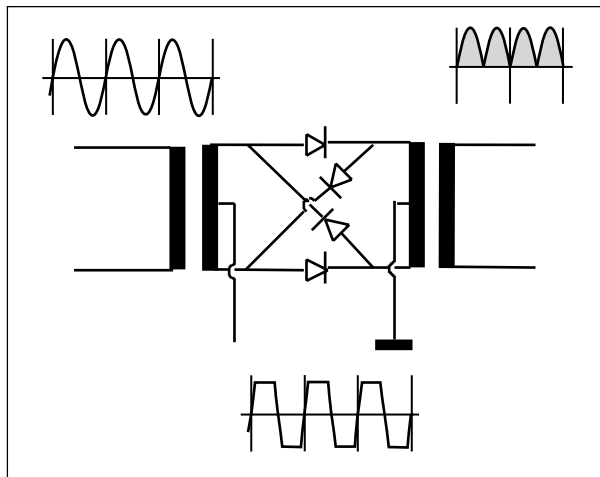


Radiomottagaren

När man tar emot (detekterar) den modulerade bär-vågen, hur gör man?

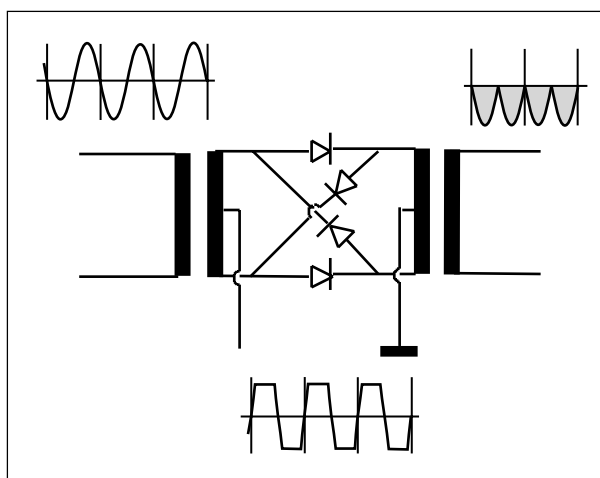
Amplituddetektor

Enklaste typen av detektor känner av bär-vågens amplitud genom att "klippa bort" bär-vågens negativa halvperiod och sedan filtrera i ett lågpasfilter. Denna detektor är helt okänslig för bär-vågens fasläge. Vi kan till och med ha frekvensvariationer hos bär-vågen utan att detektorn reagerar. Detektorn känner bara bär-vågens amplitud, inget annat.



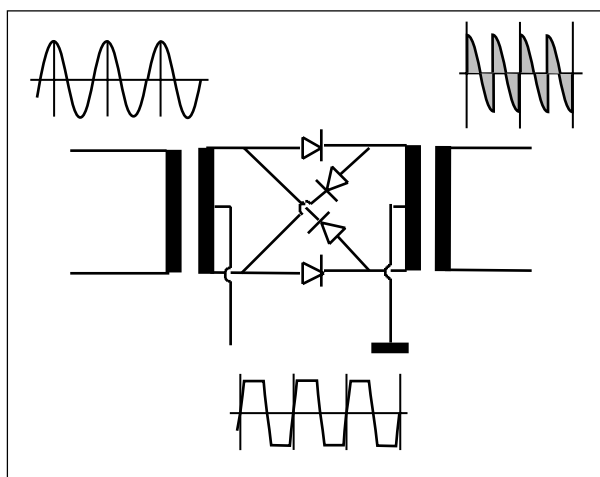
Koherent detektor

En känsligare detektor får man genom att först återskapa den omodulerade bär-vågen i mottagaren och låta den styra en fyrkant-spänning som öppnar likriktardioderna i en "balanserad detektor", även kallad "ring-modulator".



Insigalen i fas med referensoscillatorn

På översta bilden är insigalen i fas med referensoscillatorn. Dioderna kopplar om på sådant sätt att utsigalen blir insignalens positiva halvperioder. Efter lågpasfilter blir detta en positiv likspänning med amplituden proportionell mot insignalens amplitud.



Insigalen 180° fasvriden i förhållande till referensoscillatorn

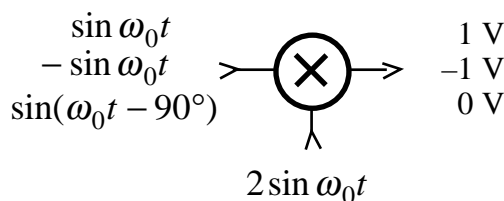
På mellersta bilden är insigalen 180° fasvriden, och utsigalen blir denna gång de negativa halvperioderna, vilket efter lågpasfilter blir en negativ likspänning proportionell mot insignalens amplitud.

Insigalen 90° fasvriden i förhållande till referensoscillatorn

På undre bilden är insigalen fasvriden 90°, och dioderna kopplar om mitt i insignalens halvperioder, varför utsigalen blir en växel-spänning utan likspänningskomponent. Efter lågpasfilter blir spänningen noll.

Balanserade modulatore är en detektor som känner av både amplitud och fasläge hos insigalen.

Förenklat kan mottagaren ritas så här:



Sändaren

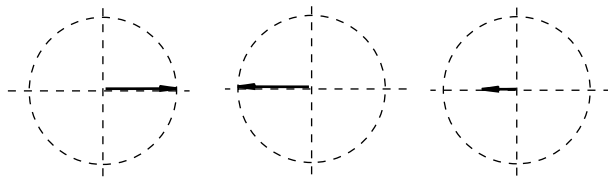
Vi kan använda samma balanserade modulator i sändaren. Bärvågen, i fas med referensoscillatorn i mottagaren, matas in från vänster.

Nyttosignalen får styra dioderna. Om nyttsignalen är positiv leder de yttre dioderna och bärvågen passerar utan förändring. Om nyttsignalen är negativ leder de inre dioderna och bärvågen fasvrids 180°.

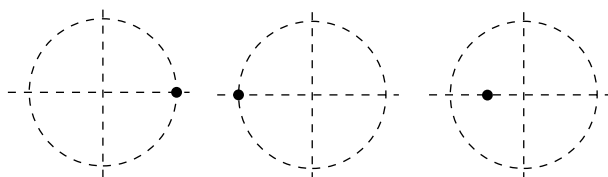
Om nyttsignalen har annan amplitud kommer likströmmen genom dioderna att förändras, och detta påverkar diodernas dämpning. Genom att ändra nyttsignalens amplitud kan vi alltså amplitudmodulera bärvågen.

Hur beskriver vi sändarsignalen?

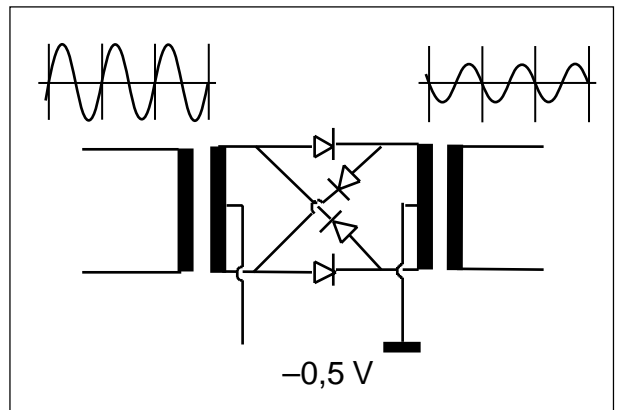
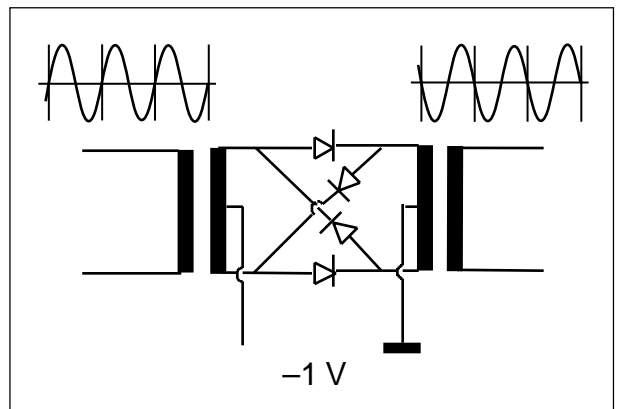
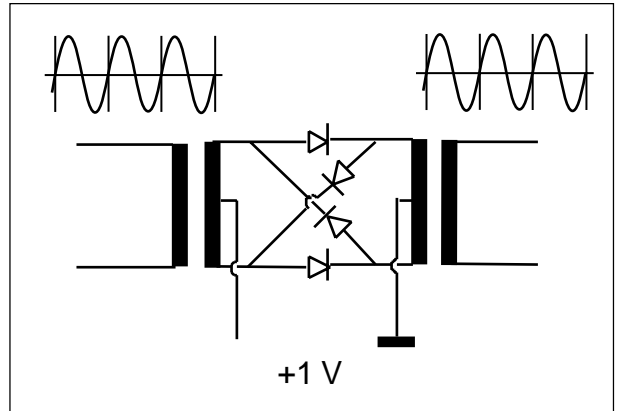
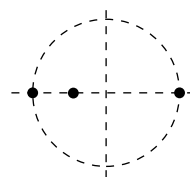
Sändarsignalen visas enklast som spänningvisare i cirkeldiagrammet.



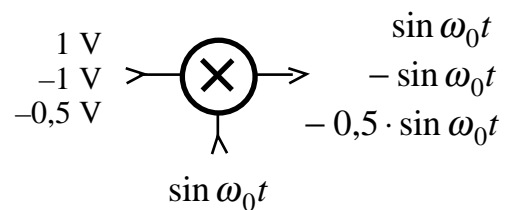
För att cirkeldiagrammet inte skall bli alldeles klottrigt av visare ritas vi bara in punkten där visaren slutar.



I detta fall kan sändaren alstra följande symboler:

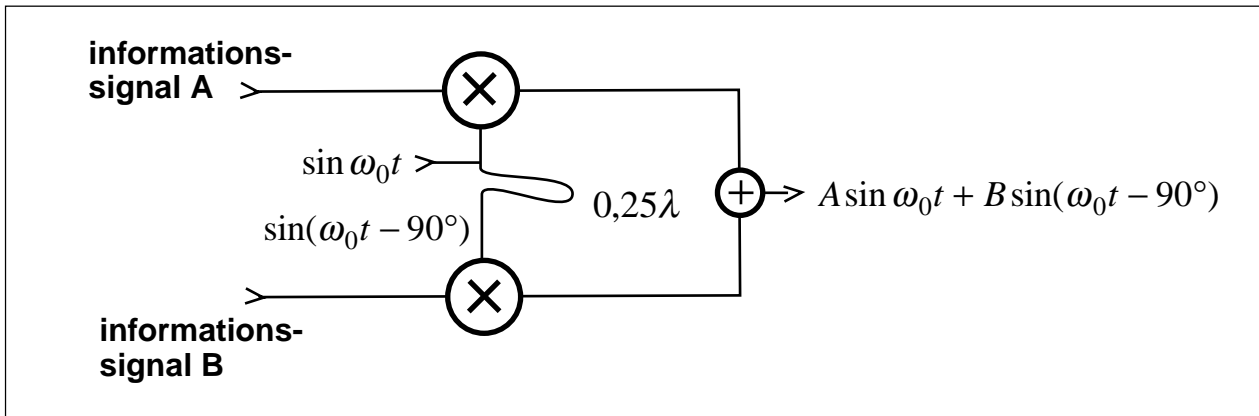


Vi vänder på ingångarna och ritas sändaren så här:



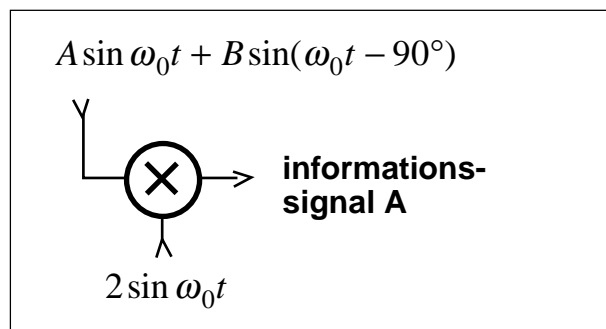
Två sändare samtidigt, på samma bärvågsfrekvens

Om jag använder koherenta detektorer i mina radiomottagare kan jag bygga två sändare som utnyttjar samma bärvågsoscillator och dessutom ligger på samma frekvensband.



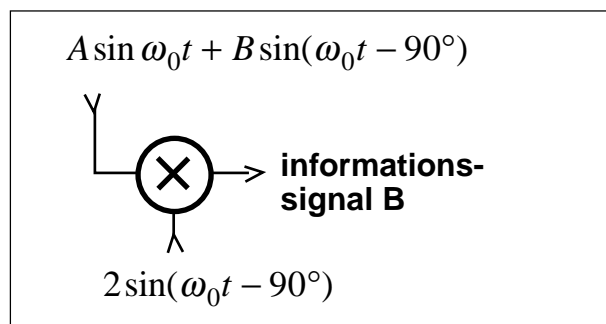
Mottagare för information A

Genom att se till att den lokalt alstrade referensoscillatorn ligger i fas med den sändarbärvåg som moduleras med information A, detekterar jag informationssignal A.



Mottagare för information B

Genom att se till att den lokalt alstrade referensoscillatorn ligger i fas med den sändarbärvåg som moduleras med information B, detekterar jag informationssignal B.

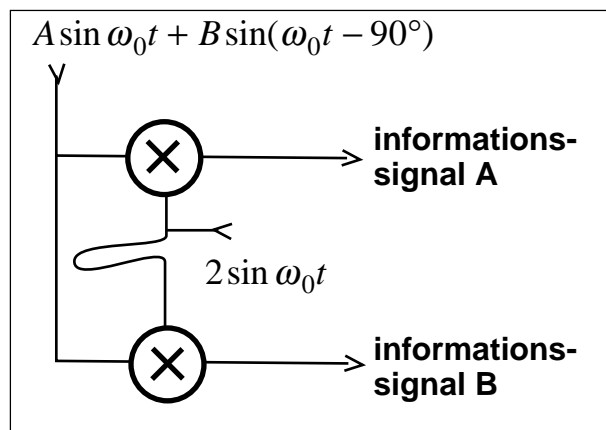


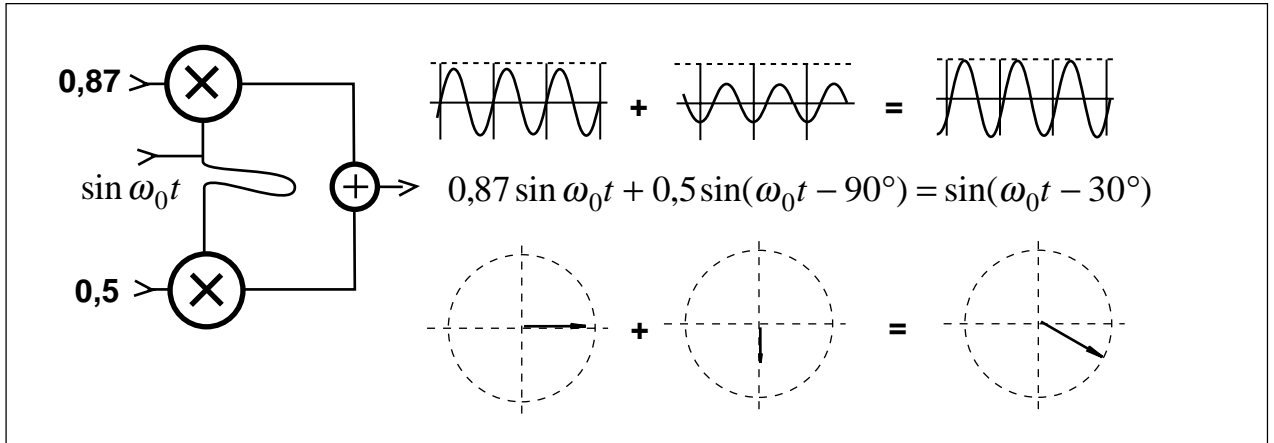
... eller en dubbel mottagare för både A och B

Genom att bygga en radiomottagare med dubbla detektorer får jag bägge informationssignalerna.

Dubbla informationsmängden utan att öka signaleringshastigheten

Signaleringshastigheten hos informations-signal A bestämmer sändarens bandbredd. Vi lägger till informationssignal B med samma signaleringshastighet, som också ger samma bandbredd, runt bärvågsfrekvensen.





Om två sinusspänningar med samma frekvens adderas

En intressant egenskap hos sinusfunktionen är att om två sinusspänningar med samma frekvens men olika fasläge adderas, blir resultatet en ny sinusspänning med ny amplitud och nytt fasläge, men samma frekvens. Summan är fortfarande sinusformad!

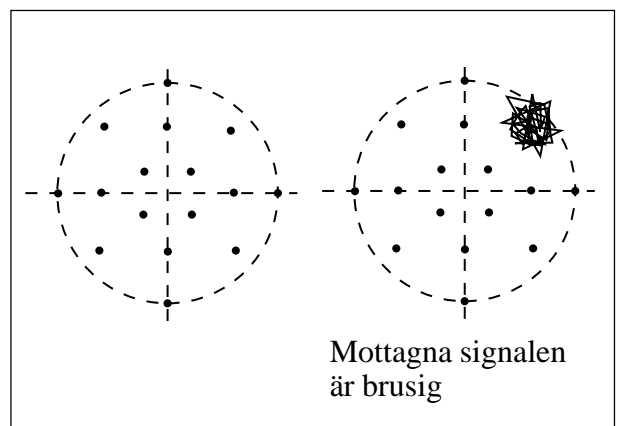
Finns någon annan växelspanning där man kan addera två komponenter med olika fasläge och få exakt samma utseende på växelspanningen?

Både på tidsaxeln, i cirkeldiagrammet och matematiskt syns, hur sändarens utsignal blir en sinusspänning, där amplitud och fasläge beror på storleken hos insignalerna A och B. Med A och B kan spänningsvisaren styras till vilken punkt som helst i cirkeldiagrammet.

Telefonmodem 9,6 kbit/s (V.29)

Symbolhastigheten är 2400 Baud och man skickar 4 databitar per symbol. Storleken på signalerna A och B väljs så att "pilspetsarna", punkterna, fördelar sig så långt från varandra som möjligt, eftersom pilspetsen, punkten, blir "utsmetad" av brus vid mottagning.

För att detektera A och B krävs att mottagarens referensoscillator ligger i fas (koherent) med sändarens bärvåg. Felaktig fas innebär att cirkeln vrids. Att fastställa hur cirkeln skall vridas, vilken punkt som är 0° är bl a vad modemerna sysslar med i början av uppkopplingen, innan själva dataöverföringen startar.



Radiolänk 155 Mbit/s

Om symbolhastigheten är 28 Mbaud och man skickar 6 databitar per symbol blir datahastigheten 168 Mbit/s. Detta kan räckas för en 155 Mbit/s SDH radiolänk. Siffrorna är ungefärliga.

Radiolänkar byggs så att störnivån hålls extremt låg, dvs man får mycket högt signal/brusförhållande. På detta sätt klarar radiomottagaren att särskilja punkterna trots att de ligger mycket tätt.

Synkroniseringen viktig

Om radiolänkmottagarens referensoscillator tappar synkroniseringen, dvs ändrar sin fas i förhållande till sändarens bärvåg, kommer den mottagna spänningsvisaren att riktas åt fel håll. Diagrammet blir vridet och symbolerna avkodas som fel kombination av ettor och nollor. Allt blir fel.

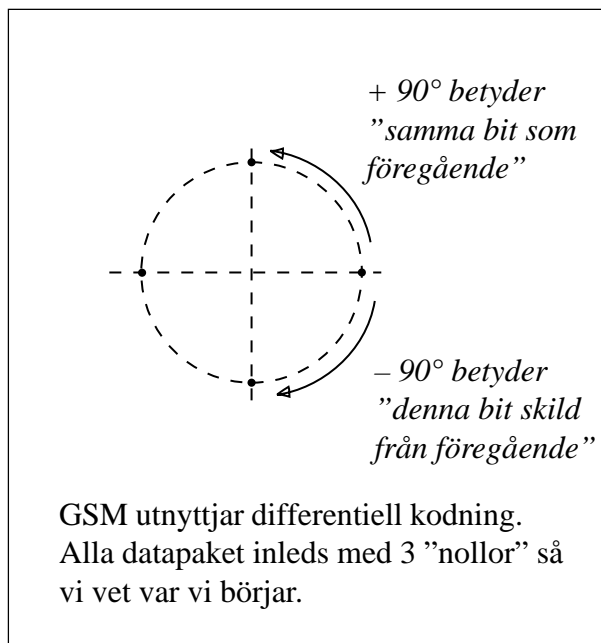
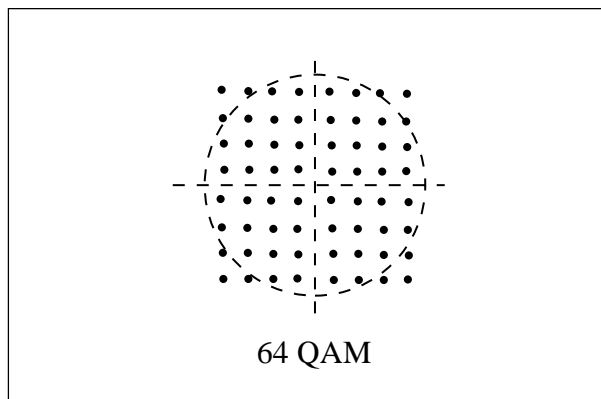
Vid ett kort signalavbrott kan mottagaren tappa synkroniseringen. När signalen återkommer måste mottagaren först hitta synkroniseringen innan den kan tyda symbolerna på rätt sätt. Vi får en "breddning" av transmissionsavbrottet.

GSM — "nästan koherent"

När transmissionskanalen är svårt störd, som vid mobiltelefoni, hinner man inte synkronisera mottagaroscillatorn. I stället för pilspetsens (punktens) läge låter man pilens förändring betyda symbolen.

Vid GSM får en vridning, förändring av fasen 90° åt ena hållet betyda ena symbolen, medan vridning av fasen 90° åt andra hållet betyder andra symbolen. Vridningen kan starta från vilken punkt som helst. På detta sätt behöver man inte hålla reda på var axlarna ligger i cirkeln. Radiomottagaren använder en koherent detektor, med den koherenta detektorns känslighet, men det räcker om referensoscillatorn nästan har samma frekvens som sändaroscillatorn. Det gör inget om hela cirkeldiagrammet långsamt vrider sig åt ena eller andra hållet. Detektorns "intelligens" klarar detta.

Både GSM, D-AMPS och PDC använder mottagardetektorer av detta slag som är "nästan" koherenta.



15 — HUR HÖG SÄNDAREFFEKT BEHÖVS?

Mottagarkänslighet

För att beräkna hur mycket sändareffekt som behövs måste man veta vilken insignal mottagaren kräver.

Brus

För att beräkna hur stark signal mottagaren kräver måste man veta hur starkt bruset är. Radiosignalen S måste vara ett visst antal gånger starkare än bruset N (S/N) för att detektorn säkert skall kunna avgöra om signalen är "etta" eller "nolla".

Brusnivån

Det är egentligen bara en faktor som bestämmer brusnivån i mottagaren, och det är mottagarens bandbredd. Halva bandbredden ger halva bruseffekten (-3 dB) och därmed 3 dB högre känslighet hos radiomottagaren. Dubbla bandbredden ger dubbla bruseffekten ($+3$ dB) och 3 dB lägre känslighet hos radiomottagaren.

Det finns ytterligare en faktor som kan inverka, nämligen mottagarens brusfaktor F , som är ett mått på det brus som alstras i själva mottagaren. Men eftersom totala bruset är summan av det yttre bruset som kommer in via antennkabeln och mottagarens eget brus, så spelar mottagarens brusfaktor F mindre roll när det yttre bruset är kraftigt.

Vid mobiltelefoni tenderar det yttre bruset att inte bara vara "brus" utan även störningar från sändare i närliggande celler. Vid uppmätning av mottagarkänslighet i laboratorium finns emellertid inte dessa yttre störningar, utan bara grundbruset, 290 K.

Hur mycket starkare måste radiosignalen vara?

Om vi överför en databit per symbol och väljer smalast möjliga bandbredd för önskad datahastighet, måste radiosignalen vara

nästan 10 ggr ($9 - 10$ dB) starkare än den bruseffekt som passerar genom mottagarfiltret, om signalen skall kunna detekteras med en bitfelshalt på $10^{-3} - 10^{-4}$ vid den typ av störning man har vid mobiltelefoni.

Vid fler databitar per symbol behövs högre signal/brusförhållande, betydligt högre än bandbreddsminskningen. Fler databitar per symbol är därför inte användbart för att minska behovet av sändareffekt.

Men om man ökar bandbredden? Sprider ut signalen på stor bandbredd? Vi skall se i avsnittet om CDMA att utsänd energi per databit måste förbli densamma.

Det finns inga knep

För att ta emot information behövs signal som inte dränks i brus. Annars klarar vi inte att tyda informationen.

Digital radio känsligare än analog?

Den analoga radion (NMT 900) skall inte bara ta emot den önskade informationen, talet. Talsignalen måste vara så stark att vi inte störs av bruset. Den digitala radion däremot behöver bara avgöra om signalen är etta eller nolla. Störande bakgrundsbrus matas inte vidare.

Vid NMT överförs den verkliga talsignalen. Vid GSM överförs styrsignaler till den talande datorn. Styrsignalerna innehåller betydligt mindre informationsmängd. Den minskade informationsmängden borde ge ökad mottagarkänslighet?

GSM använder den ökade känsligheten jämfört med NMT till att öka datahastigheten så den räcker för 8 samtidiga samtal. Då sjunker mottagarkänsligheten och hamnar i nivå med NMT. Ficktelefonerna för NMT och GSM använder därför ungefär samma sändareffekt. Men GSM sänder bara under $1/8$ av tiden. Energimängd per samtal är lägre för GSM, svarande mot den mindre informationsmängd som överförs.

Mottagarkänslighet

Två signaler: Den önskade signalen ...

In i mottagaren kommer två signaler, dels den önskade signaleffekten från antennen, P_m ,

... och brus

Bruseffekten betecknas vanligtvis N och består av två bruseffekter:

- Den ena kommer in i mottagaren från antennen, N_a .
- Den andra bildas i själva mottagaren, N_m .

För att förenkla bortser man vid känslighetsberäkningar från mottagarens förstärkning, eftersom mottagaren förstärker den önskade signalen och bruset lika mycket (S/N påverkas ej).

Brustemperatur T

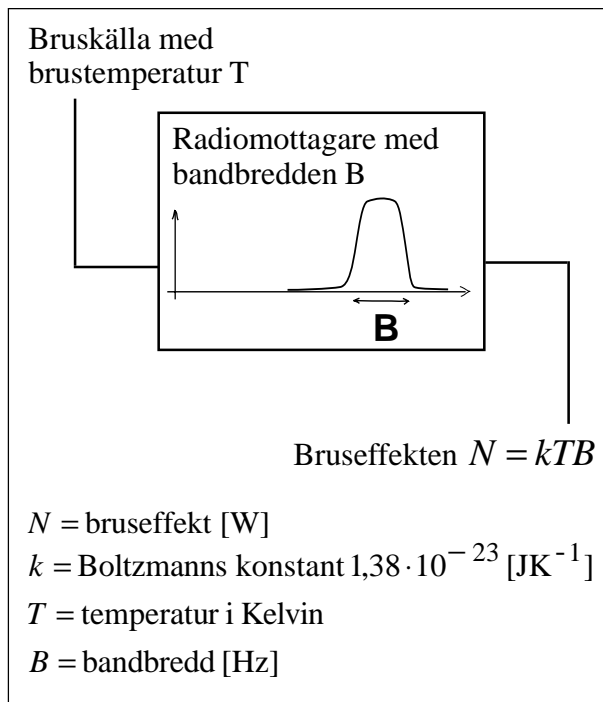
Varje "kropp" sänder ut eller producerar termiskt brus som beror på kroppens temperatur mätt i Kelvin [K] ($0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$). Den bruseffekt som kommer fram till detektorn, där man skall avgöra om signalen är "etta" eller "nolla", beror på brustemperaturen T , Boltzmanns konstant k , och mottagarens bandbredd B [Hz].

Mottagarens eget brus

I mottagaren är det främst transistorerna som alstrar brus. Mottagarbruset omräknas till ekvivalent termiskt brus, och anges som en mottagarbrustemperatur T_m [K].

Mottagarens brusfaktor F [dB]

Det vanligaste är emellertid att mottagarens brusegenskaper anges, inte som brustemperatur, utan som brusfaktor F , uttryckt i dB.



$$F[\text{dB}] = 10 \log \frac{290 + T_m}{290}$$

Samband mellan mottagarens brusfaktor F och mottagarens brustemperatur T_m

$$T_m [\text{K}] = 290(10^{\frac{F[\text{dB}]}{10}} - 1)$$

Mottagarens brustemperatur T_m när man känner brusfaktorn F

Bruset från antennen

Antennen brusar inte (resistiva förluster i antennen och antennkabeln brusar, men här förenklar vi och räknar in detta brus i mottagarens brusfaktor F), men däremot fångar antennen upp brus som finns som radiostrålning.

Jordklotet har ungefär temperaturen $+17^\circ\text{C}$ och brusar därför med brustemperaturen 290 K. En rundstrålande antenn eller riktantenn som riktar sin antennlob mot jordklotet fångar upp detta brus och matar in bruset i mottagaren tillsammans med den önskade signalen. En ficktelefon, en basstation för mobiltelefoni, satellitens parabol

som är riktad mot jorden, är exempel på antenner som fångar upp bruseffekt motsvarande 290 K (ungefärligt värde, eftersom viss del av antennloben riktas uppåt mot himlen och solen).

En parabol på jorden som riktas mot himlen fångar upp brus från vintergatan. Vid 12 GHz motsvarar detta brus ungefär 20 K.

Om parabolen riktas mot solen blir brusets mycket kraftigt. Vid de tillfällen på året då solen befinner sig bakom en geostationär satellit dränks TV-signalen i brus.

Brustäthet, brus per Hertz, N_0 [W/Hz]

Totala bruset är brus/Hz N_0 multiplicerat med bandbredden. Därför är det lämpligt att härleda formler för brustätheten N_0 .

Boltzmanns konstant multiplicerat med 290 K blir -204 dBW. Sedan korrigeras detta med verklig brustemperatur relaterat till 290 K.

Om antennen fångar in brus motsvarande brustemperaturen 290 K så som är fallet vid all radiomottagning utom vid satellit-TV när parabolen är riktad mot himlen, blir den andra termen lika med brusfaktorn F uttryckt i dB.

Viktigt att räkna med rätt värde på T_a

Om vi förbättrar F från 1,2 dB till 0,8 dB i en ficktelefonmottagare vars antenn fångar upp 290 K, minskar totala bruset 0,4 dB. Detta innebär att vi klarar oss med 0,4 dB svagare antennsignal. Men detta är knappt märkbart.

Om vi i stället förbättrar F från 1,2 dB till 0,8 dB i en satellitmottagare ansluten till en parabolantenn riktad mot himlen ($T_a = 20$ K), kommer totala bruset att minska 1,57 dB.

Ett annat sätt att åstadkomma samma förbättring av S/N är att behålla mottagaren med $F = 1,2$ dB och i stället höja nivån på den önskade signalen, genom att öka diametern på parabolantennen med 20%. Detta motsvarar 1,57 dB högre antennvinst.

Bruseffekt som fångas upp

av antennen:
$$N_a = kT_a B$$

Bruseffekt som bildas i

radiomottagaren:
$$N_m = kT_m B$$

Total bruseffekt:

$$N = k(T_a + T_m) B$$

$$N_0 [W / Hz] = kT = k \cdot 290 \frac{T_a + T_m}{290}$$

Summan av antennbrus och mottagarbrus, uttryckt som bruseffekt per Hertz

$$N_0 [dBW] = -204 + 10 \log \frac{T_a + T_m}{290}$$

Summan av antennbrus och mottagarbrus, uttryckt som bruseffekt per Hertz, i dBW. Denna formel måste användas om du räknar på satellitmottagning med parabol riktad mot himlen.

Om antennen fångar upp jordklotets brusstrålning ($T_a = 290$ K) blir formeln:

$$N_0 [dBW] = -204 + 10 \log \frac{290 + T_m}{290}$$

och vi kan direkt använda mottagarens brusfaktor F uttryckt i dB.

$$N_0 [dBW] = -204 + F [dB]$$

Anm.: Antennbruset påverkas ej av antennvinsten eftersom bruset kommer från en strålningskälla som täcker "hela himlen". Högre antennvinst innebär kraftigare brus från den del som täcks av antennloben. Samtidigt ger högre antennvinst en smalare lob. Antennen fångar in brus från "färre brus-källor".

15 — HUR HÖG SÄNDAREFFEKT BEHÖVS?

Den första boken om
DIGITAL RADIO

Signal/brus-förhållande S/N

Vid TV-mottagning vill vi att bildsignalen skall vara ett visst antal gånger starkare än bruset så vi slipper störande brus i bilden. Vid analog TV är detta förhållande 1000 ggr, S/N = 30 dB.

$$\frac{S}{N} = \frac{P_m}{N_0 \cdot B}$$

$$\Rightarrow P_m = \frac{S}{N} \cdot N_0 \cdot B$$

$$P_m [\text{dBW}] = \frac{S}{N} [\text{dB}] + N_0 [\text{dBW}] + 10 \log B [\text{Hz}]$$

Mottagarkänsligheten beror av S/N, brustätheten och bandbredden

TV

En typisk TV-mottagare har brusfaktorn $F = 5$ dB (digitala kretsar i moderna TV-apparater ger radiostörningar, brus) och bandbredden 5,5 MHz. Med dessa siffror blir $P_m = -101,6$ dBW.

$$P_m [\text{dBW}] = 30 - 204 + 5 + 10 \log 5,5 \cdot 10^6$$

$$P_m [\text{dBW}] = -101,6 [\text{dBW}]$$

NMT

Vid analog mobiltelefoni (NMT) vill vi ha S/N = 18 dB före FM-detektorn. Antag brusfaktorn $F = 10$ dB (ett högt värde, men dämpning i antennfiltret, duplexfiltret, ökar brusfaktorn). Bandbredden är 16 kHz. Detta ger $P_m = -134$ dBW.

$$P_m [\text{dBW}] = 18 - 204 + 10 + 10 \log 16 \cdot 10^3$$

$$P_m [\text{dBW}] = -134 [\text{dBW}]$$

FM-rundradio

Vid FM-rundradio vill vi ha S/N ca 30 dB före FM-detektorn. Detta värde förbättras till 56 dB efter FM-detektorn (bredbandig FM). Antag $F = 10$ dB (FM-mottagning i bil med tändstörningar, eller i hemmet med ineffektiv antenn). Bandbredden är 200 kHz. Detta ger $P_m = -111$ dBW.

$$P_m [\text{dBW}] = 30 - 204 + 10 + 10 \log 200 \cdot 10^3$$

$$P_m [\text{dBW}] = -111 [\text{dBW}]$$

Mottagarkänsligheten beror på S/N och B

Önskat signal/brusförhållande och bandbredden blir helt avgörande för mottagarkänsligheten och därmed även för sändareffekten och räckvidden.

Digitala signaler

Vid mottagning av digitala signaler räcker det om mottagaren kan avgöra om signalen är "etta" eller "nolla". Själva bruset matas inte vidare till högtalaren. Digitala system klarar sig därför med lägre S/N.

Den digitala detektorn karakteriseras inte av S/N, utan av energi per databit E_b i förhållande till brustätheten N_0 . Därför skriver vi P_m som E_b multiplicerat med R , bithastigheten.

C/I

Vidare talar man inte om signal/brus utan om Carrier (bärvåg)/Interference (störning). Ur detta beräknar vi mottagarkänsligheten på vanligt sätt.

$$\frac{S}{N} = \frac{C}{I} = \frac{P_m}{N_0 \cdot B} = \frac{E_b \cdot R}{N_0 \cdot B}$$

$$\frac{C}{I} [\text{dB}] = \frac{E_b}{N_0} [\text{dB}] + 10 \log \frac{R}{B}$$

$$P_m [\text{dBW}] = \frac{C}{I} [\text{dB}] - 204 + F [\text{dB}] + 10 \log B [\text{Hz}]$$

GSM

GSM-mottagarens datadetektor behöver $E_b/N_0 = 8,3$ dB för den bitfelshalt som kan tolereras av GSM-kodningen. Datahastigheten är 270 kbit/s och bandbredden 200 kHz. Detta ger C/I = 9,6 dB.

Antag brusfaktorn $F = 7$ dB, något bättre än NMT eftersom GSM inte behöver lika komplicerat antennfilter. Då kan vi beräkna mottagarkänsligheten till -134,4 dBW.

I GSM-specifikationen sägs att mottagaren skall ha känsligheten -104 dBm.

DECT

DECT liknar GSM med skillnaden att datahastigheten är 1,152 Mbit/s och bandbredden ca 1,5 MHz. Detta ger C/I = 7,2 dB, och mottagarkänsligheten blir 128 dBW.

Denna mottagarkänslighet har uppmätts på DECT basstationer. DECT-specifikationen kräver bara -86 dBm för att ge möjlighet att använda en enklare datadetektor och ineffektiv inbyggd antenn på handenheten. Känsligheten -92 dBm är typisk på en handenhet.

Vid beräkning av mottagarkänslighet finns bandbredden B både vid beräkning av C/I och vid beräkning av P_m . Ett enklare sätt är att räkna enligt nedan. Orsaken till varför jag går via C/I är att visa vad som händer om vi vill öka datahastigheten R , se nästa sida.

$$P_m [\text{dBW}] = \frac{E_b}{N_0} [\text{dB}] - 204 + F [\text{dB}] + 10 \log R [\text{b/s}]$$

Om vi vill öka datahastigheten inom samma bandbredd?

Vad händer med mottagarkänsligheten om vi ökar datahastigheten i GSM-systemet men behåller bandbredden 200 kHz per frekvenskanal?

Dubbla datahastigheten

GSM-systemets modulator kan användas till att överföra 2 bit per symbol, 540 kbit/s. Detta innebär att C/I ökar till det dubbla, eftersom R skall vara dubbelt så hög, dvs från 9,6 dB till 12,6 dB.

Övriga värden vid beräkning av mottagarkänsligheten är oförändrade. Därför blir mottagarkänsligheten -131,4 dBW, vilket är 3 dB sämre. Sändareffekten behöver ökas från GSM-systemets 2 W till 4 W för samma räckvidd.

Att gå upp till 2 bit per symbol på oförändrad bandbredd innebär DQAM-modulering som ger både fas- och amplitudändring. Då krävs att sändarslutsteget är linjärt. När GSM specificerades kunde man inte bygga linjära ficktelefonslutsteg med hög verkningsgrad. Strömförbrukningen skulle blivit alldeles för hög och påverkat samtaltiden. I dag klarar man detta.

Tredubbla datahastigheten

Vid 3 ggr så hög datahastighet, 810 kbit/s, behöver datadetektorn $E_b/N_0 = 11,7$ dB (8 bit per symbol), och C/I blir 17,8 dB. Mottagarkänsligheten blir 8,2 dB sämre. Man behöver 6,6 ggr högre sändareffekt, från 2 W till 13,2 W, för samma räckvidd.

Fyrdubbla datahastigheten

När datahastigheten ökas 4 ggr till 1,08 Mbit/s behöver datadetektorn $E_b/N_0 = 15$ dB (16 bit per symbol), och C/I blir 22,3 dB. Mottagarkänsligheten blir 12,7 dB sämre. Sändareffekten måste ökas 18,6 ggr från 2 W till 37 W för samma räckvidd.

6 gånger

Vid 6 ggr, 1,62 Mbit/s behöver datadetektorn $E_b/N_0 = 20,8$ dB, vilket ger C/I = 29,9 dB och mottagaren blir 20,3 dB okänsligare. Sändareffekten måste ökas till 214 W.

Högre datahastighet om det finns bandbredd?

Om vi vill öka datahastigheten och har obegränsat med bandbredd, då använder vi GSM-tekniken där datadetektorn behöver $E_b/N_0 = 8,3$ dB. Genom att öka bandbredden i takt med ökad datahastighet får vi alltid samma C/I, nämligen 9,6 dB. Men mottagarkänsligheten minskar i takt med ökad bandbredd.

Dubbla datahastigheten

Mottagarens känslighet minskar 3 dB. Vi behöver 4 W sändareffekt och 400 kHz bandbredd (se detta som två parallellkopplade system). Eller vi övergår till 2 bit per symbol enligt föregående och behöver 4 W sändareffekt och 200 kHz bandbredd (QAM-modulering, två system på samma bärvågsfrekvens, med samma bandbredd).

Tredubbla datahastigheten

Mottagarens känslighet minskar 4,8 dB. Vi behöver 6 W sändareffekt och 600 kHz bandbredd.

Fyrdubbla datahastigheten

Mottagarens känslighet minskar 6 dB. Vi behöver 8 W sändareffekt och 400 kHz eller 800 kHz bandbredd.

Högre datahastighet innebär ALLTID sämre mottagarkänslighet!

Tyvärr finns ingen möjlighet att byta sändareffekt mot bandbredd när vi kommit ner till en bit per symbol.

Hög datahastighet innebär antingen hög symbolhastighet, men då behövs ett brett mottagarfilter som släpper igenom signalspektrat, och dessutom släpper igenom mycket brus. Då måste mottagarens insignal ökas för att inte drunkna i bruset.

Eller också använder man flera databitar per symbol och klarar sig med låg symbolhastighet, låg bandbredd. Men då måste mottagarens insignal ökas eftersom mottagaren skall kunna särskilja fler utseenden på symbolen.

Högre datahastighet innebär alltid sämre mottagarkänslighet.

16 — NYA MÖJLIGHETER ÖPPNAR SIG

I analoga system behöver alla all tid

Analoga mobiltelesystem använder FDD, Frequency Division Duplex, vilket innebär att vi behöver två olika frekvensband för att klara samtidig kommunikation i båda riktningarna (sändning och mottagning).

Dessutom behöver analoga system FDMA, Frequency Division Multiple Access, dvs varje samtal måste ha egna frekvenskanaler i de båda frekvensbanden.

Men inte i analog TV

Vid analog TV-sändning stjälar man tid mellan bilderna. Detta kan man göra av två orsaker: Det finns viss efterlysning i bildröret som gör att bilden "hänger kvar" tills nästa bild kommer. Det andra är att ögat inte uppfattar det korta avbrottet.

På detta sätt delar man på tiden, TD, Time Division: Viss del av tiden går åt till att sända bildinnehållet, resten av tiden används bl a för en datakanal: Text-TV.

TD förutsätter två villkor: Det måste gå att sända informationen för snabbt, och det måste finnas någon "minnesfunktion" vid mottagningen som "jämnar ut".

TD vid tal

Om Time Division skall användas vid tal måste vi konstruera dessa båda funktioner eftersom vi inte kan prata på detta sätt. Vi måste skapa något som sänder informationen "för fort" så att det blir tid över, och vi behöver "minnesfunktionen" som slätar ut vid mottagningen.

Tidluckor

Man delar upp tiden och kallar varje liten tidsdel för en tidlucka.

"Burst", datapaket

I den tidlucka jag fått mig tilldelad sänds mitt tal med för hög datahastighet, så att alla databitar hinner iväg. Dessa databitar kal-

las "burst", skur, men jag använder ordet "datapaket" i boken. Det förekommer inom telefonin att ordet tidlucka används även för själva datapaketet. Vid en 2 Mbit/s-förbindelse med telefonsamtal är tidluckan lika lång som datapaketet. Men vid mobiltelesystem som använder TD måste det finnas lite "tomrum" runt varje datapaket eftersom det inte går att exakt centrera datapaketet i själva tidluckan. Därför är datapaketet aningen kortare än själva tidluckan.

Man sparar inte bandbredd

Om 8 sändare sänder med låg datahastighet blir frekvensbehovet 8 gånger bandbredden hos varje enskild sändare.

Om en sändare ger varje användare en åttondel av tiden och han då sänder med 8 ggr så hög datahastighet blir bandbredden 8 ggr så bred.

Däremot sparar man på antalet basstationssändare eftersom varje sändare tar hand om 8 simultiga samtal.

TDD och TDMA

På detta sätt kan man dela på tiden, dels för att åstadkomma de två samtalsriktningarna, TDD, Time Division Duplex, dels för att skapa tidluckor för många simultiga samtal, TDMA, Time Division Multiple Access.

GSM är en blandning

GSM har behållit FDM, två frekvensband för att skapa de båda samtalsriktningarna (TDM innebär dubbla datahastigheten vilket ger kortare räckvidd). Men däremot utnyttjar GSM TDMA-tekniken för att kunna hantera upp till 8 simultiga samtal på varje basstationssändare (någon eller några av kanalerna används för signalering, varför antalet simultiga samtal i verkligheten är något lägre).

Simplex

Telegrafi — en riktning i taget

Först kommunicerade man med morse-telegrafi. En bärvåg styrdes med morse-nyckel. Och radiostationen arbetade i simplex. Antingen sände man eller också lyssnade man. Men inte samtidigt.

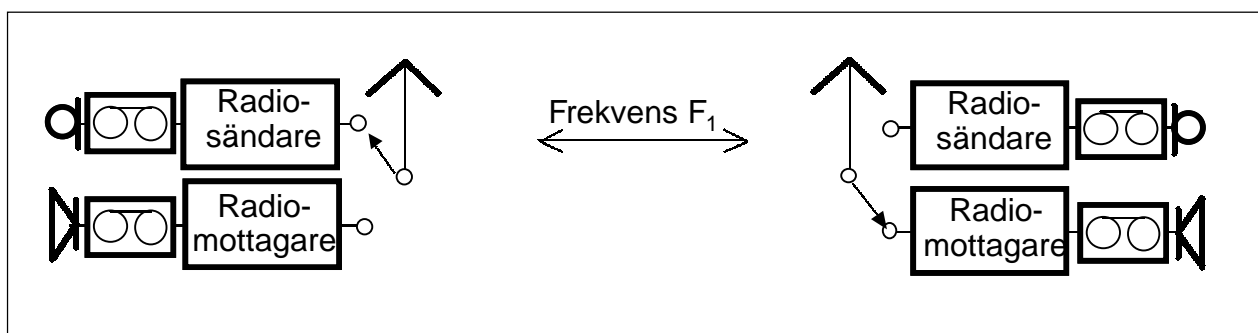
Privatradio — en riktning i taget

Sedan kom radiosändare för tal. Radiostationerna var fortfarande konstruerade för simplex-trafik, på samma sätt som 27 MHz

privatradio, eller 157 MHz VHF båtradio. Man trycker på sändningstangenten när man skall prata och släpper när man vill lyssna. Detta kräver trafikdisciplin. "En i taget".

Simplex

I datasammanhang betyder simplex att man bara kan kommunicera i en riktning. I radiosammanhang betyder simplex, och har betydelse ända sedan radios barndom, att man kommunicerar i en riktning i taget.



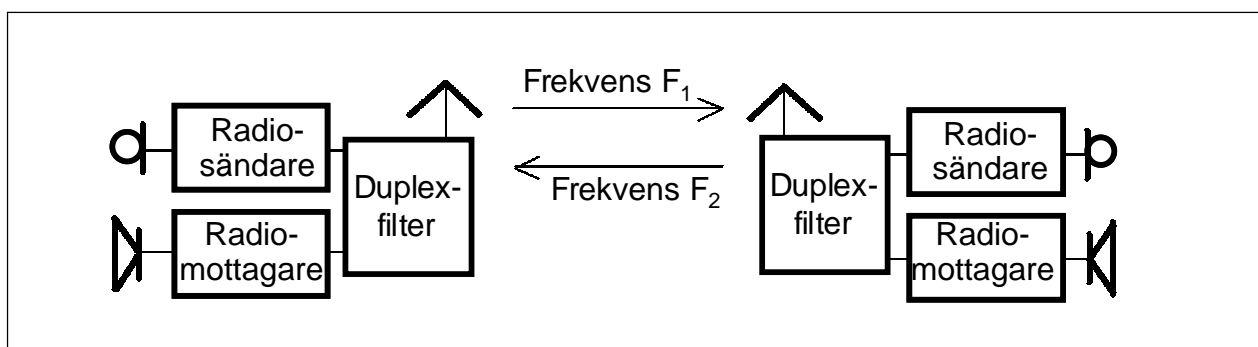
Duplex

Sändning och mottagning måste ske samtidigt

Alla analoga mobiltelefoner/trådlösa telefoner har en sak gemensamt. För att tal skall kunna överföras i båda riktningarna samtidigt måste man sända och ta emot samtidigt. För att inte radiomottagaren skall störas av den egna sändaren behövs två frekvensband. Ett för sändning från bas till mobil (nedlänk), ett annat för sändning från mobil till bas (upplänk).

Duplexfilter

Om gemensam antenn skall användas för sändning och mottagning behövs ett duplexfilter, ett filter som sårar på frekvenserna till radiomottagaren respektive från sändaren.



Duplex vid digital radio

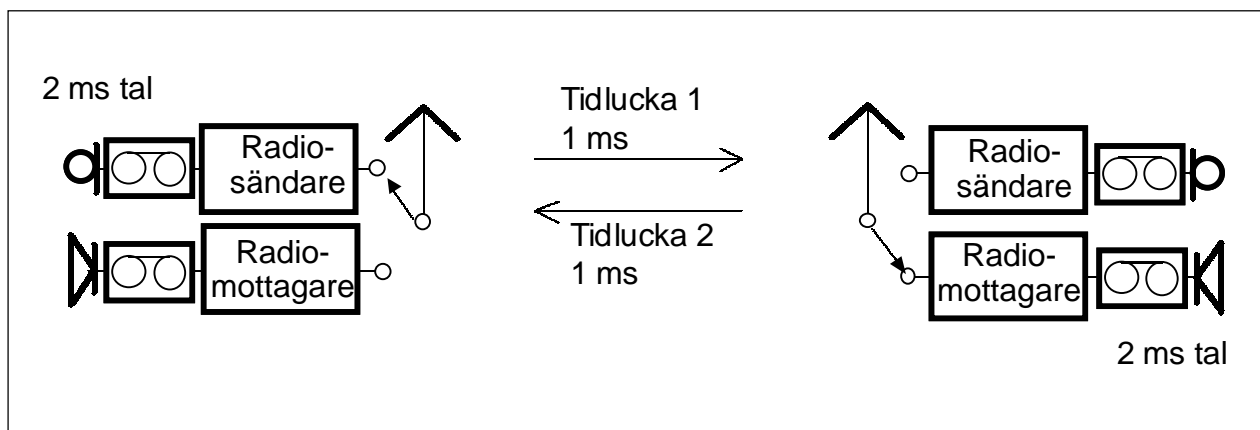
Använd "bandspelare"

Om talet spelas in på en bandspelare, säg att 2 ms tal spelas in, och man backar bandet och spelar upp det med dubbla hastigheten, kommer 2 ms tal att sändas under 1 ms.

Mottagaren tar emot talet under 1 ms, spelar in det på sin bandspelare, backar bandspelaren och spelar upp med halva hastigheten.

Nästan så här gör man vid digital radio. 2 ms tal digitaliseras och lagras i ett dataminne. Sedan läser man databitarna med dubbla hastigheten och matar databitarna till sändaren, som sänder under 1 ms.

Mottagaren tar emot databitarna, matar dem till ett dataminne och kan i vissa fall direkt börja läsa ut databitarna med halva hastigheten (CT2), alltså ingen ytterligare fördröjning. Vid GSM behöver mottagaren ta emot all information innan utmatningen kan starta.



Fördel: blir simplex

Man ser direkt en fördel. Eftersom sändaren bara sänder under 1 ms trots att det är 2 ms tal som överförs, så blir det 1 ms över. Under denna tid sänder vi i andra riktningen. Vi har alltså fått simplex i luften, men duplex, samtidigt talande och lyssnande för användaren.

Den digitala telefonen sänder inte och tar emot samtidigt. Det behövs inget duplexfilter. Dessutom kan man använda samma frekvens i båda riktningarna, något som utnyttjas av CT2 och DECT.

Nackdel: fördröjning

Nackdelen är uppenbar: Eftersom vi måste spela in, backa bandet och spela upp, blir det fördröjning.

Fördröjning uppstår alltid i digitala system. Däremot går det att få olika lång fördröjning beroende på hur systemet är specificerat. GSM har lång fördröjning medan CT2 och DECT har kort fördröjning.

Fler tidluckor: lyssna på annan bas, MAHO

Om man sänder det buffrade talet med tredubbla hastigheten i luften får man tre tidluckor: en för sändning, en för mottagning, och ytterligare en tidlucka. I denna extra tidlucka kan mobilen lyssna efter andra basstationer och hjälpa att finna bästa basstation när man behöver koppla över till annan basstation. Mobilen hjälper vid "hand over", Mobile Assisted Hand Over (MAHO).

DECT

Om man sänder i luften med 24-dubbla hastigheten kan 12 simultana telefonsamtal dela på en enda basstation. I analoga mobiltelefonsystem behövs en sändare/mottagare för varje samtal. Digitaltekniken ger möjlighet att ha flera samtalskanaler på varje sändare/mottagare.

GSM

Följande villkor bestämde specifikationen av GSM-systemet:

- Man hade reserverat två frekvensband i 900 MHz-bandet för ett europeiskt mobiltelesystem. Därför skall två frekvenser användas, en från bas till mobil, den andra från mobil till bas.

GSM-ficktelefonen skall lyssna under en tidlucka, byta frekvens till sändning, sända under en tidlucka, byta frekvens och lyssna på annan basstation, byta frekvens tillbaka till mottagning, se bilden.

- Den tid som ficktelefonen behöver för att göra frekvensbyte bedömdes till 1 ms. Detta beror på att sändar- och mottagarfrekvenserna bestäms av en faslåst loop som behöver tid att stabilisera sig efter varje frekvensbyte.
- GSM-mottagaren skall klara långa reflexer, men reflexerna får inte förändras under tidluckan. Eftersom GSM ficktelefonen skall kunna användas i bil och på tåg kan tidluckan inte göras längre än ca 0,5 ms. (**Tidluckan blev 0,577 ms**)

Dessa villkor ger en ramlängd på 4,5 ms (**ramlängden blev 4,615 ms**).

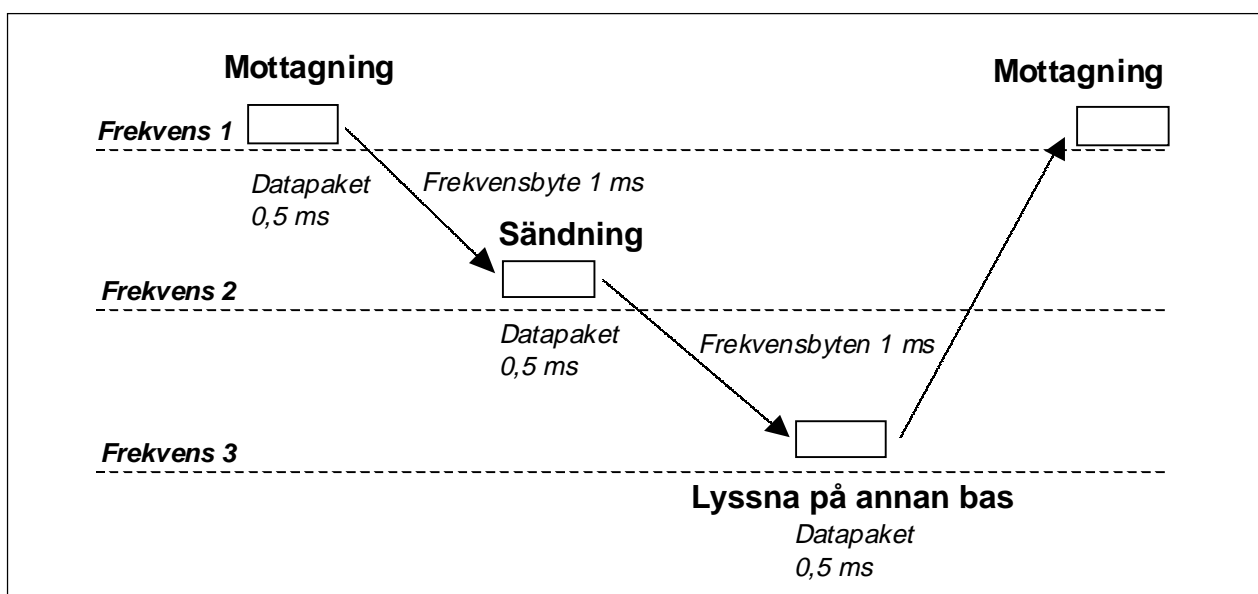
Med ramlängden 4,5 ms och tidluckor på 0,5 ms får man plats med max 9 tidluckor (det blev **8 tidluckor**).

- Man ansåg att GSM-mottagarens utjämnare (tar hand om långa reflexer) måste klara långa reflexer på upp till 16 μ s fördröjning (4,8 km extra gångväg).
- Utjämnarens komplexitet beror på hur många databitar som hunnit komma innan ekot når fram. Man ansåg sig klara 4 databitars fördröjning. Vid fler databitar behövs fler programinstruktioner till processorn som slukar mer energi, vilket minskar drifttiden mellan batteriladdningar.

Fyra databitar på 16 μ s ger bithastigheten 250 kbit/s (**bithastigheten blev 270 kbit/s**).

0,577 ms per tidlucka multiplicerat med 270 kbit/s blir 156 databitar. Men det behövs lite tomrum runt varje datapaket, "guard space", eftersom det är svårt för sändaren att centrera datapaketet i tidluckan. Därför minskades **datapaketet till 148 databitar**.

- Man ansåg sig kunna acceptera totalt 85 ms fördröjning. Detta gav möjlighet att använda **40 ms till "interleaving"**, en teknik för att skydda sig mot korta reflexer.



17 — TALKODNING

Datorn som kan tala

Tänk dig att du gör en dator som kan tala. Det finns datorprogram som läser text och omvandlar detta till "syntetiskt" tal. Då behöver du inte skicka talspänningen över radioförbindelsen utan bara bokstäverna som styr datorn som kan tala.

Nog för att man kan omvandla bokstäver till tal. Men det är inte lika lätt att omvandla talet till bokstäver. Därför skickar man inte vanliga bokstäver på radioförbindelsen utan specialstyrtecken som är anpassade till tal.

Så här gör GSM. Man skickar i medeltal 3600 bit/s som styrinformation till en dator som kan tala. Fast databitarna blir något fler med felrättningsbitar (kanalkodning). Och bitarna skickas i "bursts", skurar, datapaket.

Men det är inte särskilt angenämt att lyssna till den syntetiska rösten från en talande dator. Och man kan omöjligt känna igen vem som talar. Och att känna igen rösten är viktigt vid telefonsamtal. Hur skall man annars veta att man talar med rätt person?

Röstigenkänningsignal

Därför skapar ficktelefonsändaren en "röstigenkänningsignal" genom att jämföra hur den talande datorn låter med den verkliga rösten från den som talar. Denna skillnadssignal, som innehåller sådant som är väsentligt för att vi skall känna igen vem som talar, denna skillnadssignal kodas till 9600 bit/s och adderas till de övriga databitarna.

Totalt överförs i GSM-systemet 13 kbit/s information som kanalkodas och skickas iväg i datapaket.

Farmor fyller år

Tänk dig det klassiska: Farmor fyller år. Du har radat upp alla barnen framför telefonen, håller upp luren, och barnen sjunger "ja må hon leva". Vad tror du den talande datorn gör? Ännu värre — vad gör datorn om du får barnen att sjunga fyrstämmigt!

Man har lärt den talande datorn att tala som EN människa. Detta är svårt nog med alla skillnader i rösten mellan olika individer. Plötsligt skall datorn simulera fyra par stämband samtidigt!

Avancerad kodning för att minska bithastigheten ger alltid begränsningar. Tänk dig TV. Antag att någon kommit fram till att merparten av alla snabba rörelser i TV-bilden sker horisontellt. Alltså minskar man bithastigheten genom att begränsa kodarens möjligheter att återge vertikala rörelser. Och ingen ser någon skillnad trots den låga bithastigheten ända tills du själv skall vara med i TV och börjar hoppa upp och ner framför kameran.

Kodning

Kodarens uppgift är att koda informationen i digital form. Det finns talkodare som kodar tal, bildkodare som kodar bilder osv.

Talets frekvensspektrum kan begränsas

När talad information skall överföras har man upptäckt att det räcker att överföra frekvenser som ligger inom 300 – 3400 Hz.

Frekvenser under 300 Hz återskapas av den mänskliga hjärnan när vi hör övertoner.

Frekvenser över 3400 Hz bidrar inte i någon större utsträckning till talförståelsen (om man bortser från skillnad mellan "s" och "f"). Däremot finns andningsljud m m som skapar en känsla av närhet. Även lågt bakgrundsbrus är viktigt för närhetskänslan.

Talkodaren för fasta telenätet, PCM

- Talkodaren för fasta telenätet är en vågformskodare, som känner av (samlar) tal-signalens amplitud 8000 ggr per sekund. Teoretiskt får man med frekvenser upp till 4000 kHz men genom att filtrera vid 3400 Hz undviks "vikningsdistorsion" som innebär att t ex 4100 Hz blir 3900 Hz när man återskapar den analoga signalen.
- Spänningen i varje sample beskrivs med 7 databitar (128 spänningsnivåer), och ytterligare en databit används för polariteten, plus eller minus. De 128 spänningsstegen är inte lika stora, utan mindre vid låg amplitud och större vid hög amplitud. Detta ger god återgivning, låg distorsion, även vid svaga ljud.

Krav på talkodare för mobiltelefoni

I radiosystem är hög bithastighet "dyrt". Anningen behövs hög sändareffekt vilket medför att signalen "skräpar ner" över stor yta, eller också behövs hög bandbredd och signalen belägger en större del av frekvensspektrat. Därför vill man koda talet till så låg bithastighet som möjligt.

• God grundkvalitet

Men trots låg bithastighet krävs att talet skall låta bra i normalfallet, dvs vid felfri bitöverföring.

• Robust mot bitfel

Vid mobiltelefoni får man räkna med enstaka bitfel/skurfel titt som tätt. Kodningen får inte innebära att någon bit är så viktig att om den blir fel vet dekodern inte alls vad den skall göra under lång tid ("bredning av avbrottet").

• Robust mot bakgrundsstörningar

En sak är att kodaren klarar det den skall göra, koda tal från en person. Men vad händer om man matar kodaren med signaler som den inte är byggd för att klara?

• Låg fördröjning

Vid bildkodning studerar man många bilder i följd och ser till att de bilddelar som återkommer i varje bild bara sänds en gång.

På samma sätt med tal. Tillräcklig mängd tal skall samlas in, sedan skall talet bearbetas. Först därefter får man ut talet i kodad form. Det blir fördröjning.

• Låg komplexitet

För att utföra kodningen måste talsignalen bearbetas i en mikroprocessor (signalprocessor). Energiförbrukningen från batteriet är direkt proportionell mot antalet operationer som mikroprocessorn måste utföra för att åstadkomma kodningen.

Mikroprocessorerna i ficktelefonen svarar för ungefär halva energiförbrukningen. Det är därför viktigt att klara kodningen med så få operationer som möjligt för att inte taltiden skall reduceras.

Talkodare för mobiltelefoni skall ha låg bithastighet.**Dessutom krävs:**

- God grundkvalitet för den avsedda talsignalen (god talkkvalitet vid felfri bitöverföring)
- Robust mot bitfel (skall klara enstaka bitfel/skurfel utan att ”helt balla ur”)
- Robust mot bakgrundsstörningar (skall klara bakgrundsljud, flera som pratar, musik m m utan att spåra ur)
- Låg fördröjning (så det inte låter som satellitsamtal)
- Låg komplexitet (många programinstruktioner slukar energi, ”drar ström”)

Egentligen skulle man behöva hög bithastighet för att klara detta.

Hur hög bithastighet behövs?

Om man skickar text i stället för tal, och skickar texten i samma takt som man talar, skulle bithastigheten bli ca 60 bit/s. Detta är själva informationen. Men då hör man inte vem som talar.

I fasta telenätet med 8000 sample per sekund avläser man ett nytt spänningsvärde, inom hela spänningsområdet, med 0,125 ms mellanrum. Men det mänskliga talorganet kan inte ändra sig så snabbt. Det är bara högfrekventa komponenter i talspänningen som hinner ändra sig inom 1 ms. Och de högfrekventa komponenterna har låg amplitud.

Differentiell PCM

Vid DPCM, differentiell PCM, kodas skillnaden mellan närliggande sample. Ytterligare minskning av bithastigheten kan åstadkommas om mottagaren får ”gissa” nästa sample enligt en fast regel. Skillnaden mellan gissningen och verkligt värde skickas som korrektion till mottagaren. På detta sätt kan man reducera bithastigheten något.

ADPCM

Vid ADPCM, Adaptiv DPCM, kodas skillnaden mellan närliggande sample med 4 bit, men spänningsstegen mellan de olika nivåerna är inte fasta.

Om jag, för flera sample i rad, bara använder t ex max en bit för att beskriva spänningsförändringen, förstår mottagaren att spänningsvariationerna är små. Då övergår den till låg spänning mellan varje kvanti-

seringsnivå.

Om jag å andra sidan, för flera sample i rad, använt maximalt antal bit för att beskriva en spänningsförändring i en riktning förstår mottagaren att ”nu händer stora saker” och övergår till att göra spänningsstegen stora.

CCITT har standardiserat en kodare, 32 kbit/s ADPCM, som ger lika bra återgivning av tal som vanlig 64 kbit/s PCM. Men observera att denna kodare är specialanpassad för tal. Talspänningen hoppar inte mellan max- och min-värde från sample till sample. Men det gör däremot spänningen från en fax eller ett modem.

ADPCM klarar inte andra signal-spänningar än tal

På vissa långdistansförbindelser används 32 kbit/s ADPCM för att få fler, och därigenom billigare telefonförbindelser. Men dessa förbindelser klarar inte fax och modem i högre hastighet än 4,8 eller 7,2 kbit/s. Numera finns därför avkänningsutrustning som detekterar modemens synkroniseringssignalering och kopplar om till 64 kbit/s.

Tidigare kunde man koppla modem till en NMT-telefon och vid god radioutbredning koppla upp sig med 19,2 kbit/s. Sedan ändrades förbindelsenätet ut till basstationerna och man införde 32 kbit/s ADPCM för NMT talförbindelser. I och med detta begränsades hastigheten vid fax och data över NMT till 4,8 kbit/s.

DECT använder ADPCM

På radioförbindelsen används 32 kbit/s ADPCM av bl a CT2 och DECT.

LPC — Linear Predictive Coding

Denna kodningsmetod bygger på att människan analyseras och beskrivs som en luftkälla (lungorna som pressar ut luften), stämband som eventuellt lägger på en ton, och ett filter bestående av mun- och huvudresonanser, som formar signalen.

Som att styra en dator som kan tala

Tänk dig en dator som kan tala, en dator som simulerar lungor, stämband och mun- och huvudresonanser. Den information som överförs på radioförbindelsen är parametrar så att radiomottagaren kan styra sin talande dator på rätt sätt. Det är inte talet, utan styrinformation som skickas på radioförbindelsen.

Jämför med en saxofon. Här finns luftkällan, man blåser. Bladet i munstycket vibrerar, som stämbanden. Denna vibrerande luftström ger upphov till olika ljud beroende på hur filtret ställs in, dvs vilka hål som täcks över.

En klarinett låter annorlunda. Men den har samma typ av luftkälla och munstycke. Bara filtret ser annorlunda ut.

Der räcker att vi överför information om när man blåser, hur starkt, ifall filtret består av saxofon eller klarinett, samt vilka hål som täcks över.

En talkodare av LPC-typ tar normalt 20 ms tal. Man undersöker följande:

- Tonande eller tonlöst ljud
- Frekvens (tonhöjd) om det är tonande ljud
- Styrkan
- Filterkoefficienterna

Genom denna form av kodning kan man åstadkomma förståeligt tal med så låg bit-hastighet som 1,2 – 4,8 kbit/s.

RELP-kodaren (Residual Excited LPC)

LPC-kodaren beskriver egentligen bara styrkan på den luft som kommer från lungorna. Detta ger förståeligt tal, men det är svårt att höra vem som talar (metalliskt). Som att koppla klarinetten till en tryckluftsslang.

Genom att noggrannare analysera luftkällan och överföra en bättre beskrivning får man tillbaka röstens karaktär och kan känna igen vem som talar.

GSM utnyttjar en RELP-kodare

Vid specifieringen av talkodaren för GSM har man ansett det viktigt att kunna känna igen vem som talar.

GSM kodar talsignalen i en LPC-kodare med ungefär 3,6 kbit/s. Sedan jämförs resultatet med originalsignalen. Skillnads-signalen (residual) kodas med 9,4 kbit/s och läggs till så vi får 13 kbit/s.

Detta innebär grovt att luftkällan beskrivs med 9,4 kbit/s, och filterparametrarna med 3,6 kbit/s. Man kan även säga att 3,6 kbit/s används för att överföra informationen och 9,4 kbit/s läggs till för att vi skall höra vem som talar. Förhållandet ändras något efter kanalkodningen där man lägger till felrättningsbitar till de informationsbitar som är viktigast för talförståelsen (man behöver inte känna igen hela tiden, men det är bra om man förstår!).

Det pågår fortlöpande förbättring av GSM-kodaren och dekodern (som omvandlar tillbaka till tal). Dessutom vänjer sig abonnenterna. "Gradvis anpassning från båda håll".

I de digitala mobiltelesystemen finns tidsfördröjning som dessutom blir dubbelt så lång vid samtal mellan två GSM-telefoner. Det är möjligt att tidsfördröjningen är ett större problem än den något lägre tal-kvaliteten. Tidsfördröjningen stör rytmen i samtalet.

CELP

Om vissa kombinationer av ettor och nollor (kodsekvenser) inte förekommer, kan man uppnå kodningsvinst genom att samla alla tänkbara kodsekvenser i en "kodbok".

Över radioväg sänds adresser till kodboken (t ex "sida" och "rad"). På så sätt har man lyckats sänka datahastigheten ytterligare. Denna metod kallas CELP, Code Excited LPC.

D-AMPS och PDC utnyttjar en CELP-kodare.

D-AMPS har en talkodare som lämnar 7,95 kbit/s. PDC-kodaren lämnar 6,7 kbit/s.

"Half-rate"-kodare

Man har konstruerat talkodare som kodar talet så kraftigt att datahastigheten kunnat sänkas till hälften av ovanstående värden. Dessa "half rate"-talkodare uppvisar god tal-kvalitet, men är inte tillräckligt robusta mot bakgrundsstörningar. När det kommer ljud, bakgrundsstörning som musik eller kanske flera samtidiga röster, hittar kodaren ingen lämplig kodsekvens i kodboken. Då "hänger kodaren sig".

System:	Kodningsteknik	datahastighet
Telenätet	PCM	64 kbit/s
CT2	ADPCM	32 kbit/s
DECT	ADPCM	32 kbit/s
GSM	RPE-LTP (RELTP)	13 kbit/s
D-AMPS	VSELP (CELP)	7,95 kbit/s
PDC	VSELP (CELP)	6,7 kbit/s

18 — SKYDD MOT KORTA REFLEXER

Sinusspänningen har den egenheten att om man delar upp växelspanningen på två, och fördröjer ena spänningen en halv period, och sedan lägger ihop dem, blir summan noll.

Vid så gott som all radiokommunikation riskerar man att drabbas av reflexer. Finns inte byggnader som reflekterar signalen så finns alltid marken. Undantaget skulle vara satellitmottagning med parabolantenn där parabolen riktas uppåt eller snett uppåt. Där finns ingen risk för reflexer.

Om vi har reflexer kan summan av signalspänningarna, när de tagits emot av mottagarantennen, bli noll. Observera att signalerna aldrig kan bli noll i luften. Där finns alltid samtliga signaler. Det är först på själva antennen, ja egentligen först på antennkabeln, som spänningarna lägger ihop sig och summan kan bli noll om spänningarna ser lika ut och har rätt amplituder och faslägen.

Men signalen moduleras. Modulering innebär att signalen förändras i tiden. Om reflexen har gått alldeles för lång väg, blivit för mycket tidsfördröjd har moduleringen gjort att signalen ändrat sig så att huvudsignal och reflex inte längre ser lika ut. Då kan de inte bli noll oavsett fasskillnad. Detta är en LÅNG reflex.

Vid KORT reflex drabbas vi av transmissionsavbrott, vi tappar databitar. Vid LÅNG reflex finns alltid signal, två eller flera signaler där informationen, moduleringen, kommer som eko.

Att skydda sig mot korta reflexer innebär att transmissionen måste tolerera korta avbrott.

Vid analoga mobiltelesystem, NMT, hör vi dessa korta avbrott. Oftast kan vi ändå gissa oss till vad motparten sagt. Vi är en intelligent mottagare.

Vid digital kommunikation adderar vi extra databitar som dels skall användas för att avgöra om datapaketet är rätt mottaget. Om så inte är fallet, kan de extra databitarna användas för att på ett intelligent sätt försöka avgöra vilka databitar som är felaktiga.

Va?

Om vi trots vår intelligens inte lyckas gissa oss till vad motparten säger, då säger vi VA, vi frågar om. I datasammanhang kallas detta ARQ, Automatic Request, automatisk omfrågning.

ARQ ger tidsfördröjning och kan därför inte användas vid talöverföring, men måste tillgripas när data skall skickas via mobiltelenät. Vid datakommunikation är kravet att varenda databit skall vara rätt mottagen.

Korta reflexer

Reflexen är kort om den medför att hela signalen försvinner när lika stark direktsignal och reflex hamnar i mottas. Vid lång reflex finns signal, men man har eko.

Frekvensdiversitet

Om direktsignal och reflex hamnar i mottas på en viss frekvens ligger de säkerligen inte i mottas på en annan frekvens, eftersom våglängden är en annan.

Vid analog radio utnyttjar man två samtidigt fungerande analoga radioförbindelser parallellt men på skilda frekvenser, och väljer den mottagna signal som har bästa kvalitet.

Digitala radiosystem kan utnyttja frekvensdiversitet på ytterligare två sätt:

- GSM växlar frekvens mellan varje datapaket. På detta sätt undviker man att tappa flera datapaket i följd. Förlust av enstaka datapaket klaras med kanalkodningen.
- CDMA sänder varje databit på flera olika frekvenser efter varandra. Ett radiosystem, men man byter till flera olika frekvenser under varje databit.

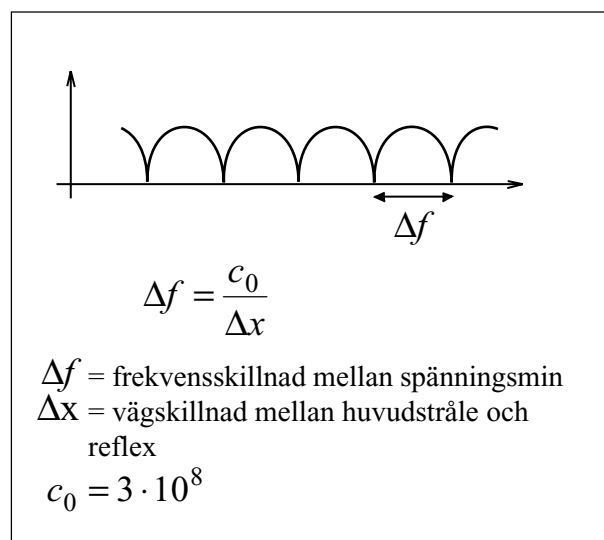
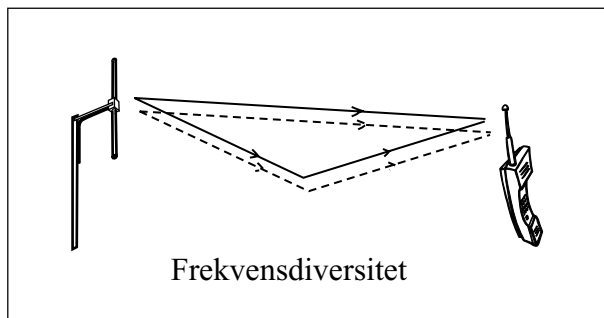
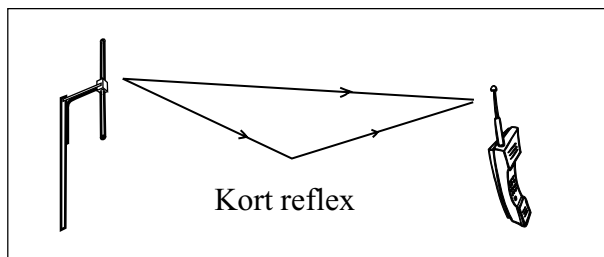
Hur stort frekvenshopp krävs?

Bilden visar hur summaamplituden mellan huvudsignal och reflex varierar när signalerna är lika starka. Här ser vi orsaken till att kort reflex även kallas "selektiv fädning", eftersom signalen är låg bara inom smala (selektiva) frekvensområden.

Av formeln ser man att skillnadsfrekvensen uttryckt som våglängd är lika med vägskillnaden. Säg att man måste hoppa 10% av frekvensskillnaden för att säkert få signal (fasvinkeln ändras 36°).

Om vägskillnaden är 30 m motsvarar detta 10 MHz frekvensskillnad. Vi måste hoppa 1 MHz. En vägskillnad på 10 m motsvarar 30 MHz och vi måste hoppa 3 MHz. Vi ser att ju kortare reflexen är, desto större frekvenshopp krävs för att göra nytta.

- Vid korta reflexer, t ex inomhus, krävs stort frekvenshopp för att göra nytta.
- Det gör inget om både direktsignal och reflex kommer från samma riktning. Frekvenshopp är ändå effektivt.



Bandspridningssystem typ CDMA

Tekniken att sprida signalen över ett bredare frekvensband ger frekvensdiversitet. Men om signalen bara sprids över 1,25 MHz så hjälper inte detta mot reflexer med kortare vägskillnad än ca 30 m.

Rumsdiversitet

Att ha två mottagarantenn placerade ett stycke från varandra och välja den antenn som ger bäst signal, är ett sätt att komma runt inverkan av korta reflexer. Detta används både av analoga radiosystem och digitala. Antingen kan man växla antennledning, eller också kan man ha två kompletta mottagare parallellt och växla efter detektorn. Båda varianterna förekommer såväl i analoga som digitala system.

Rumsdiversitet utnyttjas på basstationer där det oftast finns utrymme att placera antennerna tillräckligt långt från varandra. Tack vare rumsdiversitet har basstationen lättare att uppfatta ficktelefonen. För att förbättra överföringen från bas till ficktelefon sänder basen oftast med högre effekt än ficktelefonen. Detta kompenserar att ficktelefonen inte kan utnyttja rumsdiversitet.

Rumsdiversitet av detta slag används av GSM.

Vinkeldiversitet

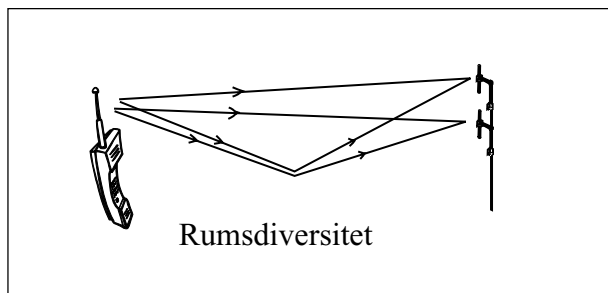
Ficktelefonen kan förses med två antenner med olika riktningsdiagram, eller en antenn där man kopplar om mellan två olika riktningsdiagram. Detta ger vinkeldiversitet.

Rumsdiversitet bygger på att inbördes fasskillnaden mellan huvudsignal och reflex har förändrats på en antenn som placerats ett stycke ifrån.

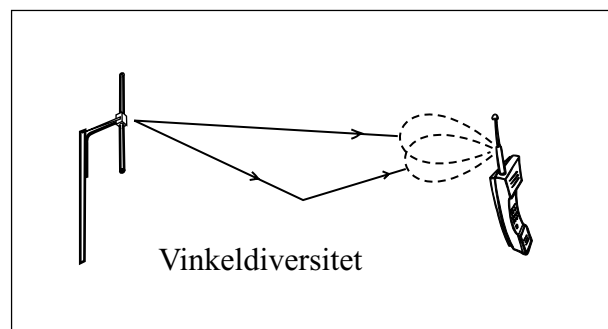
Vinkeldiversitet bygger på att amplitudförhållandet mellan huvudsignal och reflex har förändrats vid mottagning på antenn som har annat riktningsdiagram.

När fungerar rums- och vinkeldiversitet bäst?

I båda fallen, både vid rumsdiversitet och vid vinkeldiversitet, behövs en viss vinkel, som helst skall vara så stor som möjligt, mellan huvudsignal och reflex. Signalerna får inte komma från samma riktning. Däremot gör det inget om vägskillnaden mellan huvudsignal och reflex är extremt kort. Det är bara vinkeln som är avgörande. Detta gör att rums- och vinkeldiversitet är effektivt i små celler, inne bland hus, i byggnader m m, med kort avstånd till basstationen, och många reflekterande ytor.



Rumsdiversitet



Vinkeldiversitet

DECT använder rumsdiversitet på basen

Basstationen i DECT-systemet har två antenner. Eftersom DECT både sänder och tar emot på samma frekvens kommer det bästa antennvalet vid mottagning samtidigt att vara det bästa antennvalet vid sändning, förutsatt att terminalen inte förflyttar sig alltför fort.

Polarisationsdiversitet

En typ av diversitet som åstadkommes på antennen är polarisationsdiversitet. Man har två mottagarantenn, inte vertikalt polariserade, utan den ena har polarisationen vriden 45° åt ena hållet, den andra 45° åt andra hållet.

Om radiosignalen faller in "skevt" mot en reflekterande yta, så vrids polarisationen hos den reflekterade signalen.

Mottagarantennen känner av den del av signalspänningen som projiceras på antennens polarisationsriktning. Om huvudsignal och reflex har olika polarisation, vilket är ganska troligt vid reflexer i städer, kommer förhållandet mellan signalerna att förändras om jag ändrar mottagarantennens polarisation.

Polarisationsdiversitet fungerar både vid extremt korta reflexer och när signalerna kommer från samma riktning.

Skydd mot korta reflexer genom kanalkodning

Korta reflexer innebär att hela signalen försvinner. Om terminalen är i rörelse försvinner signalen under mycket kort tid. Man tappar ett antal databitar (skurfel) eller ett helt datapaket.

Kanalkodning i GSM

Så här skyddar sig GSM mot korta reflexer genom kanalkodning:

- Från talkodaren kommer 50 ggr per sekund 20 ms tal (en talram) som består av 260 databitar, uppdelade på 50 databitar av klass *Ia*, 132 databitar av klass *Ib* och 78 databitar av klass *II*.
- Databitarna av klass *Ia* måste kunna återskapas felfritt i mottagaren. Om dessa databitar innehåller ett enda fel slängs alla 50 databitarna och ersätts med *Ia*-bitarna från föregående talram. *Ia*-bitarna förses med 3 CRC-bitar (checksumma) för felupptäckt.
- Sedan sorterar man in *Ia*- och *Ib*-bitarna i en ram, som faltningskodas. Faltningskoden kan rätta vissa typer av fel. Rättningsförmågan blir störst i början och slutet av ramen, om man lägger till fyra "nollor" som "svans", tail. *Ia*-bitarna har placerats i början och slutet av ramen där rättningsförmågan är störst.
- Denna typ av faltningskodning medför att totala bitantalet växer till det dubbla. Sedan lägger man till klass *II*-bitarna.
- Talramen, som vuxit från 260 till 456 bit "interleavas", dvs databitarna blandas hult om buller som korten i en kortlek. Om en fädningsdipp slår ut flera bitar i följd, så kommer detta, i mottagaren, när bitarna blandats tillbaka, att resultera i utspridda enbitsfel. Dessa är lättare att rätta med faltningskodningen.

- Hela ramen om 456 blandade databitar delas upp i 8 delramar om 57 databitar, och fördelas över 8 tidluckor. Visserligen skulle alla databitar få plats i 4 tidluckor, men genom att fördela bitarna över längre tid ökar sannolikheten att så få delramar som möjligt drabbas av vågutbredningsstörning.

- Om en fädningsdip gör att man förlorar hela datapaketet i en tidlucka, så resulterar detta i förlust av 57 av 456 databitar i två talramar (varje datapaket innehåller databitar från två olika talramar), och 57 databitar som utplaceras som enstaka bitfel kan rättas av faltningskoden.

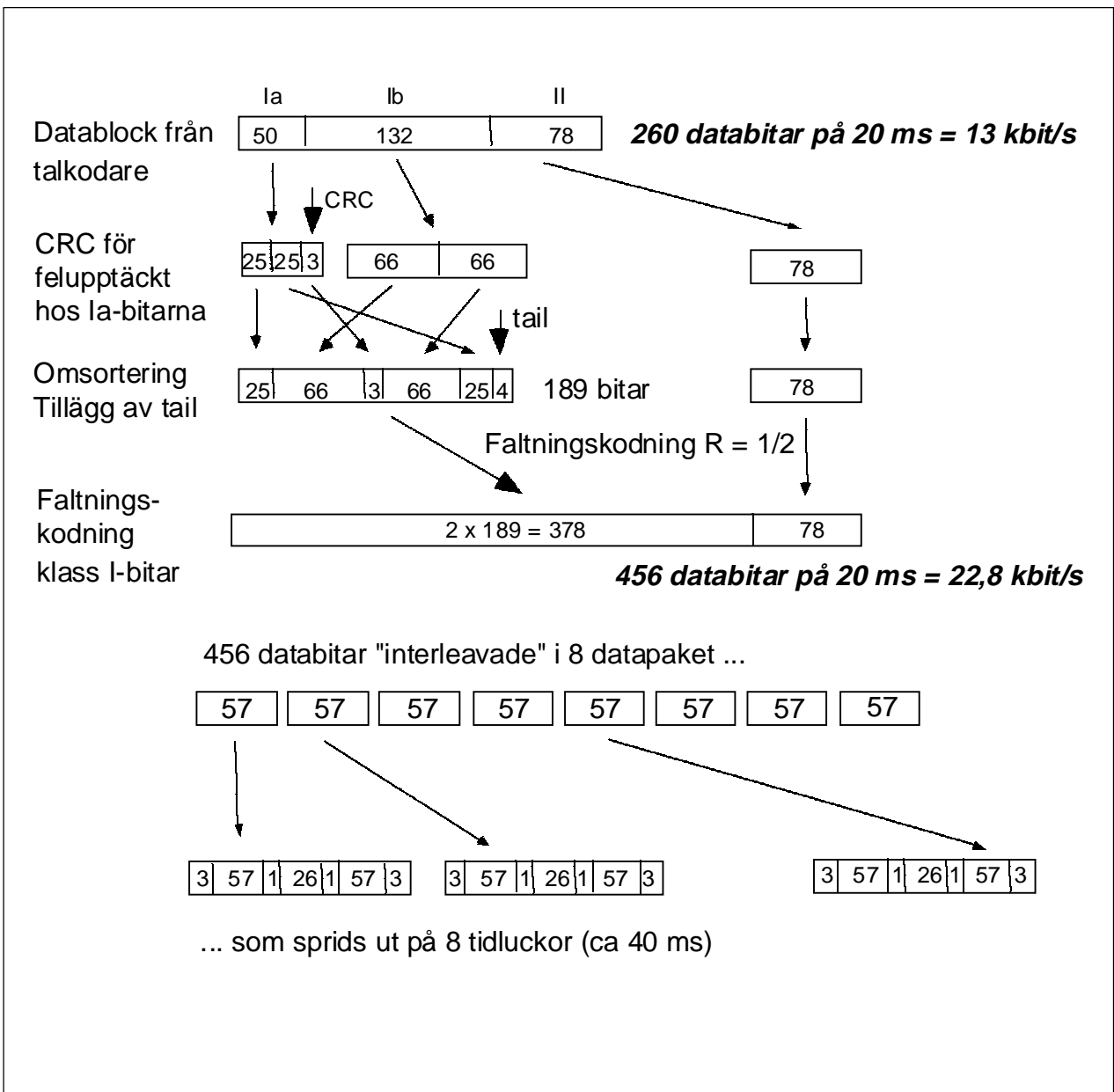
Fungerar bara på en föränderlig transmissionskanal

Observera att kanalkodningen bygger på att man visserligen kan ha korta förbindelseavbrott, men däremellan måste det komma nästan felfria datapaket. Kanalkodningen fungerar därför inte vid stillastående mobilantenn.

Om man använder GSM i fritidshuset med fast monterad antenn på taket, och antennen råkar sitta i en punkt där mottagningen besväras av korta reflexer, då hjälper inte kanalkodningen.

Har du otur och befinner dig i glesbygd med bara en GSM-sändare på basstationen, då finns inte någon alternativ frekvens att skifta till.

Man skall ha klart för sig att GSM-systemet är uppbyggt för att ge bästa möjliga resultat med rörliga terminaler. Ett digitalt system optimerat för fasta förbindelser, t ex för att ersätta fasta telenätet, skall vara uppbyggt på annat sätt.



19 — SKYDD MOT LÅNGA REFLEXER

Skuggbild på TV. Visst är det störande. Och om skuggbilden blir lika kraftig som huvudsignalen. Tänk dig åka omkring inne i stan och försöka se på TV i bilen. Med rundstrålande mottagarantenn. Där har du digital radio och långa reflexer.

Det finns digitala bildbehandlingsprogram som söker igenom bilden efter "likheter", efter sådant som skulle kunna vara ekon, och subtraherar dessa likheter från bilden. Med processorkraft kan man skapa en bild utan ekon.

Men att göra detta på nytt för varje ny bild är onödigt. Ekona kanske inte förändras särskilt mycket från bild till bild. Bättre är att försöka identifiera ekona och sedan använda denna information för varje ny bild. Då har man tagit bort ekona, man har "utjämnat" förbindelsen med en utjämnare (equalizer).

Man kan lära sig

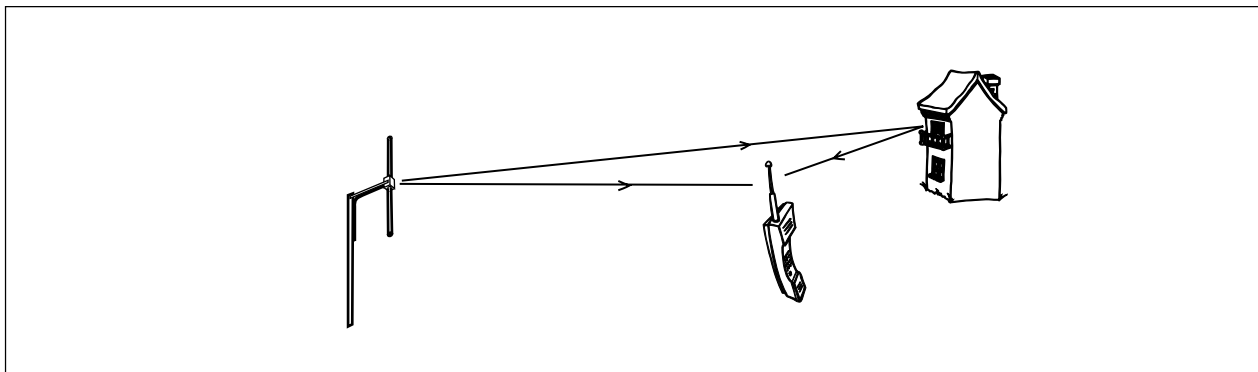
Tänk dig att man före varje bildsekvens skickar testbilden. Nu får du sitta och titta på testbilden. Oavsett hur bilden ser ut, hur många ekon som stör bilden, så talar vi om för dig att det är testbilden du ser.

Nu får du sitta där och titta tills du "ser" testbilden i den gröt som visas på TV-skärmen. Du får sitta där tills du "lärt dig" att när signalen ser ut så här, då betyder det testbild.

Fördelen med denna metod är att vi inte tar bort något ur bilden. Vid föregående metod tog vi bort "störande" element ur bilden. Kvar blev huvudsignalen. Men om huvudsignalen är svag? Då blir det ändå svårt att tyda bilden.

Om du måste lära dig "se bilden" ur gröten på TV-skärmen, använda all signal som kommer fram, även ekona, för att avkoda informationen, då kanske du efter ett tag tycker att det är lättare med ekon än utan ekon. Du lär dig dra nytta av all information, när den än kommer fram.

Så här långt har man kommit inom digital radio.



Långa reflexer

Om reflexen sker så långt bort att den reflekterade signalen blir avsevärt fördröjd, kommer den reflekterade signalen att uppfattas som ytterligare en signal som kommer fram något senare, ett eko. Exempel är "spökbild" på TV.

Vid kort reflex räckte det att flytta ficktelefonen kanske bara några centimeter för att på nytt få signal. Vid lång reflex finns reflexen som ett eko oavsett hur långt man flyttar sig inom det område som bestrålas av både huvudsignal och reflex.

Kort reflex påverkar radiosignalens styrka, lång reflex påverkar modulationen

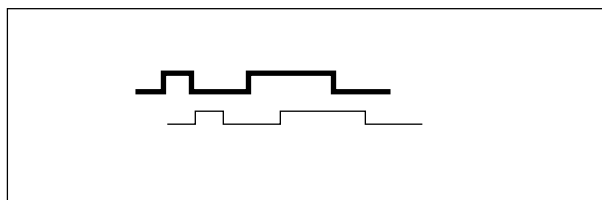
Kort reflex har så kort fördröjning att modulationen, nyttsignalen, inte hunnit ändras när reflexen kommer fram. Vid lång reflex däremot är fördröjningen så lång att nyttsignalen hunnit ändras. Huvudsignalen och ekot är inte längre "lika".

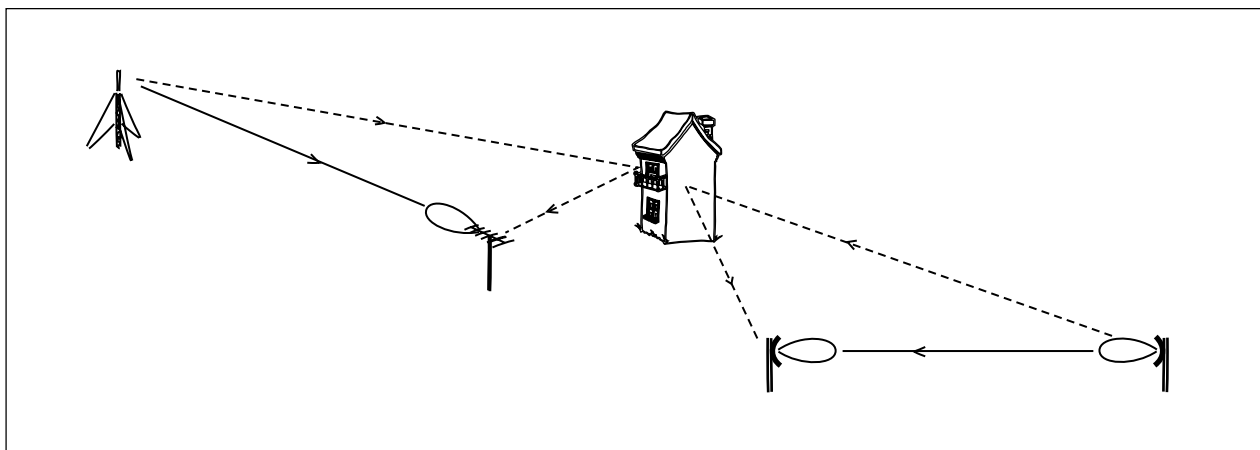
Dispersion — "utsmetning"

Att ekot kommer fram lite senare innebär vid måttlig fördröjning att datasymbolen blir utsmetad, något som kallas dispersion.

Intersymbolinterferens — ISI

Vid längre fördröjning kommer ekot så sent att huvudsignalen redan bär med sig nästa symbol, eller ytterligare nästa. Symbolerna går in i varandra, intersymbolinterferens (ISI).





Riktantenn

Vid radiolänk används riktantenner för att försvaga reflexen, dels sända svagare signal i den riktning långa reflexer kan uppstå, dels se till att mottagarantennen inte är känslig i den riktning ekot kommer från.

Riktantenn enda möjligheten i analoga system

Riktantenn är enda möjligheten att bli av med inverkan av ekon i analoga system. Metoden används vid TV-mottagning för att bli av med spökbild.

Ofta behövs riktantenn även nära sändaren, inte för att signalen är svag, utan för att bli av med spökbilderna.

Riktantenn vid mobiltelefoni

Även vid mobiltelefoni skulle man kunna tänka sig använda riktantenn för att undertrycka långa reflexer. Men detta måste i så fall vara en riktantenn där antennloben "följer" ficktelefonen.

Elektriskt styrda antennlobar (ESA) har börjat användas på basstationer i glesbygd för att öka räckvidden och kunna ha glesare mellan basstationerna.

När tekniken förfinas blir sådana antenner vanliga i tätorter för att öka antalet samtidiga mobiltelefonsamtal i områden där det råder frekvensbrist.

Nästa steg är att använda dessa antenner på platser med extremt starka och långa reflexer, t ex djupa dalgångar med höga berg runtom.

Vid mobiltelefoni kan "smart antenn" i vissa sammanhang minska problem med ISI.

Digital teknik ger nya möjligheter vid långa reflexer

Utjämnare

När en teleförbindelse, det kan vara kabel, det kan vara radio, ger förvrängning av signalen, kan man ansluta en anordning (utjämnare) som ger liknande förvrängning, fast tvärt om. På detta sätt tar förvrängningarna ut varandra och man blir av med förvrängningen. Man återskapar den oförvrängda signalen.

Utjämnare för fasta förbindelser

Att konstruera utjämnare för fasta förbindelser är visserligen inte helt okomplicerat, men vid en fast förbindelse är förvrängningen konstant. Utjämnaren justeras och sedan fungerar det hela.

Dynamisk utjämnare för mobiltelefoni

Vid mobiltelefoni ändras förvrängningen hela tiden. Därför krävs av en utjämnare för mobiltelefoni att den följer med i transmissionskanalens förändringar.

Utjämnaren i GSM

GSM har ett mycket avancerat skydd mot långa ekon så länge tidsfördröjningen understiger 4 databitar, 16 μ s. 16 μ s motsvarar ett eko som gått 4,5 km längre väg.

Mitt i GSM-datapaketet ligger en "läresekvens" om 26 databitar, där bitmönstret är känt på förhand. Med hjälp av detta bitmönster ställer GSM-mottagaren in sin utjämnare. Sedan går mottagaren tillbaka och börjar avkoda från början av datapaketet, som lagrats i minne.

Vid specificeringen av GSM-systemet var kravet att datapaketet inte skulle vara längre än 0,5 ms. Detta för att samma inställning av utjämnaren skall fungera över hela datapaketet. Utjämnaren är alltså fast över ett datapaket, men dynamisk från paket till paket.

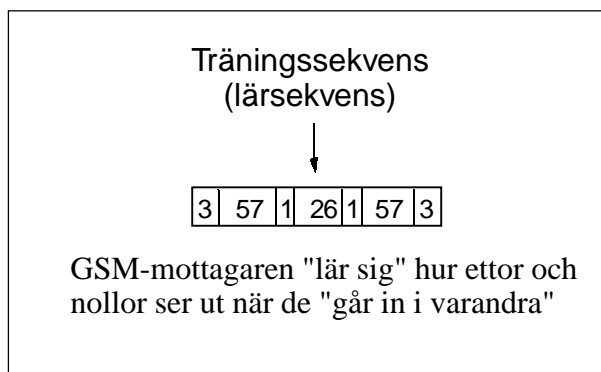
D-AMPS har verkligt dynamisk utjämnare

I amerikanska digitala mobiltelesystemet D-AMPS är datapaketet 6,6 ms långa. Där ställer utjämnaren om sig från databit till databit. Utjämnaren följer förändringarna under hela datapaketet.

Långa reflexer en fördel

Utjämnaren hjälper inte bara att särskilja huvudsignal från reflex, utan både huvudsignalen och ekona bidrar när mottagaren skall avgöra om den tagit emot en "etta" eller "nolla".

Två signaler lite tidsförskjutna ger en form av "tidsduplex". Det ser ut som om signalen sänts två eller flera gånger med tidsförskjutning. På detta sätt har ett fenomen, långa reflexer, som vid analoga radiosystem enbart var av ondo, vänts till en fördel i digitala radiosystem.



20 — DIGITALA RADIOSYSTEM

CT2, DECT, GSM, D-AMPS, PDC

Sammanfattning

Så har vi tagit oss igenom alla de byggbitar som ingår i ett digitalt radiosystem — och avslutar med att titta lite närmare på de digitala radiosystem som finns i drift.

För hundra år sedan och under några årtionden in på 1900-talet lades grunden för överföring av analoga signaler. Den tekniken fulländades under resten av seklet.

Digital radio är egentligen inte en förbättring av de analoga systemen utan snarare början på något helt nytt, som vi ännu bara kan ana.

CT2, DECT, GSM, D-AMPS och PDC, en jämförelse

Trådlösa telefoner

CT2 kan betecknas som det första digitala radiosystemet för allmänt bruk, visserligen bara en trådlös förlängning av hemmatelefonen, men ändå.

Därefter utvecklades och specificerades de digitala mobiltelefonsystemen GSM, D-AMPS och PDC. Först därefter påbörjades specificeringen av DECT.

Medan CT2 är första försöket med digital teknik är DECT en trådlös telefon som utvecklats med allt man lärt sig och alla erfarenheter man fått från utvecklingsarbetet med GSM, D-AMPS och PDC. CT2, det första försöket — och DECT, det senaste.

Kanaldelning

Utvecklingen av GSM är ett europeiskt samarbetsprojekt där man fick helt fria händer i två frekvensband, 890 – 915 och 935 – 960 MHz. Detta ledde till att man bestämde sig för en kanaldelning på 200 kHz (kap. 16).

D-AMPS (digital AMPS) kallades tidigare ADC (American Digital Cellular). AMPS är det amerikanska analoga systemet, motsvarande vårt NMT 900. Vid utveckling av D-AMPS fick man inte alls fria händer, utan kravet var att ersätta en analog radiokanal med en digital, där den digitala skulle klara flera simultana samtal. Målet var att kunna utöka kapaciteten genom att gradvis övergå till digitala kanaler. Därav kanaldelningen 30 kHz, samma som i AMPS.

PDC (Personal [eller Pacific] Digital Cellular), från början JDC (Japan) utvecklades med samma förutsättningar som D-AMPS, med den skillnaden att japanska analoga systemet har 25 kHz kanaldelning. Därför fick PDC hålla sig inom 25 kHz.

CT2 skulle använda samma frekvenskanal för kommunikation i båda riktningarna, TDD, Time Division Duplex. Fördelen med detta är att om man har problem med reflexer på en viss frekvens så har man problem i båda riktningarna. Om basstationen växlar antenn, antenndiversitet, för att bli av med problemet i riktning handterminal till basstatio-

nen, så löser man samtidigt problemet även i andra sändningsriktningen.

Vidare skulle CT2 använda enkel och snabb talkodning, och valet föll på 32 kbit/s ADPCM. Eftersom man delade på tiden för de två riktningarna, TDD, blev datahastigheten den dubbla. Med signaleringsinformation blev totala bithastigheten 72 kbit/s. Kanaldelning för denna datahastighet med GFSK-modulering valdes till 100 kHz.

Även DECT utnyttjar TDD för att antenndiversitet på basstationen skall vara effektivt i båda sändningsriktningarna.

Vid specificeringen av DECT ville man ha så många talkanaler som möjligt på varje frekvenskanal, men ville ändå ha flera frekvenskanaler att välja mellan. Många talkanaler ger hög bithastighet och stor bandbredd. Man var tvungen att kompromissa. Resultatet blev att frekvensbandet om 20 MHz delades upp på 10 frekvenskanaler, och med lite extra frekvensutrymme i bandkanterna blev kanaldelningen 1728 kHz.

Uteffekt

Eftersom alla dessa digitala system "delar på tiden" kommer de att sända iväg data i form av datapaket. Den angivna uteffekten är sändarens uteffekt under själva datapaketet, den uteffekt som behövs för att radiovågen skall nå mottagaren. Medel-effekten blir topp-effekten dividerat med antalet tidluckor i TDMA-ramen.

Intressant är följande: Om vi ökar antalet tidluckor i DECT till det dubbla, skulle även datahastigheten öka till det dubbla. Då behövs dubbla sändareffekten men bara under hälften så lång tid, eftersom tidluckorna blivit hälften så långa. Medel-effekten kommer således att förbli oförändrad.

Duplexmetod

D-AMPS och PDC utnyttjar olika frekvensband för upp- och nedlänken, FDD, Frequency Division Duplex, eftersom denna teknik måste användas av de analoga systemen. Men GSM? Varför använder GSM FDD?

Vid TDD sänder basstationssändaren bara under halva tiden. Under andra halvan lyssnar mottagaren. Ett av målen med GSM

	CT2	DECT	GSM	D-AMPS	PDC
Frekvensband (MHz):	864-868	1880-1900	890-915 935-960 1710-1785 1805-1880	824-849 869-894	810-826 940-956 1429-1441 1477-1489 1453-1465 1501-1513
Kanaldelning (kHz) Antal frekvenskanaler	100 40	1728 10	200	30	25
Uteffekt Medeleffekt	10 mW 5 mW	250 mW 10 mW	20 mW-2 W max 250 mW		
Duplex-metod	TDD	TDD	FDD	FDD	FDD
Multiple Access-metod	FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA
Bithastighet, radiokanalen (kbit/s)	72	1152	271	48,6	42
TDMA-ram (ms)	2	10	4,615	20 (40)	20
Antal tidluckor/kanaler	2/1	24/12	8	3 (6)	3
Tidlucka (ms)	1	0,417	0,577	6,67	6,67
Talkodning Bithastighet (kbit/s)	ADPCM 32	ADPCM 32	RPE-LTP 13	VSLEP 7,95	VSLEP 6,7
Kanalkodad bithastighet (kbit/s)	—	—	22,8 (28)	13	11,2
Modulering	GFSK	GFSK	GMSK	/4-DQPSK	/4-DQPSK
Interleavingdjup (ms)	—	—	40	40	40

var att kunna bygga billigare basstationer, dvs varje sändare skulle klara så många samtidiga samtal som möjligt. Då är det slöseri med resurser att låta sändaren vara tyst under halva tiden. Med FDD är basstationens sändare igång hela tiden.

Om två personer med ficktelefoner står nära varandra och är uppkopplade mot olika TDD-nätoperatörer, är det fullt möjligt att den ena ficktelefonen försöker lyssna samtidigt som den andra sänder. Mottagningen kan då bli störd, speciellt om frekvenskanalerna ligger nära varandra. Detta kan bara undvikas om samtliga TDD-nätoperatörer synkro-

niserar sina tidluckor så att alla ficktelefoner sänder samtidigt, och lyssnar samtidigt.

Med FDD är frekvensavståndet så stort mellan sändningsfrekvens och mottagningsfrekvens att man slipper dessa störningsproblem.

Vid DECT kan problem av detta slag uppkomma. Men dels synkroniseras tidluckorna i DECT-basstationer som är anslutna till samma DECT-växel, dels är handterminalen duktig på att själv byta frekvens och tidlucka om störning skulle uppstå mellan olika DECT-system som inte har synkroniserade tidluckor.

Multiple Access-metod

Hur bär man sig åt för att flera abonnenter skall kunna ringa samtidigt? Flera uppkopplade, Multiple Access?

CT2 utnyttjar samma teknik som de analoga systemen, nämligen att varje samtal får sin egen frekvens, och denna frekvens har man alldeles själv, FDMA, Frequency Division Multiple Access.

I DECT-systemet får 12 samtidiga samtal rum på varje frekvenskanal. Man delar på tiden, TDMA, Time Division Multiple Access. Dessutom finns 10 frekvenskanaler, varför man har FDMA, med TDMA på varje frekvenskanal.

Samma är förhållandet med GSM, 8 samtidiga samtal på varje frekvenskanal, men dessutom många frekvenskanaler. TDMA/FDMA.

Och D-AMPS och PDC. Med 3 samtidiga samtal på varje digital frekvenskanal. Men många frekvenskanaler. TDMA/FDMA.

TDMA-ramar och tidluckor

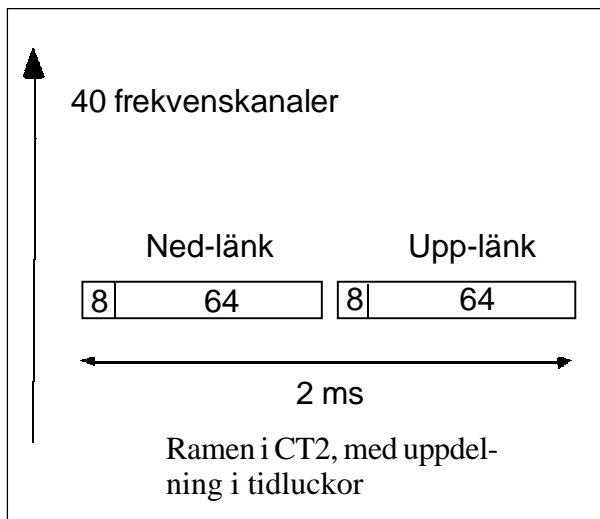
CT2 delar in tiden i "ramar" om 2 ms. Ramlängden är "periodisiteten", hur lång tid det tar innan schemat upprepas.

Varje CT2-ram delas in i två tidluckor om 1 ms. Ena tidluckan används för sändning från bas till handterminal, andra tidluckan för sändning från handterminal till bas.

I DECT är ramlängden 10 ms. Ramlängden påverkar fördröjningen i systemet, eftersom man måste "samla in" tal under ramlängden varefter talet sänds iväg i en tidlucka.

DECT har 24 tidluckor om 0,417 ms. Basen kan sända under de 12 första, och handterminalen under någon av de återstående 12 tidluckorna.

GSM använder ramlängden 4,615 ms som ursprungligen tillkom på grund av den tid det tar för GSM-ficktelefonen att byta frekvens. Tekniken har gått framåt, inte så att det går snabbare att byta frekvens. Däremot kan man ha två eller flera oscillatorer och växla mellan dessa. Den tekniken utnyttjas av DECT-basen som skall kunna sända på närliggande tidluckor med frekvensbyte mellan varje tidlucka.



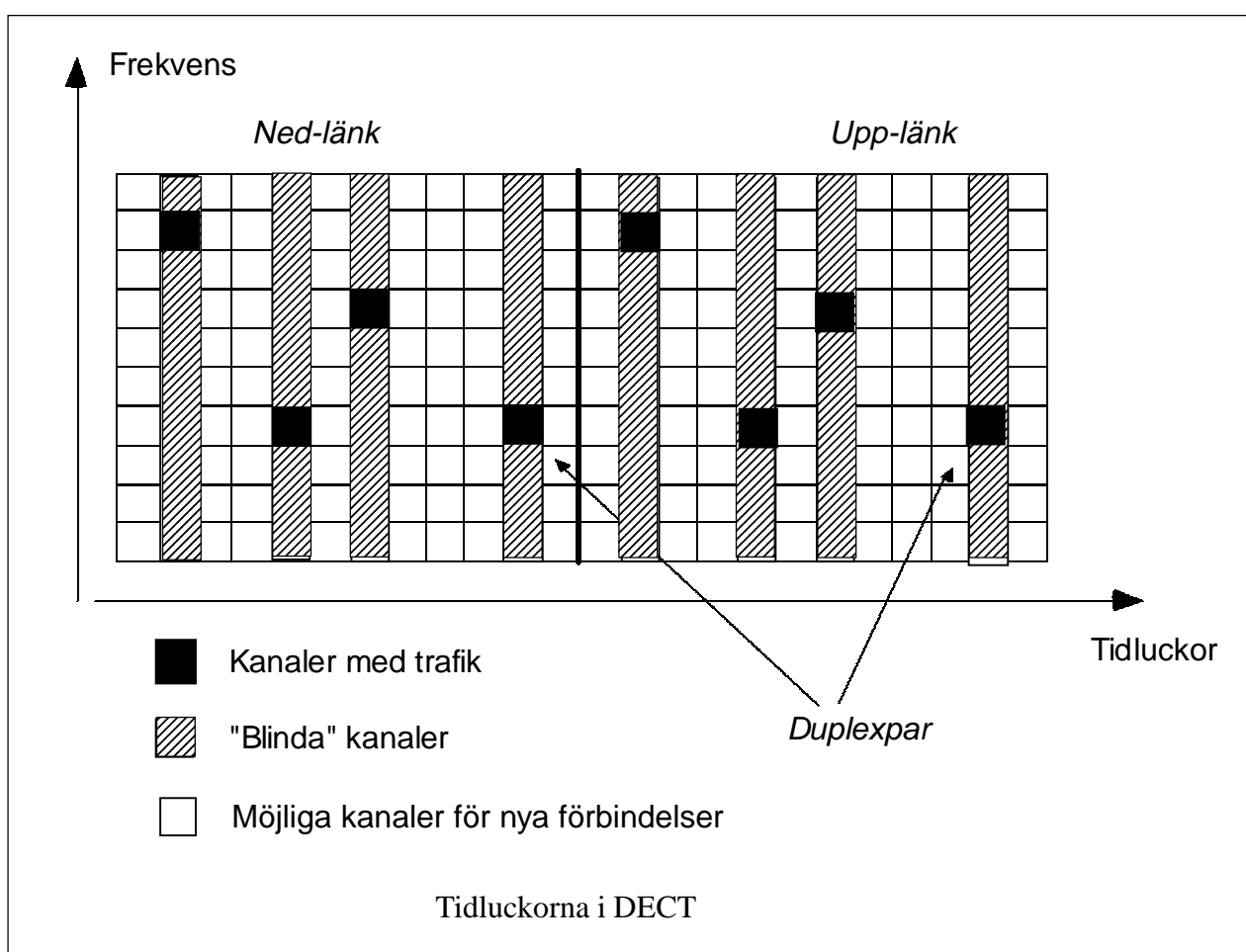
Tidluckans längd i GSM är 0,577 ms, bestämd av att långa reflexer inte skall hinna förändras under själva tidluckan. Man vill att samma inställning på utjämnaren skall gälla för hela tidluckan.

D-AMPS har en TDMA-ram som egentligen är 40 ms lång, uppdelad på 6 tidluckor om 6,67 ms. Men dagens system utnyttjar dubbla tidluckor, 1+4, 2+5 osv, för varje samtal. Verkligen ramlängd är därför 20 ms uppdelad på 3 tidluckor. Dubbla ramlängden med 6 tidluckor och 6 samtidiga samtal var tänkt att användas tillsammans med "half-rate" talkodare.

Vid "half-rate" talkodning blir alltså effektiv ramlängd 40 ms, medan effektiv ramlängd vid "full-rate" talkodare blir 20 ms. Övergång till "half-rate" skulle visserligen ge dubbla antalet samtal per basstations-sändare, men talkvaliteten minskar och fördröjningen ökar 20 ms på grund av ökad ramlängd.

D-AMPS använder en lång tidlucka för att få lågt antal tidluckor per sekund. Varje tidlucka behöver ett visst antal bitar som "overhead". Med lång tidlucka minskar overheaden.

Med lång tidlucka måste utjämnaren, som tar hand om långa reflexer, ställa om sig under själva tidluckan. Men D-AMPS har låg symbolhastighet. Varje symbol är så lång att utjämnaren bara behöver utjämna över en enda symbol. Därigenom minskar komplexiteten jämfört med GSM-utjämnaren



som skall klara reflexer på upp till fyra symboltider. I gengäld behöver GSM-utjämnaren inte ställa om sig under själva datapaketet.

PDC är uppbyggt på exakt samma sätt som D-AMPS vad gäller ramtider och tidluckor. Även här finns förberett för half-rate tal-kodare på samma sätt som i D-AMPS.

Skillnaden är att PDC inte har någon utjämnare. Man har bedömt att risken för långa reflexer är mindre i japansk terräng än i USA. I stället har PDC en avancerad form av antenndiversitet, både på basen och på ficktelefonen.

MAHO

Orsaken till 3 tidluckor i D-AMPS/PDC är att med 2 tidluckor, och ficktelefoner som sänder och tar emot i olika tidluckor för att slippa duplex-filter, så finns ingen tid till att lyssna på andra basar. Och detta, att lyssna för att hjälpa basstationen att besluta vilken bas

samtalet skall kopplas över till vid "hand over", överkoppling under pågående samtal, anses vara en så viktig funktion, MAHO, Mobile Assisted Hand Over, att kravet var minst tre tidluckor.

I DECT tas hela beslutet om överkoppling av handterminalen.

PDC-ficktelefonen utnyttjar den "lediga" tiden i tredje tidluckan inte bara för att lyssna på andra basar, utan även för att "proflyssna" på egna basen och välja bästa mottagningsantenn, så den är beredd med rätt antenn när basen börjar sända datapaketet som är riktat till just den ficktelefonen.

Talkodning

CT2 och DECT utnyttjar 32 kbit/s ADPCM, som är en talkodare som ger låg fördröjning, ca 4 ms, har låg komplexitet vilket innebär låg strömförbrukning, och är robust mot bitfel. Man har ju ingen kanalkodning, och kontrollerar ej heller om paketen är felaktiga, utan "rubbet" matas till tal-dekodern som får tyda paketen bäst den kan.

GSM utnyttjar en avancerad talkodare som bearbetar 20 ms tal i taget. Detta ger 20 ms plus bearbetningstid i fördröjning. Vidare är tal-dekodern mycket känslig för vissa typer av bitfel, varför datapaketen kontrolleras med CRC och aldrig matas till tal-dekodern om vissa databitar är felaktiga (klass Ia-bitar).

D-AMPS och PDC har tillkommit efter GSM och har en ännu mer avancerad talkodare. Men likheterna är stora. Man utgår från 20 ms tal, och vissa databitar är extra känsliga för bitfel varför de skyddas med CRC i kanalkodningen, på samma sätt som vid GSM.

Försök med half-rate talkodare har givit god talkvalitet när en person talar, men alltför stora problem vid störande bakgrundsljud.

Det talas i dag sällan om half-rate, utan mer om något högre bithastighet, 16 kbit/s. Inte bara för att få en mer robust talkodare utan även för att få ner fördröjningen. Vid samtal mellan två GSM ficktelefoner uppgår fördröjningen en väg till närmare 200 ms, nästan jämförbart med de 250 – 300 ms man har i fasta telenätet via geostationär satellit.

Kanalkodning

I GSM innebär kanalkodningen, som skyddar mot korta reflexer, att talkodarens datahastighet, 260 bit varje 20 ms (13 kbit/s), ökas till 456 bit varje 20 ms (22,8 kbit/s). Men sedan tillkommer lärsekvensen om 26 bit i varje datapaket, lärsekvensen som skyddar mot långa reflexer. Om vi lägger till detta blir det 560 bit på 20 ms (28 kbit/s).

Lärsekvensen borde egentligen räknas in i kanalkodningen. Den skyddar ju mot överföringsproblem på radiokanalen.

Först försöker vi få talkodaren att koda till så låg bithastighet som möjligt. Sedan lägger vi till kanalkodning som höjer bithastigheten. Varför inte använda en enklare talkodare som inte ger så låg bithastighet och kanske klarar sig utan kanalkodning?

DECT och CT2 klarar sig bra utan kanalkodning, eller hur? Ja, det gör dessa system så länge de används i den miljö de specificerats för, nämligen som trådlös telefon inomhus.

Inomhus ger väggarna avskärmning. Vi kan inte få några långa reflexer som ger intersymbolinterferens. Fast i stora lokaler är det lite kritiskt för DECT. Under en bittid (1152 kbit/s) hinner radiovågen 260 m. DECT-mottagaren kan acceptera 0,2 bit-tiders fördröjning innan talkvaliteten försämraras, dvs i lokaler större än 30 m kan man få problem.

Vidare är det tänkt att i CT2 och DECT skall avståndet vara kort mellan basenheten och terminalerna, något 10-tal meter. Kort avstånd och skyddande väggar ger korta reflexer, med stor vinkel mellan huvudsignal och reflex. Då ger antenndiversitet ett mycket effektivt skydd. Antenndiversiteten skyddar även en stillastående terminal.

Sändareffekten hos CT2 och DECT räcker för avstånd upp till ca 5 km vid fri sikt. Men inget av systemen innehåller skydd för överföringsfel när de används utomhus. Dock klarar sig CT2 bättre än DECT eftersom CT2 sänder med lägre bithastighet.

Kanalkodningen i GSM fungerar enligt parollen: "Gärna några tappade databitar, men däremellan måste det finnas felfria databitar". Kanalkodningen skyddar mot den typ av störning vi får av korta reflexer, så länge terminalen är i rörelse. Om GSM-terminalen skruvas fast och antennen placeras i en punkt där reflexerna ger låg signal, då är signalen låg hela tiden. Då hjälper inte kanalkodningen.

Botemedlet mot detta är frekvenshopp. GSM byter frekvens mellan datapaketen. Att skifta frekvensen 1 MHz hjälper om vägskillnaden mellan huvudsignal och reflex är större än 30 m. Men inomhus är vägskillnaden oftast betydligt kortare. Tre GSM-operatörer och NMT i 900 MHz-bandet be-

gränsar möjligheterna för längre frekvenshopp.

Felskyddet i GSM är optimerat för användning utomhus.

Kanalkodningen tar hand om korta reflexer, under förutsättning att ficktelefonen är i rörelse, även i hög fart, "motorvägshastighet". Frekvenshopp ger visst skydd även för stillastående ficktelefon.

Lärsekvensen skyddar mot och utnyttjar långa reflexer upp till 4,5 km vägskillnad mellan signalerna.

D-AMPS har inte lika effektivt skydd mot korta reflexer i kanalkodningen som GSM, men eftersom D-AMPS används tillsammans med analoga AMPS måste cellplaneringen följa analoga cellplaneringen. Cellplaneringen är gjord för $C/I = 18$ dB, dvs ett högt signal/brusförhållande.

D-AMPS behöver $C/I = 16$ dB. Med antenndiversitet kommer D-AMPS att klara $C/I = 11$ dB. Som jämförelse kan nämnas att GSM-näten planeras efter $C/I = 9$ dB.

PDC har ett kompletterande skydd i antenndiversiteten på både bas och ficktelefon, men ingen utjämnare som D-AMPS. Därför klarar PDC att planeras efter $C/I = 13$ dB.

Interleaving

Både GSM, D-AMPS och PDC blandar om databitarna över en tidsrymd av 40 ms, varför två närliggande databitar i snitt hamnar 20 ms ifrån varandra i luften. På så lång tid skall radiokanalen ha förändrats (förutsätter frekvenshopp eller att ficktelefonen rör sig) så att inte två databitar i följd försvinner i bruset.

Talfördröjning i GSM, D-AMPS och PDC
Alla dessa system har talkodare som bearbetar 20 ms tal i taget. Detta innebär att processorn måste vänta på 20 ms tal innan den kan göra talkodningen och kanalkodningen.

Därefter skall databitarna interleavas, blandas om, och sändas utspridda under ca 40 ms.

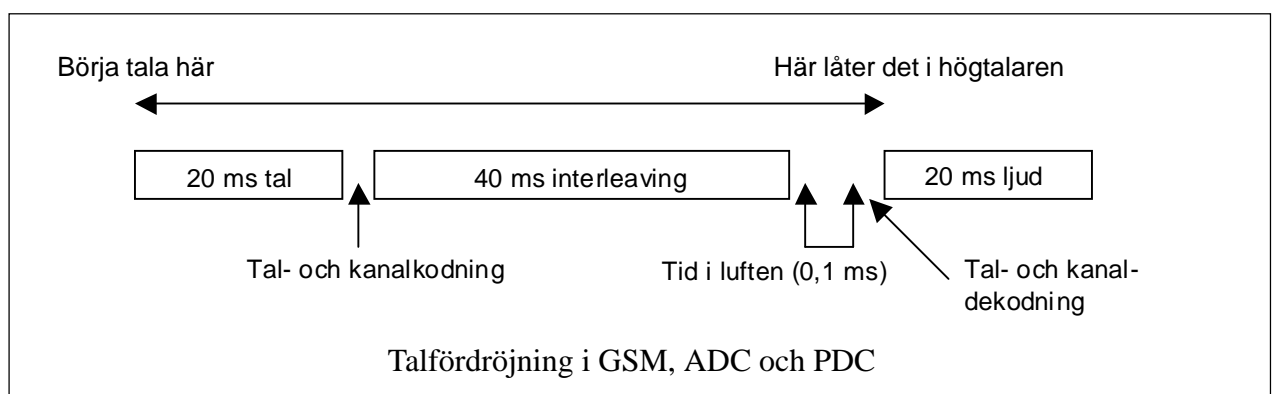
Tiden som radiovåg är försumbar när det gäller talfördröjning. Radiovågen går till och med lite snabbare än signalen på en kopparkabel eller optofiber.

Därefter når signalen mottagaren. Nu, efter 20 ms + tal- och kanalkodningstid + 40 ms + tid i luften, har mottagaren de databitar den behöver för att kunna sätta igång och "packa upp" signalen. Detta tar viss tid i processorn.

Därefter börjar det låta i hörtelefonen.

GSM-, D-AMPS- och PDC-systemen har alltså en fast fördröjning på drygt 60 ms som beror på sättet att hantera talet och databitarna. Sedan tillkommer den tid processorerna behöver för att åstadkomma detta. Total tidsfördröjning blir ca 90 ms.

Talfördröjningen i fasta telenätet, när man i Sverige ringer rikssamtal från söder till norr, uppgår till ca 20 ms, varav knappt hälften är tiden på ledningarna och resten är fördröjning av databitar i digitala växlar och transmissionsutrustning.



Modulering

I alla dessa system moduleras nyttoinformationen på bärvågen som fasvridning åt ena eller andra hållet, fasmodulation.

FSK

GSM-modulatorens består som vi sett (kap. 14) av två signaler som ligger 90° från varandra. Genom att växla mellan signalerna får man 90° fasvridning åt ena eller andra hållet. Fördelen med att utgå från dessa båda signaler är att man enkelt kan se till att fasvridningen blir exakt 90° . I luften ser GSM-signalen emellertid ut som en signal som ändrar frekvens fram och tillbaka.

För att vrida fasen motsols, öka fasen, behövs under kort tid en liten frekvensökning hos bärvågen. För att vrida fasen medsols, minska fasen, behövs motsvarande frekvensminskning (FSK, Frequency Shift Keying).

Om vi bygger modulatorens som en oscillator vars frekvens vi ändrar blir tiden mycket kritisk. Under hur lång tid låter vi frekvensen vara aningen högre? Modulatorens blir enklare att konstruera, men vi kan lika gärna få 70° eller 130° fasvridning, i stället för 90° .

CT2 och DECT använder GFSK

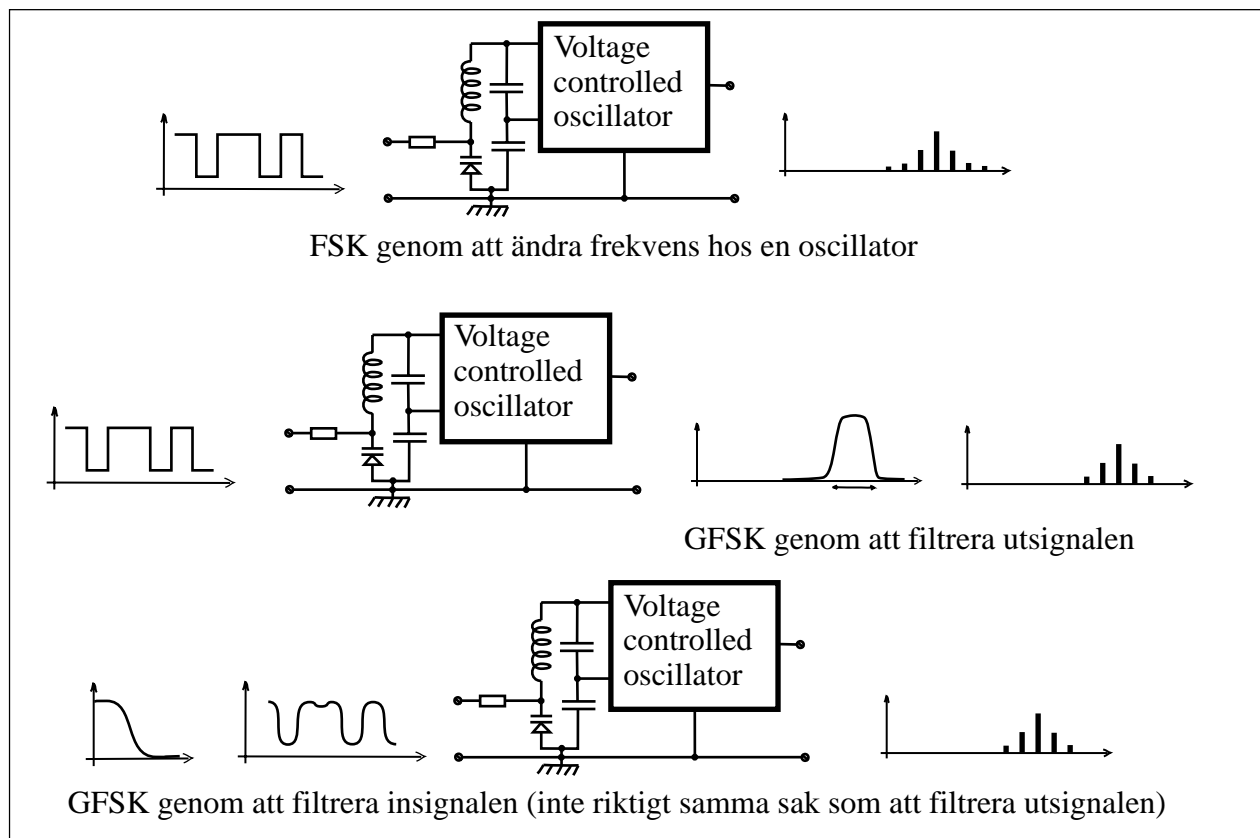
Specifikationen för CT2 och DECT tillåter att man använder denna enklare typ av modulatorens (FSK) som inte ger lika exakta fasvridningar. Vidare används en mottagare, detektor, utan referensoscillator. Detektoren känner bara av frekvensändringarna. Detektoren är inte koherent.

Fördelen är enklare konstruktion, nackdelen är att denna detektor behöver ca 4 dB högre signal/brusförhållande än GSM-detektoren. Detta har emellertid mindre betydelse vid tillämpning som trådlös telefon.

G i GFSK betyder att datasignalen som styr frekvensändringen gått genom ett filter med Gaussisk filterkurva så att frekvensändringen sker mjukt, för att undvika att signalspektrat blir alltför brett.

GSM använder GMSK

MSK betyder Minimum Shift Keying och är egentligen FSK med så litet frekvensskift som möjligt men ändå så stort att man får säker detektering. Säker detektering innebär att de två mottagna signalerna är "ortogonala", dvs antingen får vi bara den ena signalen, eller bara den andra. Detta erhålles när signalen ändrar fas exakt 90° .



QAM

För att realisera en exakt fasvridning på 90° används två amplitudmodulatorer som styr var sin signal som ligger i kvadratur (quadrature), dvs 90° från varandra.

En sådan modulor kallas egentligen QAM-modulator. Vi använder denna QAM-modulator och anpassar styrsignalerna, de filtreras i Gaussiskt filter, så att utsignalen blir FSK-modulerad med exakt 90° fasvridning. Detta kallar vi gaussiskt filtrerad MSK, GMSK (kap. 14).

QPSK — 2 bit per symbol

Vid fasmodulation får vi egentligen fyra olika möjligheter som är ortogonala, fasvridning $+90^\circ$, fasvridning -90° , fasvridning 180° eller att ligga kvar på 0° . Om alla fyra möjligheterna utnyttjas kan vi överföra två databitar per symbol.

Vid D-AMPS och PDC krävdes högsta möjliga bithastighet inom den begränsade bandbredd (30 kHz respektive 25 kHz) som stod till buds.

Fasvridning 180° kräver större frekvensskillnad om vi skall hinna snurra under den tid vi har till förfogande. Men om vi överför två databitar per symbol blir varje symbol dubbelt så lång. Vi får dubbelt så lång tid på oss. Kan detta egentligen ge någon vinst? Vad skiljer 90° från 180° på dubbla tiden?

Första vinsten vi gör är att varje förflyttning innehåller "acceleration" och "retardation". En förflyttning 180° ger lägre vinkelhastighet, mindre frekvensskillnad, än två förflyttningar på 90° .

Om vi inte snurrar runt cirkeln för att nå 180° utan "genar" rakt genom cirkeln (i stället för en spänningsvisare som vrider sig får vi två hälften så långa som vrider sig åt var sitt håll). Detta ger något mindre bandbredd hos det utsända spektrat.

Nackdelen med att gena genom cirkeln är att signalen ändrar amplitud, blir amplitudmodulerad. Då krävs sändarförstärkare som klarar att arbeta linjärt. Dessa förstärkare har lägre verkningsgrad, drar mer ström, än olinjära förstärkare som används när signalens amplitud är konstant.

/4

Vi kan minimera amplitudvariationerna hos signalen om hela cirkeln vrider 45° mellan varje symbol. Resultatet blir att symbolerna kodas som vridningar $\pm 45^\circ$ och $\pm 135^\circ$, i stället för 0° , $\pm 90^\circ$ och 180° .

/4-DQPSK

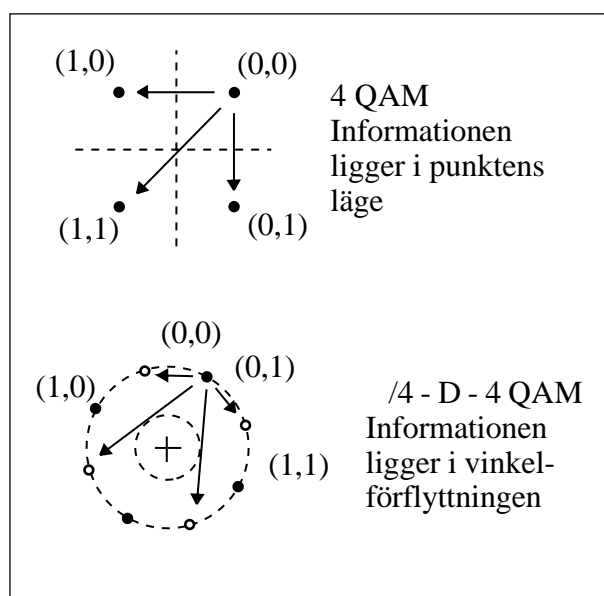
Detta är beteckningen för modulationen i D-AMPS och PDC. Vi skall se vad detta betyder:

PSK betyder Phase Shift Keying, faskiftmodulering. Men detta är inte riktigt vad som används. PSK innebär konstant amplitud hos signalen. Modulationen ligger enbart i fasvridningen. Att gå närmaste väg genom cirkeln till nästa punkt kallas egentligen QAM.

QPSK innebär quad, fyra. Vi utnyttjar fyra olika punkter, fyra olika utseenden hos symbolen, två databitar per symbol.

DQPSK betyder differentiellt kodad QPSK, dvs symbolen ligger i själva vridningen så som vi sett hos GSM, inte i punktens läge som i modem på telenätet. Detta innebär att mottagaren bara behöver vara "nästan" koherent.

/4-DQPSK betyder att cirkeln vrider 45° mellan varje symbol så att signalen inte skall behöva förflytta sig genom cirkelns origo. Genom denna vridning behöver sändarförstärkaren bara vara linjär inom området 0,38 – 1 av den omodulerade bärvågsamplituden.



Dynamisk frekvensallokering i DECT

Frekvensbandet 1880 – 1900 MHz reserverades i Europa för det trådlösa systemet DECT (Digital European Cordless Communications).

Dåtidens trådlösa telefoner, CT1, CT2, var radioförlängning av en enskild telefonapparat. Basenheten ersatte en vanlig telefon, och kunde bara hantera en telefon, den telefon den ersatte.

Vid standardiseringen av DECT siktade man på företagsmarknaden. Många personer inom begränsad yta som vill ha trådlös telefon. Alltså skulle varje basstation kunna hantera många abonnenter, och flera samtidigt samtal.

Räckvidden för en trådlös telefon kan inomhus uppgå till bara något tiotal meter. Därför var kravet att man med sin trådlösa telefon skulle kunna vandra omkring på företaget och automatiskt kopplas över från basstation till basstation, inte bara med handenheten i viloläge (vänta på samtal, roaming) utan även under pågående samtal (hand over), som vid mobiltelefoni.

När man bygger upp och administrerar mobiltelefonnät åtgår stora resurser till cellplanering och frekvensplanering. Kravet vid standardiseringen av DECT var att slippa denna planering. Basstationerna och handenheterna skulle själva klara att hitta lediga kanaler så att de olika basstationerna inte stör varandra (dynamisk cell/frekvens-tilldelning, frekvensallokering).

För att klara detta måste basstationerna kopplas ihop i en basstationsväxel. Men basstationsväxeln i DECT är ointelligent. Den håller bara reda på vilka telefonlinjer den skall hantera, och vilka handenheter som får ansluta sig.

Hela intelligensen för att klara den dynamiska frekvensplaneringen ligger i handenheterna. Det är handenhetens ansvar att kontrollera om förbindelsen är störd. Det är handenhetens uppgift att leta upp en ny ostörd kanal. Det är handenhetens uppgift att kommendera över basstationen till denna kanal.

Tänk dig GSM-nätet. 30 personer sitter på bussen och pratar i ficktelefon. Bussen svänger runt gathörnet och kommer in i nästa cell. 30 ficktelefoner begär att basstationsväxeln skall ge dem nya trafikkanaler. Basstationsväxeln får en hel del att göra. Detta slipper man i DECT. Intelligensen i handenheterna i DECT är nästa steg i utvecklingen: mobiltelefoni för mycket hög abonnenttäthet.

Följande krav låg bl a till grund för DECT:

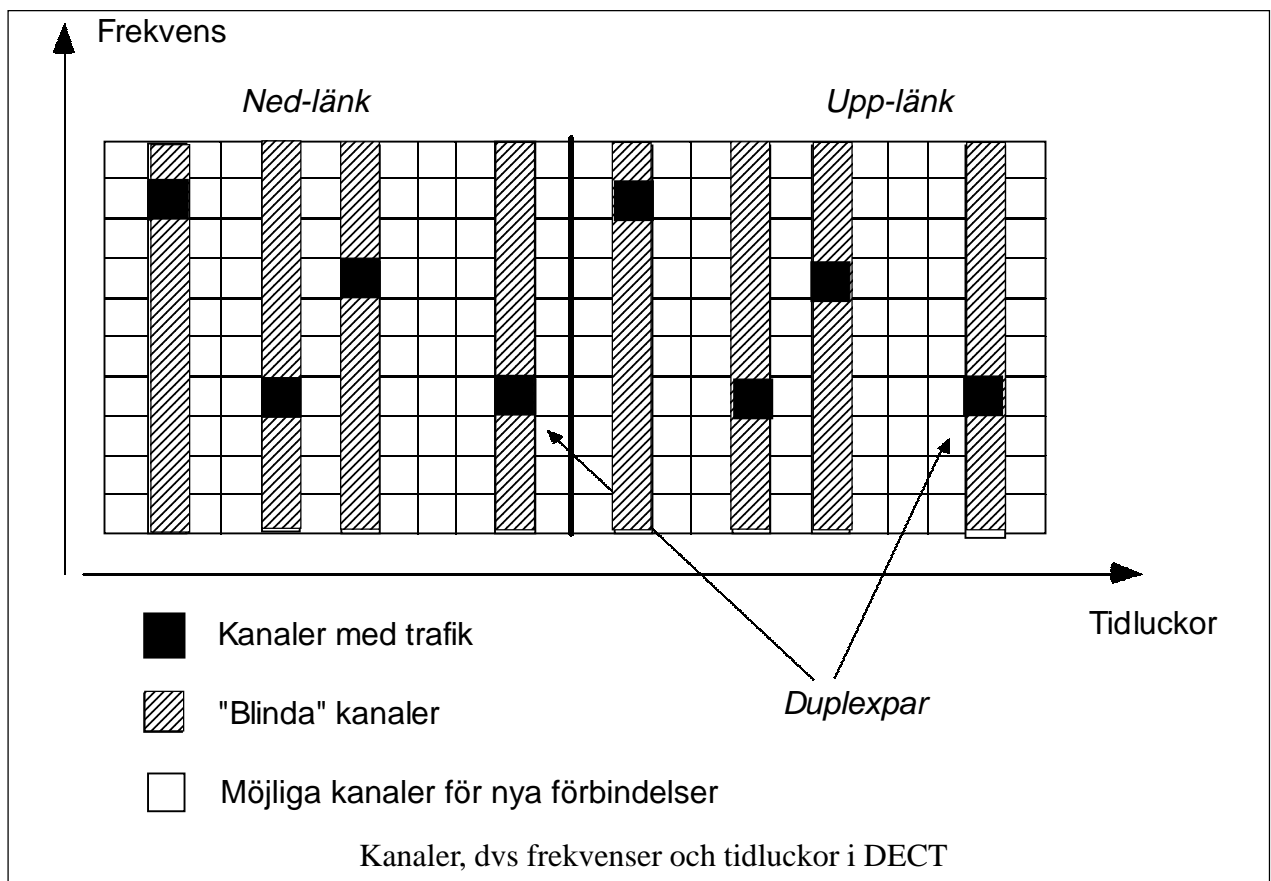
- Talkkvalitet lika god som i fasta telenätet (ADPCM 32 kbit/s valdes).
- Så låg tidsfördröjning som möjligt (kort ramtid).
- Så många talkanaler (tidluckor) som möjligt på varje basstation, så att varje basstationssändare/mottagare kan betjäna många samtidigt samtal.
- Så många frekvenser som möjligt för att möjliggöra frekvensdiversitet.

Resultatet blev:

- 10 frekvenser i bandet 1880 – 1900 MHz. Varje frekvenskanal är 1,728 MHz bred.
- 24 tidluckor, vilket ger 12 talkanaler på varje frekvens (Time Division Duplex).
- 10 ms TDMA-ram, 0,417 ms tidlucka. Detta innebär att det sänds och tas emot datapaket 100 ggr per sekund. Datahastigheten är 1152 kbit/s.

Datapaketen ser ut på följande sätt:

- Varje datapaket startar med 32 bitar synkroniseringssekvens.
- Sedan följer 48 bitar signaleringsdata med 16 bitar felkontroll, ett starkt skydd mot bitfel (men ingen rättning).
- Därefter kommer 320 bitar användardata (tal, 100 ggr/s vilket blir 32 kbit/s) som har försetts med en enkel form av felkontroll, 4 bitar. Det finns ingen kanalkodning som kan rätta överföringsfel. Vid dataöverföring ersätts en del av användardata (datahastigheten sjunker till 24 kbit/s) med starkare felkontroll, varvid ändterminalerna kan fråga om (ARQ) vid överföringsfel.



- Efter datapaketet kommer en skyddslucka på 48 s (motsvarande 56 bit). Radiovägen går från basen till handenheten, som synkroniserar sin sändning, varefter radiovägen går tillbaka till basen. Datapaketet som kommer fram till basen blir på detta sätt fördröjda 2 ggr gångtiden mellan bas och handenhet. 48 s räcker till ett avstånd på ca 5 km.

Kanalväxling i DECT

DECT har 10 olika frekvenskanaler att välja mellan. På varje frekvens väljer DECT mellan 12 olika tidluckor.

På varje tidlucka överförs 32 kbit/s nyttrafik. Detta räcker för tal. Vid datatrafik skulle man kunna kombinera flera tidluckor och på detta sätt få högre datahastighet. Men då minskar samtidigt möjligheten att utnyttja kanalväxling som skydd mot störningar (se nedan).

Basen kan ha trafik på alla 12 tidluckorna, och frekvenskanalen kan vara olika för varje tidlucka.

DECT-terminalen letar efter starkaste basstation. Sedan letar terminalen efter

störningsfriaste kanalen (frekvens och tidlucka) bland alla "möjliga kanaler för nya förbindelser". Sedan begär terminalen att bli uppkopplad på den kanalen.

Under pågående samtal letar DECT-terminalen, på sin "lediga tid", bland alla "möjliga kanaler för nya förbindelser" efter ännu störningsfriare kanaler. Om terminalen hittar en sådan kanal begär den att bli överkopplad. Transmissionen pågår då under kort tid i båda tidluckorna. Därför märker inte användaren en sådan överkoppling.

På motsvarande sätt letar DECT-terminalen efter andra basstationer kopplade till samma DECT-system. Om terminalen hittar en starkare basstation så begär terminalen att bli överkopplad dit i stället. Även nu sker transmissionen parallellt under kort tid, varför överkopplingen inte märks.

När DECT används som trådlös telefon i hemmet och även grannen har DECT-telefon kan tidluckorna "glida" i förhållande till varandra. Basenheterna är ju inte synkroniserade till varandra. Men detta klarar handenhetererna genom att byta kanal.

21 — DIGITALA RADIOSYSTEM

CDMA OCH DAB

Sammanfattning

CDMA och DAB har placerats i ett eget kapitel, därför att dessa system skiljer sig markant från förra kapitlets digitala radiosystem. Båda dessa system har gemensamt att de i grunden är digital radio med mycket låg bithastighet, och inbyggd frekvensdiversitet. På detta sätt undviks de svårigheter som finns vid överföring av hög bithastighet via radio.

CDMA är ett smalbandigt system, med smalbandig nyttsignal, som sprids över en bred frekvenskanal. Men i grunden är CDMA ett smalbandigt system, med låg informationsbithastighet, för ett enda mobiltelesamtal.

Sättet att sprida signalen över frekvenskanalen gör det möjligt för flera CDMA-system att samtidigt dela på samma frekvenskanal.

Tekniskt finns möjlighet att "parallellkoppla" flera sådana smalbandiga CDMA-sändare för att överföra nyttsignaler med högre bithastighet. Vid CDMA för mobiltelefoni samutnyttjar man modulaton och effektförstärkaren i basstationssändaren för flera simultana telefonsamtal. Men vid mottagningen "sällar" man fram den signal som hör till ett enskilt mobiltelesamtal, innan signalen når datadetektorn. Därför bestäms systemets radioprestanda av denna signal med låg datahastighet.

Även DAB utnyttjar låg datahastighet, extremt låg, 770 baud i fyra faser, 1550 bit/s, för att uppnå goda radioegenskaper. Man parallellkopplar 1536 sändare, på var sin frekvenskanal, för att kunna överföra totalt 2,3 Mbit/s. Men man bygger inte 1536 sändare utan klarar sig med matematik — FFT ("Fast Fouriertransform") — och en enda sändare.

Marksänd digital-TV utnyttjar samma modulationsförfarande som DAB, men på ännu fler bärvågor för att kunna överföra betydligt högre nyttobithastighet.

GSM använder frekvenshopp för att hoppa bort från korta reflexer

Om den mottagna signalen är svag på grund av kort reflex på en viss frekvens, då är sannolikheten liten att signalen samtidigt är svag också på en annan frekvens.

GSM-systemet kan byta frekvens mellan varje datapaket för att minska risken att två på varandra följande datapaket slås ut av kort reflex.

Om åtminstone varannat datapaket är rätt mottaget klarar oftast kanalkodningen att återskapa en stor del av de förlorade databitarna.

Om man byter frekvens så ofta att varje databit sänds på flera frekvenser

Tänk dig att man byter frekvens så ofta att varje databit sänds på flera frekvenser. Då ökar sannolikheten avsevärt att databiten kommer fram. Frekvensbyte flera gånger per datasymbol är ett effektivt skydd mot korta reflexer.

Om man byter frekvens så ofta att den långa reflexen inte hinner fram

Långa reflexer kommer fram senare och ger upphov till ekon. Tänk dig att vi redan hunnit byta frekvens när ekot kommer fram. Då hinner inte ekot störa oss.

Frekvenshopp där man byter frekvens flera gånger per datasymbol och dessutom byter så snabbt att långa reflexer inte hinner fram, sådant frekvenshopp är effektivt mot såväl korta som långa reflexer.

Frekvensen behöver inte "hoppa", den kan "svepa"

Tänk dig att vi har en digital radiosändare för ett enda mobiltelesamtal, modulerad med 10 kbit/s. Detta blir en smalbandig signal med ca 10 kHz bandbredd.

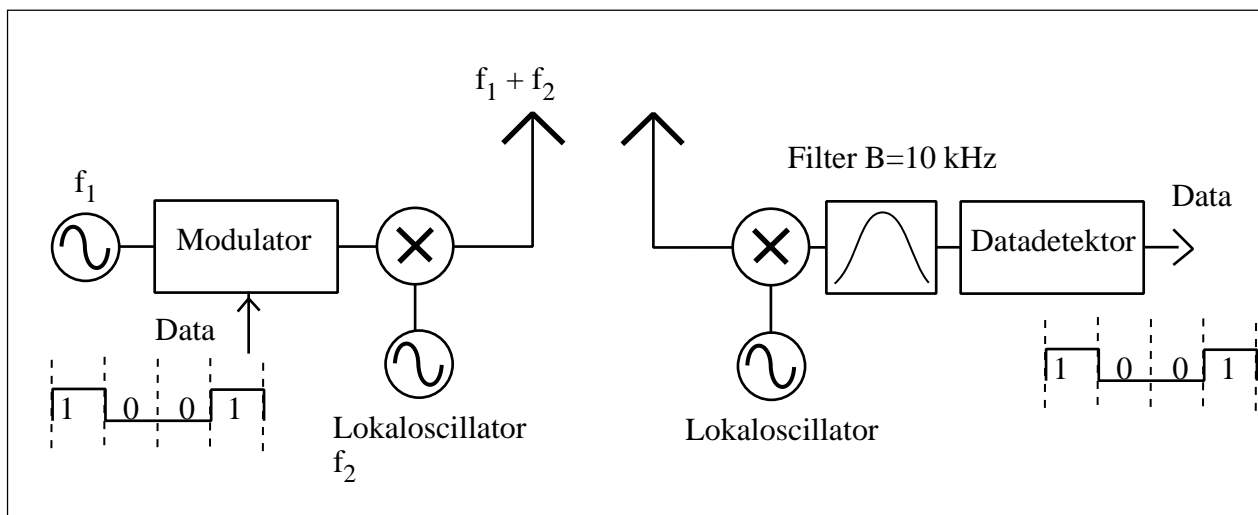
Vidare har vi en mottagare för denna signal. Mottagaren har ett filter med bandbredden 10 kHz.

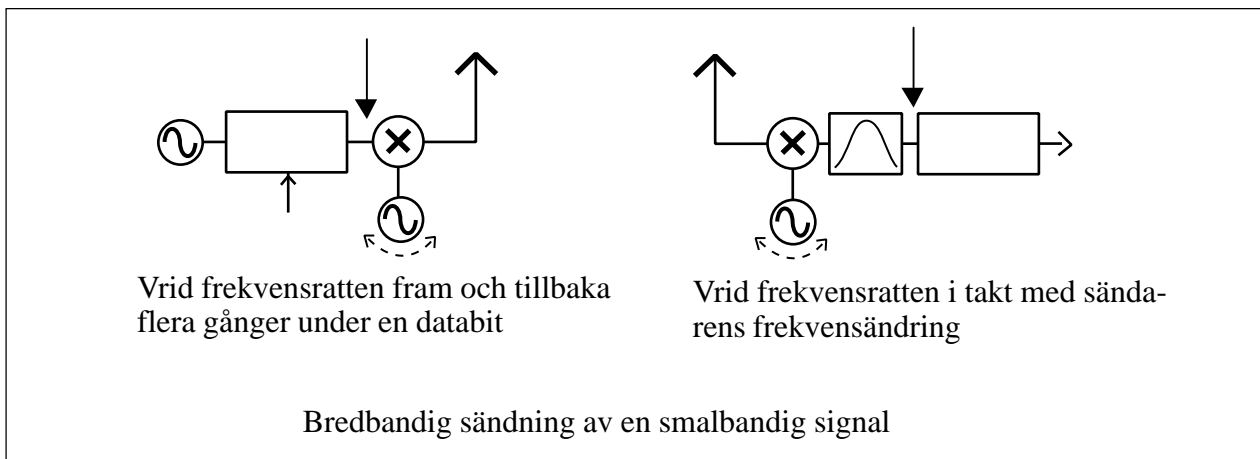
Om både sändaren och mottagaren är uppbyggda enligt superheterodynprincipen, så finns ett blandarsteg som matas med signal från en lokaloscillator. Sändar- och mottagarfrekvens ändras genom att ändra lokaloscillatorns frekvens, se bilden nedan.

Om vi tar sändarens frekvensratt och vrider fram och tillbaka, kommer signalen att svepa över ett brett frekvensområde. Antag att vi vrider på samma sätt på mottagarens frekvensratt, med den fördröjning som motsvaras av signalens gångtid i luften, se bild nästa sida.

Signalen som lämnar sändarens modulator, signalen före blandarsteget (se pilen), och signalen i mottagaren, efter filtret men före datadetektorn (se pilen), ser ut på exakt samma sätt oberoende av om vi vrider på frekvensrattarna eller inte.

Ser de verkligen lika ut? När vi vrider på frekvensrattarna, då motverkar vi korta och långa reflexer. Signalen ser bättre ut när vi vrider på frekvensrattarna!





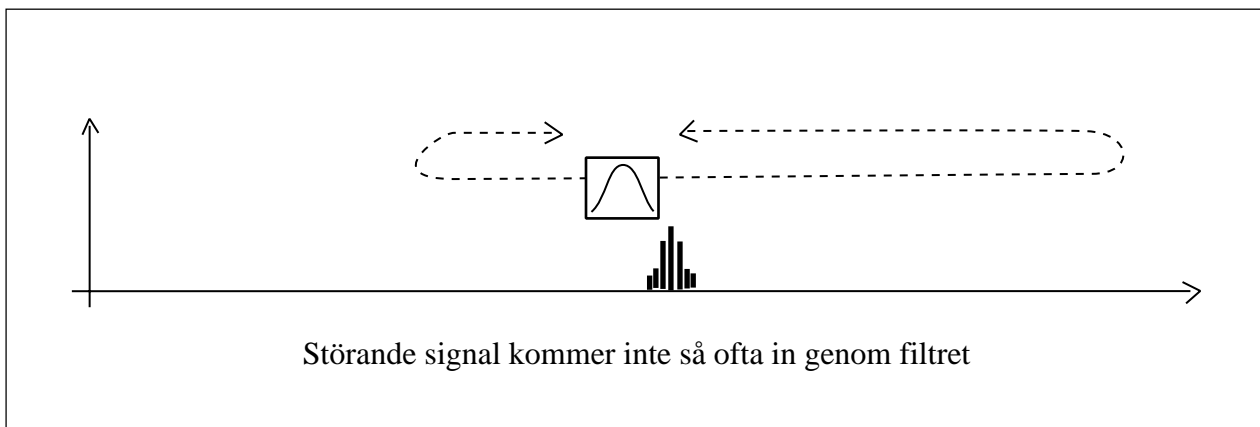
Hur hög sändareffekt behövs?

Att vi vrider på frekvensrattarna påverkar inte överföringskanalen. Nyttosignalen har oförändrad datahastighet, modulatorens oförändrad, mottagarens bandbredd som bestämmer bruset till datadetektorn är oförändrad, datadetektorn är oförändrad. Inget har förändrats. Vi behöver lika hög sändareffekt när vi vrider på frekvensrattarna. Möjligen kan vi klara oss med något lägre sändareffekt eftersom vi inte behöver så hög fädningsmarginal för de korta reflexerna.

Störande signaler i luften

Om det finns andra sändare som sänder med smal bandbredd i samma frekvensområde, "åker" mottagarens filter snabbt över denna störande signal. Den störande signalens energi blir proportionell mot den tid störsignalen befinner sig inom filterbandbredden.

Om vi vrider på frekvensrattarna så att signalen sveper över ett 1 MHz brett frekvensområde, med jämn hastighet så att mottagarfiltret befinner sig lika lång tid på varje "delfrekvens", och mottagarfiltret har bandbredden 10 kHz, då kommer mottagna effekten hos störande smalbandiga signaler att dämpas 100 ggr, - 20 dB.



Lokaloscillatorn — digital modulator

Lokaloscillatorns frekvens kan ändras med en digital modulator. Digital modulation är ju inget annat än frekvensändringar, frekvensskift fram och tillbaka, när signalens fasläge moduleras.

GSM-modulatorn

Vi skulle kunna mata lokaloscillatorsignalen genom en GSM-modulator, som ändrar frekvensen uppåt eller nedåt beroende på styrsignalen. Sedan låter vi en speciell data-signal, en "spridningssignal", styra frekvensändringarna.

Varför två modulatorer?

Nu består sändaren av två modulatorer, en modulator för nyttsignalen och ytterligare en modulator för spridningssignalen. Går det att låta nyttsignal och spridningssignal dela på samma modulator?

Vi lägger ihop datasignalen och spridningssignalen

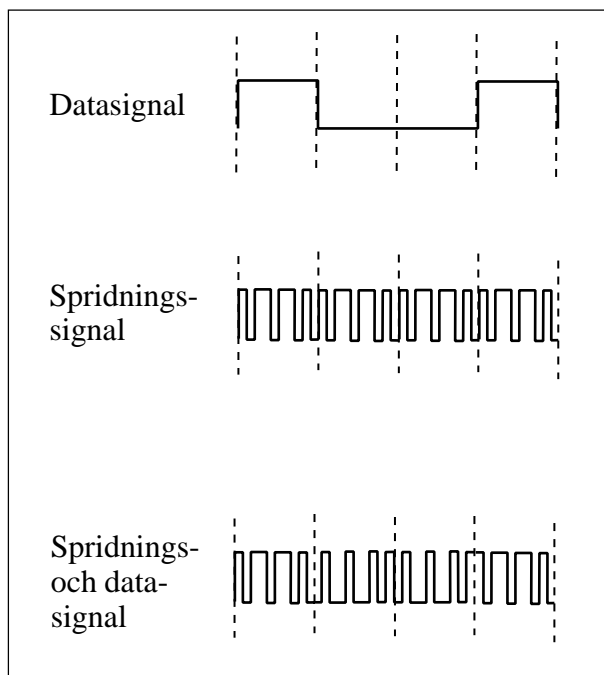
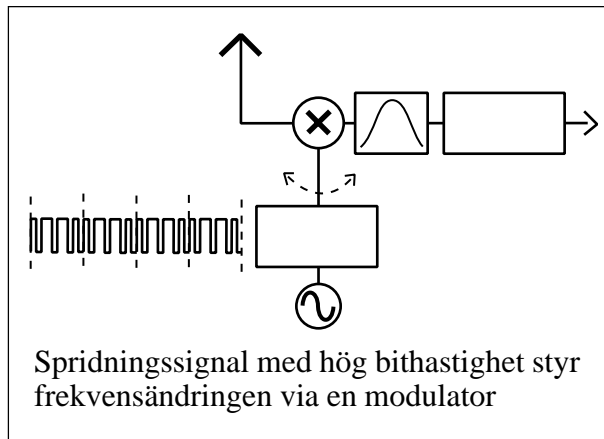
Om vi kombinerar datasignalen och spridningssignalen så att spridningssignalen behåller sitt utseende när datasignalen är "etta", men inverteras när datasignalen är "nolla", händer följande:

Mottagarens lokaloscillator styrs enbart av spridningssignalen. När sändaren moduleras av den sammanlagda spridnings- och datasignalen, kommer mottagarfiltret att följa sändarsignalen när datasignalen är en "etta", men mottagarens frekvens kommer att svepa i motsatt riktning när datasignalen är en "nolla". Då tar mottagaren bara emot brus.

Med ringmodulator fungerar det

Om vi inte använder GSM-modulatorn som består av två ringmodulatorer och åstadkommer frekvensskift uppåt eller nedåt, utan i stället använder en ringmodulator som delar upp signalen på två, varav den ena sveper uppåt i frekvens och den andra sveper nedåt i frekvens, samtidigt, då fungerar det att lägga ihop spridningssignal och data-signal innan de får påverka modulatorn.

In i mottagaren kommer två signaler som sveper åt motsatt håll. Signalen från lokal-



oscillatorn är också två signaler som sveper på samma sätt, fast tvärs emot när ut-sänd signal är "nolla".

När dessa fyra signaler blandas (multipliceras) i blandaren blir resultatet en signal som passerar mellanfrekvensfiltret. Denna signal har antingen fasläget 0° om mottagna signalen är "etta", eller $+180^\circ$ om mottagna signalen är "nolla".

DS-CDMA

På detta sätt går det att bygga en digital sändare som utnyttjar samma modulator såväl för nyttsignalen som för spridningssignalen. Metoden kallas DS (Direkt Sekvens) CDMA (Code Division Multiple Access).

Måste filtreras

Den sammanlagda nytto- och spridningssignalen (datasignalen) får ett frekvensspektrum som är mycket brett. Radiosignalen får datasignalens frekvensspektrum som sidband.

Antingen måste radiosignalen filtreras för att begränsa bandbredden, eller också måste datasignalen filtreras före modulatoren. Enklast är att filtrera datasignalen.

När datasignalen filtreras tar man bort övertoner i frekvensspektrat. Detta medför att datasignalen blir "avrundad". En annan innebörd är att radiosignalerna "sveper" lugnare, startar mjukare och vänder mjukare.

Mottagarens lokaloscillator, som nu egentligen är två signaler, måste följa sändarens frekvenssvep. Därför måste även spridningssignalen i mottagaren passera ett filter, som måste vara identiskt med filtret i sändaren. Filtret måste ge spridningssignalen samma "avrundning". Annars följer inte mottagaren sändarsignalerna.

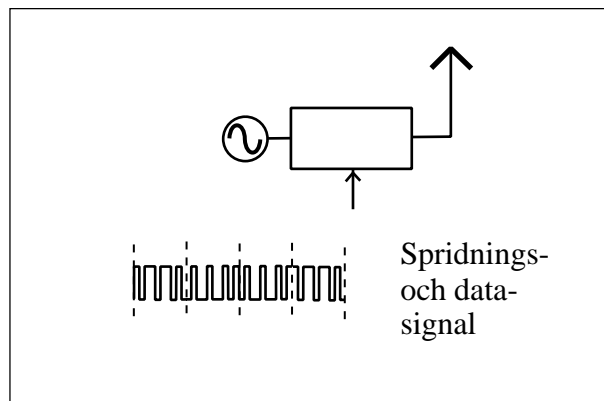
Mobiltelefoni-CDMA

En smalbandig störande signal i den bredbandiga frekvenskanalen kommer att undertryckas därför att den sällan kommer igenom det smalbandiga mottagarfiltret.

När vi hade ett enda mobiltelesamtal, en enda nyttsignal och en spridningssignal, kommer all mottagen signal att läggas ihop till en signal med datahastigheten 10 kbit/s.

Om vi tar två mobiltelesamtal med var sin nyttsignal (10 kbit/s) och var sin spridningssignal (1 Mbit/s), och låter spridningssignalerna vara olika kombinationer av ettor och nollor, två olika kodord, och matar in alltihop på samma DS-CDMA-sändare, hur reagerar då mottagaren?

När mottagaren tar emot denna signal kommer all signalenergi att blandas till mellanfrekvens, men nyttsignalen som hör till



mottagarens spridningssignal kommer bara att bestå av halva signalenergin. Signalenergin från det andra mobiltelesamtal ligger överlagrad med högre bithastighet än 10 kbit/s, om vi valt spridningssignalerna så att de är helt olika (ortogonala).

När denna "dubbla" signal matas in i filtret kommer bara den nyttsignal som hör till "vår" spridningssignal att komma igenom filtret.

Men denna gång innehåller vår nyttsignal bara halva signaleffekten. Om vi på detta sätt lägger ihop 10 mobiltelesamtal på samma CDMA-sändare, måste basstationens sändareffekt ökas 10 ggr för att "min" nyttsignal skall få den signaleffekt som datadetektorn behöver.

Vi kan inte lura naturen

Vi kan således inte lura naturen. Det behövs viss sändareffekt för viss bithastighet. Detta samband gäller fortfarande trots att vi har mycket hög datahastighet och stor bandbredd i luften. Det är den datahastighet som kommer fram till vår mottagares datadetektor som bestämmer effektbehovet. Det är där vi behöver viss E_b/N_0 .

Stort behov av ortogonala kodord

För att klara många samtal på samma sändare behövs spridningssignaler som är tillräckligt olika, ortogonala. Stort arbete läggs ned på att finna sådana kodord.

Återskapas före detektorn

Vid CDMA modulerar vi sändaren med hög datahastighet, många gånger högre än nyttosignalens datahastighet. Detta innebär att den utsända signalen får hög bandbredd. Men hur hög sändareffekt behövs?

Vid mottagning skall vi återskapa nyttosignalen ur den höga datahastigheten. Vad vi gör med CDMA-tekniken är att återskapa nyttosignalen med låg datahastighet innan signalen når datadetektorn. På detta sätt blir det nyttosignalens låga bithastighet som bestämmer mottagarfiltrets bandbredd, och därigenom påverkar hur kraftig CDMA-sändaren behöver vara.

Vid mobiltelefoni med multiple access, dvs när flera skall använda samma sändare samtidigt, skapar vi hög bithastighet, och överlagrad på denna höga bithastighet finns spridnings- och nyttosignal från varje enskilt mobiltelesamtal.

Måste verkligen nyttosignalen från varje enskilt mobiltelesamtal återskapas före datadetektorn? 10 mobiltelesamtal ger 10 ggr så hög sammanlagrad nyttosignal och vi behöver ett filter som är 10 ggr så brett. Men samtidigt innehåller dessa 10 samtal 10 ggr så hög signaleffekt. Därför kommer datadetektorn att få 10 ggr så hög signal och 10 ggr så högt brus (filtret är bredare). Således är S/N oförändrat.

Detta resonemang är riktigt om vi beräknar vilken sändareffekt som behövs, när det inte finns andra störningar än "vitt" brus.

Om vi återskapar nyttosignalen från ett enskilt mobiltelesamtal före detektorn, då kan vi använda ett smalare mottagarfilter. Detta ger kraftigare undertryckning av störningar från "störsignaler" inom det frekvensområde vi sveper över. Dessutom hinner mottagaren flytta på filterpassbandet för kortare reflexer, kortare ekon, om mottagarfiltret är smalare.

Av hanteringsmässiga skäl innehåller verkliga CDMA-system för mobiltelefoni flera olika kodord, och sammanlagringen respektive upp-packningen av nyttosignalerna sker i flera steg. Dessa steg skall emellertid betraktas som en "dubbel- eller trippelsuperheterodyn-mottagare". När man kommer till själva datadetektorn, där det avgörs om signalen är "etta" eller "nolla", då finns bara nyttosignalen för det samtal man önskar detektera.

Variabel bithastighet hos nyttosignalen

Eftersom själva CDMA-sändaren alltid arbetar med hög bithastighet, spridningssignalens bithastighet, är det relativt enkelt att ändra bithastighet hos nyttosignalen.

Högre nyttobithastighet behöver inte betyda sämre mottagarkänslighet om sändaren samtidigt drar ner på antalet nyttobitar till andra användare. Däremot innebär större nyttosignalbandbredd att man måste ha ett bredare mottagarfilter och får därför ett sämre skydd mot störningar från smalbandiga signaler inom frekvenskanalen, och ett sämre skydd mot reflexer.

W-CDMA

Möjligheten att enkelt anpassa nyttobithastigheten till kundens önskemål/betalningsförmåga och/eller radiokanalens kvalitet, reflexer m m, har inneburit att CDMA ingår i de standarder som ETSI antagit för nästa generations mobila telekommunikationssystem.

CDMA — GSM, en jämförelse

Tekniken att sända med hög bithastighet utvecklades. Detta gör det möjligt att konstruera radiosystem som utnyttjar CDMA-teknik.

Det är inte säkert att CDMA erbjuder fördelar vid vanlig mobiltelefoni. Visserligen behöver CDMA inte någon utjämnare mot långa reflexer, och långa reflexer är problem för TDMA-system som inte har utjämnare. Men GSM har utjämnare som löser problemet. Detta är alltså inte längre något problem (även om problemlösningen i sig var ett problem).

Variabel bithastighet!

En definitiv fördel med CDMA-tekniken är möjligheten att öka bithastigheten hos nyttsignalen om störnivån är låg. Detta ger möjlighet till variabel bithastighet, eller "adaptiv bithastighet". Motsvarande funktion hos GSM skulle vara att minska kanalkodningen, använda färre databitar för felrättning, och i stället använda dem för data, när radioöverföringen är störningsfri och kanalkodningen inte behövs.

Samexistens med andra radiosystem

CDMA-signalen är egentligen en smalbandig signal som sveper över stor bandbredd. Om man har en radiomottagare som sveper i takt med sändaren kan mottagaren göras smalbandig och få hög känslighet därför att brusnivån blir låg (smal bandbredd – svagt brus).

Om man sänder med CDMA-teknik på en TV-kanal och använder så svag sändare att CDMA-signalen dränks i TV-mottagarens brus (TV-mottagaren har stor bandbredd – högt brus), så märker inte TV-mottagaren att där finns en CDMA-sändare.

Samtidigt kan CDMA-mottagaren ta emot CDMA-signalen därför att CDMA-mottagaren sveper med och har smal bandbredd. Men stör inte TV-signalen CDMA-mottagaren. Nej, inte om det finns tillräckligt med tomma "frekvensluckor" i TV-signalens frekvensspektrum.

Ryktet säger att England, under Falklandskriget, sände med CDMA-teknik på ryska TV-satelliter för att kommunicera med

sina fartyg i syd-Atlanten utan att satellitägaren märkte detta. England hade ju inga egna satelliter.

Svårigheter vid CDMA

En svårighet är att mottagaren måste följa sändaren, de måste följas åt. Det räcker inte med samma kodord och samma filterkurva. Klockorna för spridningssignalen i sändaren och i mottagaren måste synkroniseras.

En annan svårighet uppstår när många CDMA-signaler skall svepa över samma frekvensområde, med olika svepmönster. Detta händer i riktning från mobilstationerna till basstationen i ett CDMA-system. Dessa signaler måste vara ungefär lika starka när de kommer in på basstationsantennen, för att de skall kunna samexistera utan att störa varandra. Därför måste ficktelefonerna i ett CDMA-system effektregleras från basstationen, på ett sätt som klarar att följa signalernas fluktuationer.

DAB (Digital Audio Broadcast)

Under början av 1990-talet utarbetades en standard för digitala ljudradiosändningar som går under benämningen DAB (Digital Audio Broadcast). Provsändningar har pågått under längre tid, och i dag finns reguljära utsändningar över vissa storstadsområden. Det råder dock fortfarande dålig tillgång på mottagare för konsumentmarknaden.

Det är svårt att överföra hög datahastighet till rörliga mottagare därför att intersymbolinterferens bildas även för relativt "korta" reflexer. Ett sätt att komma runt detta är att dela upp dataströmmen på många sändare och låta varje sändare sända med låg datahastighet. Denna teknik utnyttjas i DAB.

COFDM

FDM betyder Frequency Division Multiplex. Vi har tidigare behandlat FDMA, där varje användare hade sin egen frekvenskanal. FDM innebär att nyttsignalen delas upp på många parallella sändare, som var och en har sin egen frekvenskanal.

OFDM står för Ortogonal, dvs frekvenskanalerna för de parallella sändarna ligger så nära varandra som möjligt, dock utan att störa varandra.

COFDM, där står C för Coded, dvs kodad ortogonal FDM.

Kodning

Kodning av nyttsignalen utförs för att eventuella skurbitfel (fel hos flera databitar i följd, vanligt vid radiokommunikation) skall spridas ut till enbitsfel som kan rättas med felrättande kodning, jfr GSM.

Vid GSM utnyttjas interleaving. Interleaving ger tidsfördröjning som egentligen inte är önskvärd i telefonsystem. Men vid rundradio märker inte lyssnaren om ljudet är fördröjt. Därför kan man ha interleaving över lång tid, i detta fall 384 ms.

Men interleaving skyddar inte vid stillastående mottagare. Om en frekvenslucka är utsläckt av kort reflex så finns ingen signal, hur mycket man än blandar om databitarna. Därför fördelas nyttdatabitarna på de olika

sändarna, så att närliggande databitar hamnar på olika frekvenskanaler. Korta reflexer som "slår ut" ett smalt frekvensband kommer inte att störa databitar som ligger efter varandra i nyttdataströmmen. Då klarar man att återskapa förlorade databitar med felrättande kodning även vid stillastående mottagare.

Långa reflexer, intersymbolinterferens

I DAB har nyttdatasignalen en datahastighet som ligger i området 0,6 – 1,7 Mbit/s, beroende på typ av programmaterial och hur många samtidiga ljudradioprogram som skall utsändas. Denna signal förses med kanalkodning, så att datahastigheten stiger till ca 2,3 Mbit/s.

Denna kanalkodade datasignal interleavas och fördelas på 1536 sändare, som var och en moduleras med 770 symboler/s i fyra faser, alltså 1550 bit/s.

En symbolhastighet så låg som 770 baud medför att varje symbol är 1,297 ms lång. Man kortar av symbolen och inför en skyddslucka på 246 s mellan varje symbol. Den långa reflexen kan alltså vara ända upp till 246 s fördröjd innan man får påverkan på nästa symbol. På 246 s hinner radiovågen 74 km.

Men reflexer som har gått 74 km längre väg är alldeles för svaga för att störa. Varför 74 km? Jo, om man har många sändare som alla sänder samma program, samma nyttdatasignal, på samma frekvens, kommer störningar från de andra sändarna att uppfattas som långa reflexer, under förutsättning att sändarna sänder sina databitar synkront, dvs samtidigt.

Samma frekvens över hela landet

DAB gör det möjligt att använda samma frekvenskanal för t ex P1 över hela landet. Detta ger extremt god frekvens ekonomi. Men detta fungerar bara så länge modulationen är identisk på samtliga sändare. Detta duger inte för lokalradio!

Hur kopplar man ihop 1536 sändare?

En signal, växelspanning, kan antingen bildas av en enda generator som "följer" signalens amplitud i tiden, eller också kan signalen bildas genom att lägga ihop signalerna från många sinusgeneratorer. Matematiskt räknar man från den ena generatortypen till den andra genom att använda "Fouriertransformen".

Utvecklingen inom mikrodatorområdet och matematiken har lett till att vi i dag kan räkna från ena generatortypen till den andra, nästan i realtid, med en algoritm som kallas FFT, Fast Fourier Transform.

Sändarsignalen skapas "matematiskt"

I sändaren skapas en matematisk beskrivning av signalen (frekvensspektrat) från var och en av de 1536 sändarna. Sedan lägger man ihop samtliga frekvenskomponenter med både amplitud och fas, och beräknar bakvägen, med FFT, hur den växelspanning skall se ut, som skall modulera en enda sändare. Sedan skapar datorn denna växelspanning, som får modulera en enda sändare, och "i luften" ser det ut som om radiosignalen alstrats av 1536 sändare.

Begränsningar i mänskliga hjärnan

Inledningsvis påstod jag att hög datahastighet via radio är svårt (jag skrev inte omöjligt) på grund av inverkan från långa reflexer, intersymbolinterferens.

Vad vi just har åstadkommit är att modulera en enda sändare, med mycket hög datahastighet, 2,3 Mbit/s. Och trots den höga datahastigheten klarar vi intersymbolinterferens upp till 246 ms, dvs 566 databit-tider. GSM klarar ISI på 4 databitar.

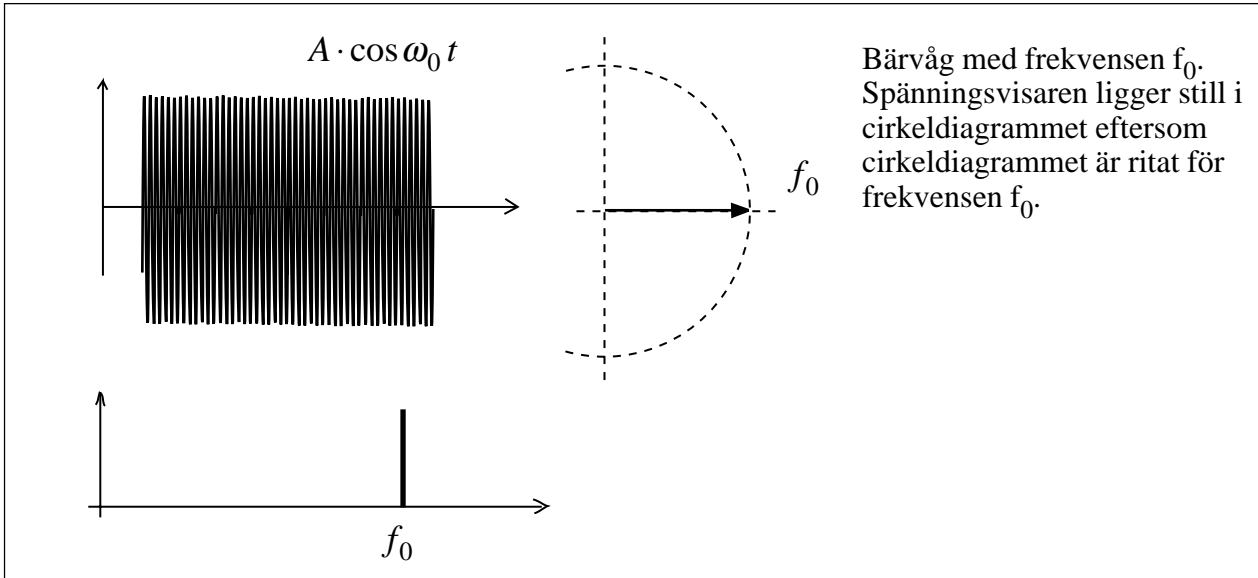
Den mänskliga hjärnan klarar inte att lista ut hur denna sändare skall moduleras, med mindre än att gå omvägen runt 1536 "tänkta" sändare, var och en med låg symbolhastighet.

Säkerligen är det bara en tidsfråga innan någon kommer på andra sätt att gå från nyttodataström till den signal som modulerar sändaren, utan att behöva gå omvägen via FFT.

22 — AM, FM OCH CDMA — ETT FYSIKALISKT SYNSÄTT

Läroböckerna "beskriver" oftast CDMA med hjälp av faltningsintegraler. Detta är visserligen ett matematiskt korrekt sätt, men leder knappast till någon större förståelse för vad som egentligen händer.

Människan har lättast att tänka "i ett tidsperspektiv", medan många matematiska verktyg utgår från signalbeskrivningar i frekvensspektrat. Genom att studera signalen i cirkeldiagrammet kan man få en uppfattning om sambanden mellan tidsvariation hos signalen och motsvarande frekvensspektrum. Inte som exakt metod för beräkningar, utan för att "förstå" vad som händer.



Amplitudmodulering

Vid amplitudmodulering låter vi nyttsignalen modulera bärvågens amplitud. Amplituden ändras i takt med nyttsignalen.

Observera att detta är EN signal vars frekvens är bärvågsfrekvensen, EN signal vars amplitud ändras upp och ner i takt med nyttsignalen.

Bärvåg: $A \cdot \cos \omega_0 t$

Nyttosignal: $M \cdot \cos \omega_m t$

Modulerad amplitud: $(A + M \cdot \cos \omega_m t)$

Amplitudmodulerad bärvåg:

$$(A + M \cdot \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t$$

Trigonometrins räkneregler ger oss möjlighet att utveckla det matematiska uttrycket för den amplitudmodulerade bärvågen. Fourier-transformen ger samma resultat.

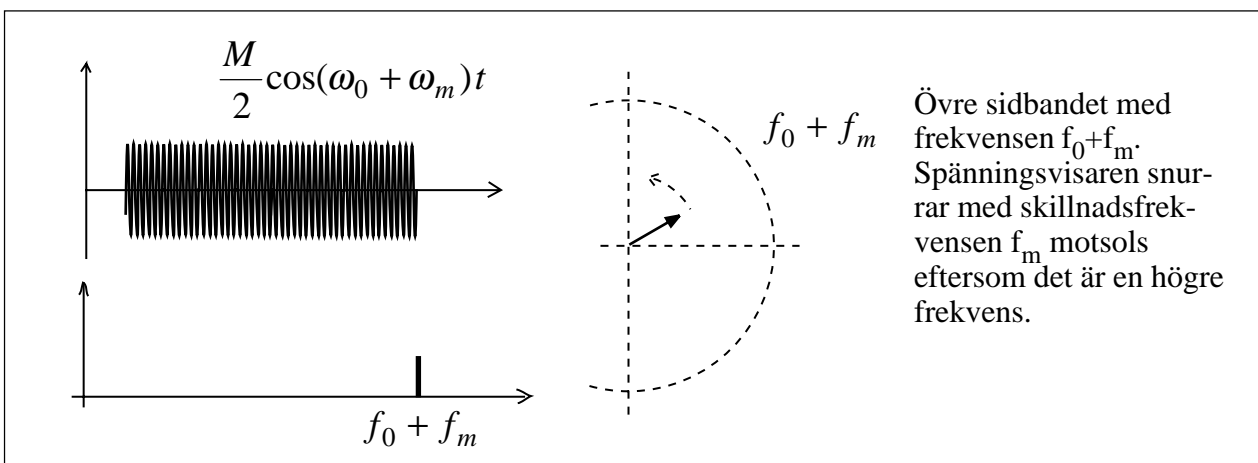
När nyttsignalen är en sinussignal blir resultatet tre signaler som alla har konstant amplitud. Vi identifierar signalerna som övre och undre sidbandet, samt den ursprungliga bärvågen.

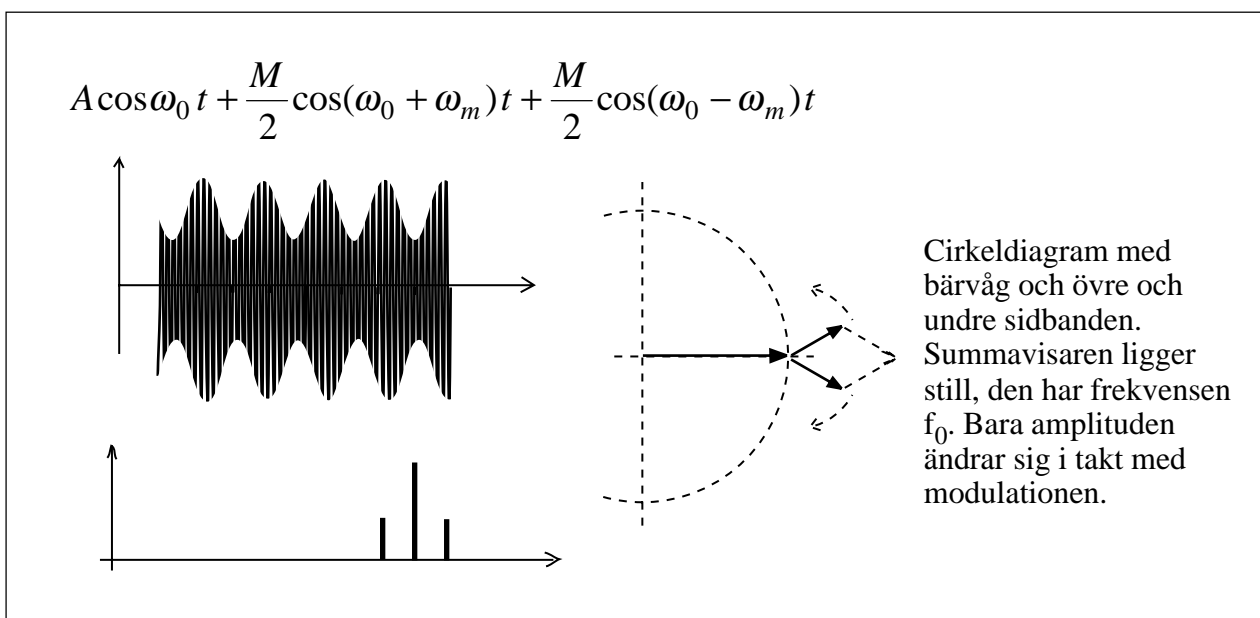
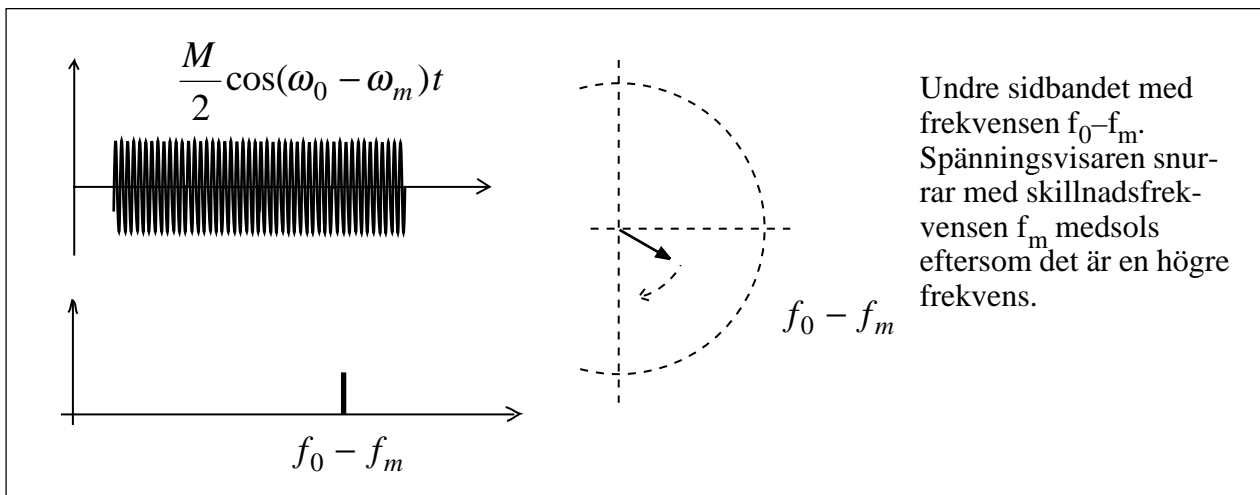
$$(A + M \cdot \cos \omega_m t) \cos \omega_0 t =$$

$$A \cos \omega_0 t \quad (\text{bärvåg})$$

$$+ \frac{M}{2} \cos(\omega_0 + \omega_m) t \quad (\text{övre sidband})$$

$$+ \frac{M}{2} \cos(\omega_0 - \omega_m) t \quad (\text{undre sidband})$$





Vi lever på tidsaxeln

Hela vår begreppsvärld är uppbyggd på att först händer detta, sedan det där, osv. Vi lever på tidsaxeln.

Den amplitudmodulerade signalen går in i en förstärkare. Först förstärks amplituden när den har den här nivån, sedan förstärks amplituden när den har den där nivån osv.

Frekvensspektrum är "parallella processer"

Att se signalen som spektrum på frekvensaxeln är som att arbeta med parallella processer. Den här frekvensen matas in och förstärks, och den där, och den där, osv. Men den verkliga signalen är i varje ögonblick summan av signalerna.

Olinjära förstärkarsteg

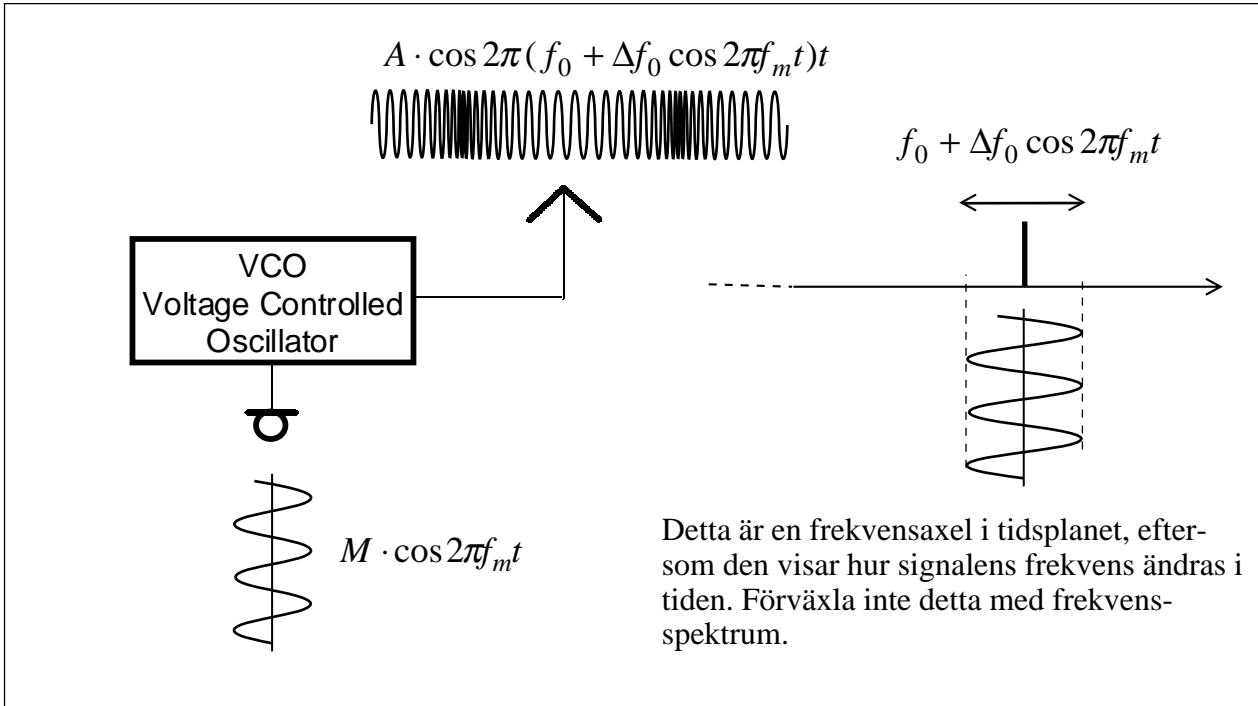
Om alla våra radioapparater bara innehåller linjära steg är det enkelt. Då spelar det ingen roll om vi ser signalen på tidsaxeln eller som spektrum på frekvensaxeln.

Olinjär förstärkning

Olinjär förstärkning innebär att förstärkningen (antal ggr) varierar med signalens momentana amplitud. Då måste jag i varje tidsögonblick veta totala signalens amplitud. I detta fall behöver jag "se" signalen på tidsaxeln.

Bandbredds begränsning

Säg att ett förstärkarsteg har begränsad bandbredd. Då behöver jag signalen som frekvensspektrum.

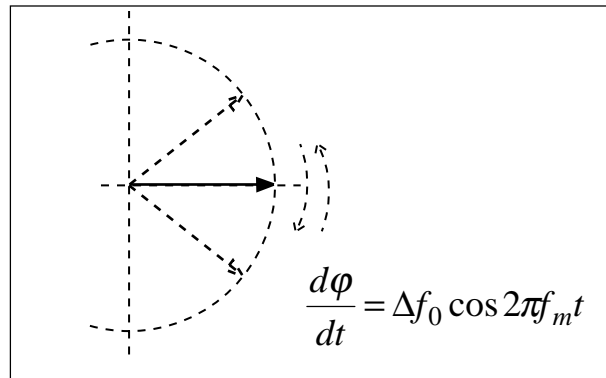


Frekvensmodulering

Är frekvensmodulering en signal eller flera signaler?

Frekvensmodulering är EN signal

Frekvensmodulering alstras genom att man låter frekvensen hos en spänningsstyrd oscillator variera i takt med nyttoinformationen. Frekvensavvikelsen är direkt proportionell mot signalamplituden.



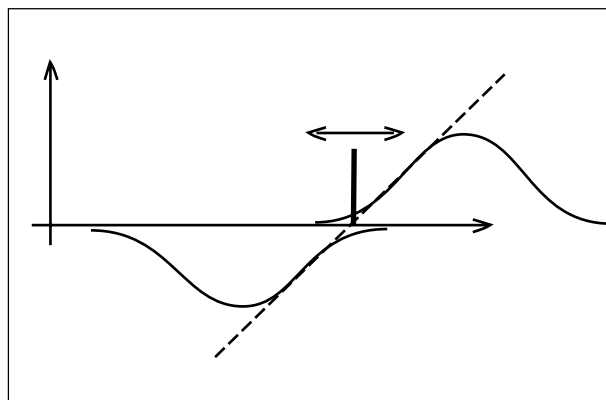
I cirkeldiagrammet

En frekvensmodulerad signal i cirkeldiagrammet är en visare som vrider sig fram och tillbaka i takt med nyttosignalen.

I vändögonblicket, när pilen är riktad snett uppåt eller snett nedåt, är fasvinkelns derivata noll. Där är frekvensen f_0 . När pilen rör sig som snabbast uppåt är frekvensen $f_0 + f_m$ och när den rör sig nedåt är frekvensen $f_0 - f_m$.

Detektering av FM-signalen

FM-signalen kan t ex detekteras genom att man låter den passera ett filter, eller två filter som på bilden. Filterflankerna får dämpa signalen. Då får signalen en amplitudmodulering som beror på frekvensen. Sedan återskapas nyttosignalen i en vanlig AM-detektor.



FM är FLERA signaler

Visst är FM flera signaler. Det matematiska uttrycket för FM-signalen kan utvecklas med hjälp av Besselfunktioner $J_x(m)$. Här intill syns resultatet när nyttsignalen är en sinussignal.

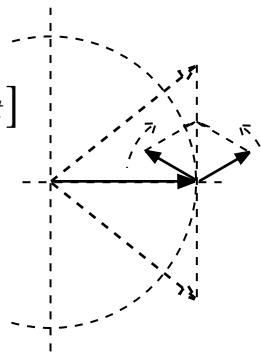
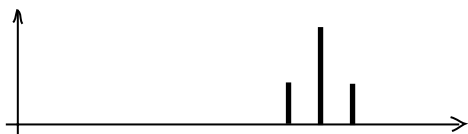
Många sidband

Det bildas inte bara ett par sidband som vid AM-modulering, utan många sidband, som även här uppträder parvis.

$$m = \frac{\Delta f_0}{f_m}$$

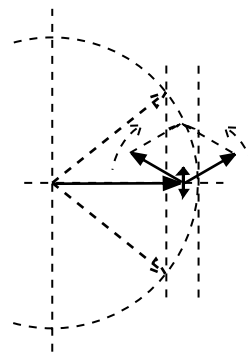
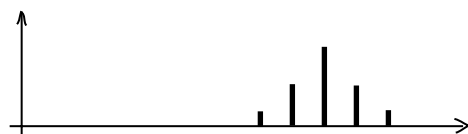
$$\begin{aligned} \cos 2\pi(f_0 + \Delta f_0 \cos 2\pi f_m t)t &= \\ = J_0(m) \cos 2\pi f_0 t &+ \\ + J_1(m) [\cos 2\pi(f_0 + f_m)t - \cos 2\pi(f_0 - f_m)t] &+ \\ + J_2(m) [\cos 2\pi(f_0 + 2f_m)t + \cos 2\pi(f_0 - 2f_m)t] &+ \\ + J_3(m) [\cos 2\pi(f_0 + 3f_m)t - \cos 2\pi(f_0 - 3f_m)t] &+ \\ + J_4(m) [\cos 2\pi(f_0 + 4f_m)t + \cos 2\pi(f_0 - 4f_m)t] &+ \\ + \text{OSV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= J_0(m) \cos 2\pi f_0 t \\ &+ J_1(m) [\cos 2\pi(f_0 + f_m)t - \cos 2\pi(f_0 - f_m)t] \end{aligned}$$

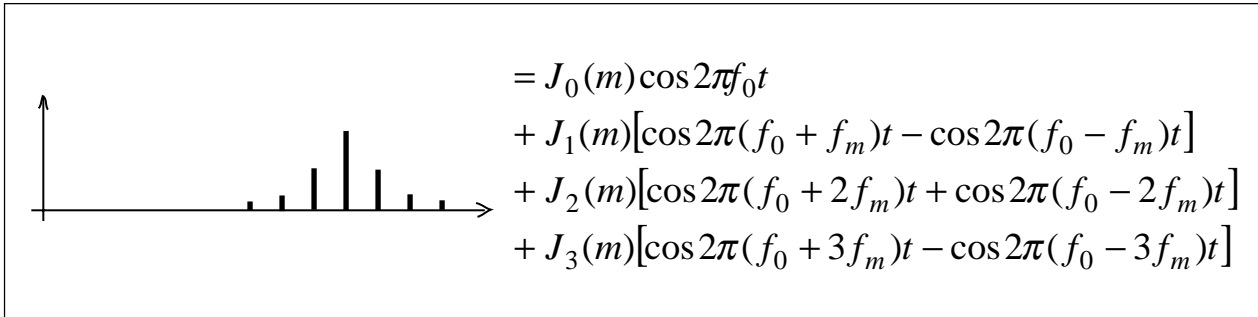


Första sidbands-paret ”vinkelmodulerar” signalen. Men signalens amplitud följer inte cirkeln. Signalen har även blivit amplitudmodulerad.

$$\begin{aligned} &= J_0(m) \cos 2\pi f_0 t \\ &+ J_1(m) [\cos 2\pi(f_0 + f_m)t - \cos 2\pi(f_0 - f_m)t] \\ &+ J_2(m) [\cos 2\pi(f_0 + 2f_m)t + \cos 2\pi(f_0 - 2f_m)t] \end{aligned}$$



Andra sidbands-paret ”amplitudmodulerar” signalen för att motverka den amplitudmodulering som första sidbands-paret åstadkom. När signalen sveper en gång fram och tillbaka går amplituden genom två max och två min. Därför har dessa sidband dubbla modulationsfrekvensen.



Udda sidband vinkelmodulerar, jämna amplitudmodulerar

På detta sätt adderas sidbandspar efter sidbandspar, udda sidbandspar vinkelmodulerar och jämna sidbandspar amplitudmodulerar, för att summasignalen skall följa cirkelns periferi.

När signalen vinkelmoduleras $\pm 90^\circ$ kommer den frekvenskomponent som har frekvensen f_0 att amplitudmoduleras till 100% av de jämna sidbandsparen, dvs den varierar från maxamplitud till noll när visaren sveper $\pm 90^\circ$.

Vad händer om man filtrerar FM-signalen?

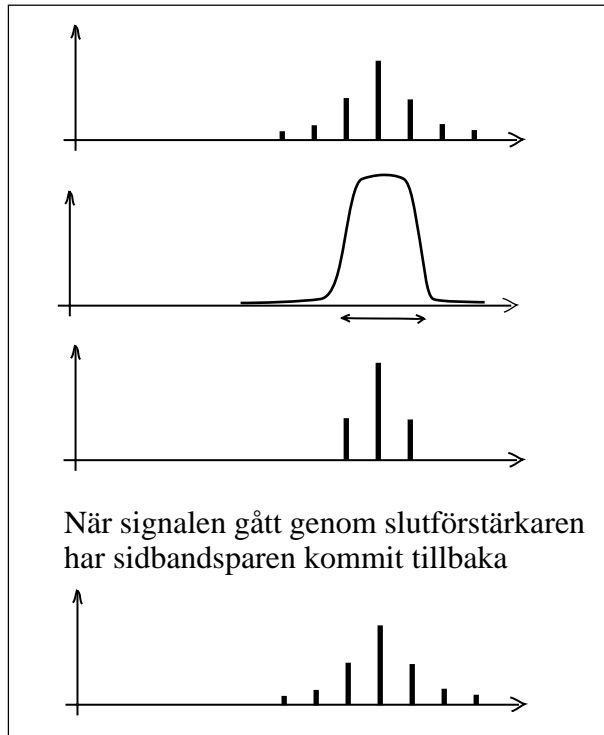
Bilden visar frekvensspektrat för en FM-signal. Vi matar signalen genom ett filter som skär bort de yttersta sidbandsparen. Vad händer?

Den filtrerade signalen saknar sidbandspar. Det betyder att signalen nu även är amplitudmodulerad.

Vad händer om signalen sedan matas genom en klass C-förstärkare?

Sändarförstärkaren (slutsteget) skall ha så hög verkningsgrad som möjligt, dvs strömförbrukningen från batteriet skall vara minsta möjliga för viss uteffekt. Högsta verkningsgrad på enklaste sätt får man om slutsteget arbetar i klass C. Men denna förstärkare är kraftigt olinjär och "klipper" signalens amplitud.

Om en filtrerad FM-signal matas genom en klass C-förstärkare kommer förstärkaren, i och med att den klipper, att tvinga signalvisaren att följa cirkeln. Klass C-förstärkaren tar bort AM-modulationen. Då återfår signalen de sidband man nyss filtrerade bort!



Gaussiskt filtrerad MSK

GSM-signalen är vinkelmodulerad. Signalen ändrar sitt fasläge för varje databit. Men för att frekvensspektrat inte skall bli onödigt stort filtrerar man bort de yttersta sidbandsparen i ett filter med Gaussisk filterkurva.

Efter filtreringen matas signalen till sändarslutsteget som bör ha så hög verkningsgrad som möjligt.

Det gäller att se till att inte hela filtreringen saboteras av sändarslutsteget.

Högklassiga FM-mottagare

Högklassiga FM-mottagare har oftast smalare MF-bandbredd än vad som skulle behövts för att släppa igenom FM-signalens alla sidbandspar. Men med en "limiter", ett steg som skär amplituden, lägger man tillbaka de saknade sidbandsparen före FM-detektorn.

Att ”stänga av” en signal

Säg att vi skall stänga av en omodulerad signal, kalla den bärvåg. Hur gör vi?

Det finns bara ett sätt

Det finns bara ett sätt att stänga av en bärvåg och det är följande:

- Första bilden visar bärvågen i cirkeldiagrammet.
- Nästa bild visar hur spänningvisaren delats upp på två, hälften så långa spänningvisare, båda med frekvensen f_0 . Detta kan vi göra utan att något egentligen händer.
- Därefter vrider vi de båda spänningvisarna 90° , den ena visaren medsols, den andra motsols. När visarna vridits färdigt blir summan noll. Bärvågen är avstängd.

Måste FM-moduleras

För att visarna skall börja vrida sig måste de FM-moduleras. Det bildas sidbandspar liknande första sidbandspar vid FM-modulering, sidbandspar både över och under bärvågsfrekvensen.

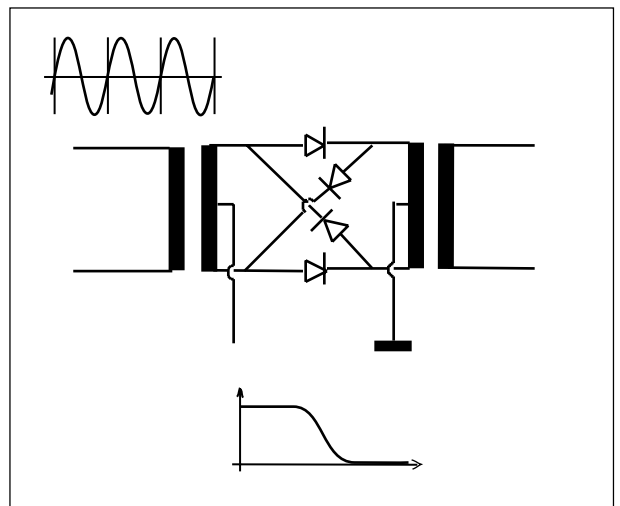
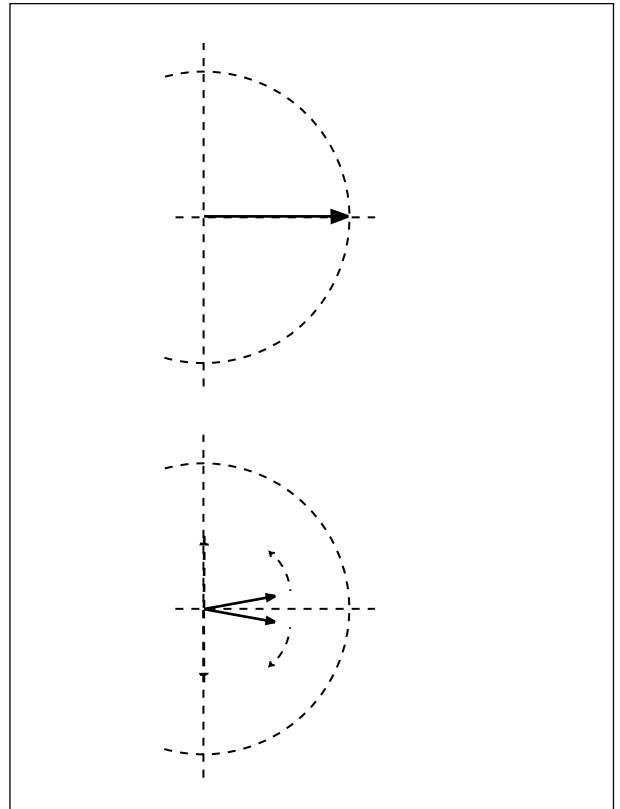
Ingen bärvåg, bara två sidband

När de båda visarna kommit igång så att de börjat snurra, den ena medsols, den andra motsols, då har vi inte längre någon signal vid f_0 , utan bara två sidband, det ena högre i frekvens, det andra lägre i frekvens.

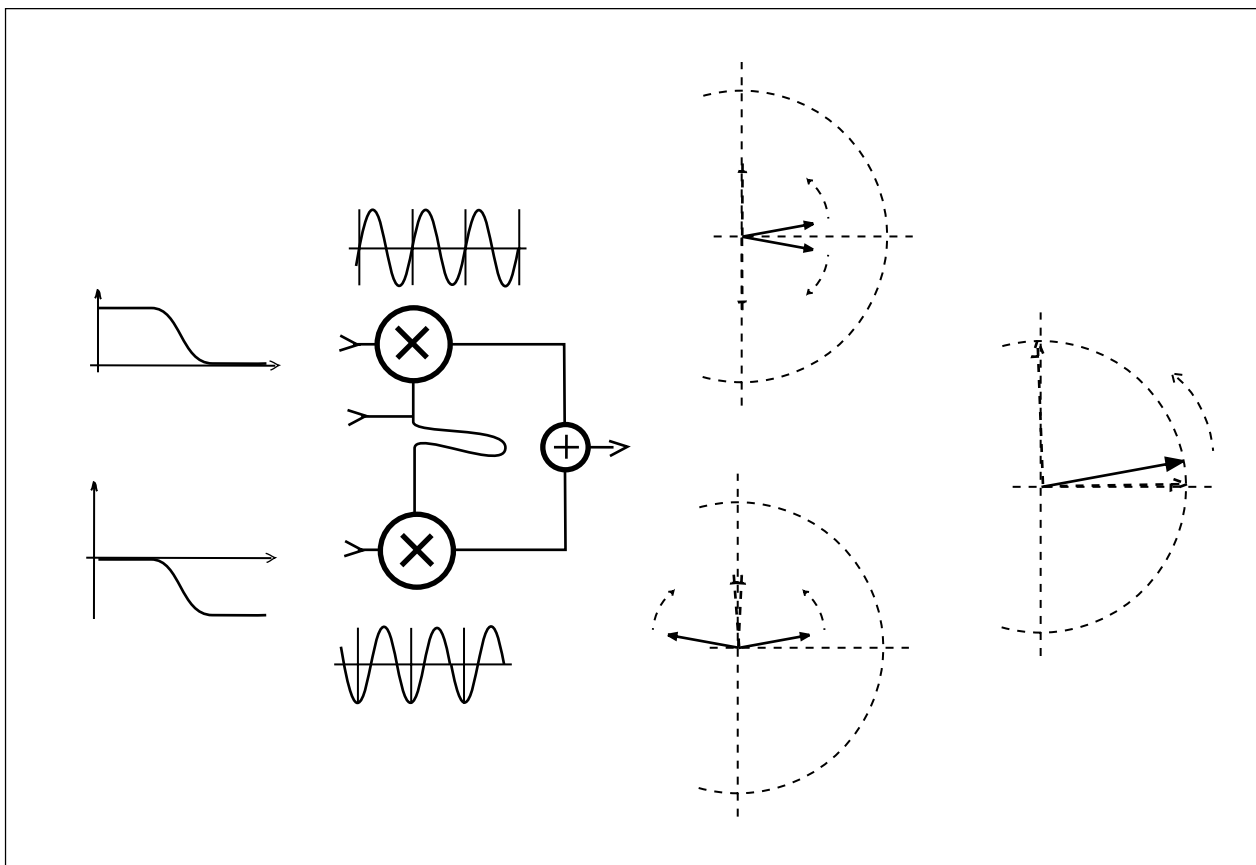
Hur mycket lägre och högre i frekvens beror på hur snabbt visarna snurrar. Ju snabbare visarna snurrar, desto större är skillnadsfrekvensen.

Stäng snabbt — brett spektrum

Om bärvågen skall stängas snabbt kommer skillnadsfrekvensen att bli stor för att visarna skall hinna snurra sina 90° på kort tid. Dessutom tillkommer en massa extra visare, sidbandspar, som behövs för att få igång visarna och bromsa upp dem.

**Stäng med ringmodulator**

Ringmodulatore kan användas för att på detta sätt stänga en bärvåg. När likströmmen genom dioderna avtar mot noll stiger dämpningen, dioderna fungerar som strömstyrda motstånd, och bärvågen minskar i takt med att likströmmen minskar, dvs spänningvisarna vrider i takt med att likströmmen minskar.



GSM utnyttjar två ringmodulatorer

Medan datasymbolen stänger bärvågen i den övre ringmodulatore, så kopplas bärvågen in i den undre ringmodulatore. Men denna bärvåg är 90° fasförskjutet. Vi får en växling från ena fasläget till ett fasläge som är 90° förskjutet.

Växlingen går till på så sätt att när övre bärvågen stängs bildas två spänningsvisare som vrider sig.

Den undre ringmodulatore öppnas med en negativ spänning, eftersom den matas med en signal som ligger 90° efter referensbärvågen, men vi vill till läget 90° före referensbärvågen.

När den undre ringmodulatore öppnas bildas också två spänningsvisare som vrider sig. Utspänningen blir summan. Vi ser att två av visarna ligger i motfas och tar ut varandra, medan de båda övriga samverkar till en enda visare som vrider sig 90° .

Fasmodulering genom amplitudmodulering

Dessa båda amplitudmodulatorer ger tillsammans en fasmodulerad signal. Villkoret är dock att den ena ringmodulatore stängs och den andra öppnas samtidigt, annars tar inte de två motriktade spänningsvisarna (sidbanden) ut varandra.

Vridning är frekvensskift

En visare som vrider sig har annan frekvens. Hur stor frekvensavvikelse behövs?

Vridningen får ta max en datasymbol, **T_s**

Vridningen får maximalt ta en datasymbol. På denna tid skall den högre frekvensen hinna 0,25 perioder (90°) mer än referensoscillatorn.

Datahastigheten i GSM är 270,8333.... kbit/s. Detta är även symbolhastigheten eftersom GSM skickar en databit per symbol. Av detta få man att frekvensen skiftas 67,7 kHz under en symbol för att fasen skall hinna vridas 90°.

Den basstationssändare i GSM som har hand om signaleringen skickar bl a ut datapaket som benämns "Frequency Correction Burst". Detta paket består enbart av nollor, som resulterar i att bärvågen skiftas 67,7 kHz högre i frekvens under hela datapaketet, en signal som är lätt att identifiera. Ficktelefonen börjar med att leta efter denna signal när den kopplas på.

Att låta bärvågen snabbt skifta frekvens ger bredbandiga sidbandspar. Därför, om vi vill uppnå minimal bandbredd, måste även frekvensskiftningen starta och stoppa mjukt. Då har vi inte hela symboltiden till förfogande för fasvridningen, utan måste öka frekvensskiftet något för att hinna vrida fasen ända fram på den tid som blir kvar.

Ju högre symbolhastighet, desto större frekvensskift

Ju högre symbolhastighet, ju kortare symboler, desto större måste frekvensskiftet vara för att vi skall hinna skifta fasen 90° på den tid som står till förfogande.

$$T_s = n \cdot \frac{1}{f_0} = (n + 0,25) \cdot \frac{1}{f_0 + \Delta f}$$

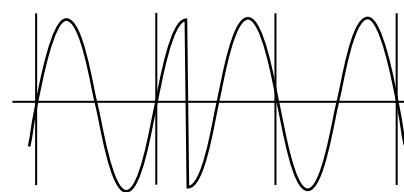
$$\Rightarrow \Delta f = \frac{0,25}{T_s} = 0,25 \cdot C[\text{baud}]$$

En växelspänning kan aldrig "hoppa"

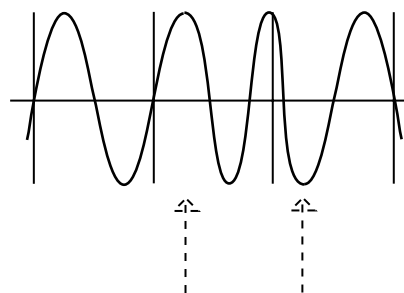
Man ser ofta i böcker som behandlar digital kommunikation hur man ritat en sinus-spänning som "hoppar" från ett fasläge eller ett amplitudvärde till ett annat. Detta är omöjligt!

Växelspänningen ändrar fas genom att "pendla snabbare eller långsammare" under ett kort tidsögonblick. Om tiden är kort komprimeras pendlingen i tiden (stort frekvensskift), men pendlingen finns där. Spänningen måste "hänga ihop", vara kontinuerligt deriverbar, utan hörn.

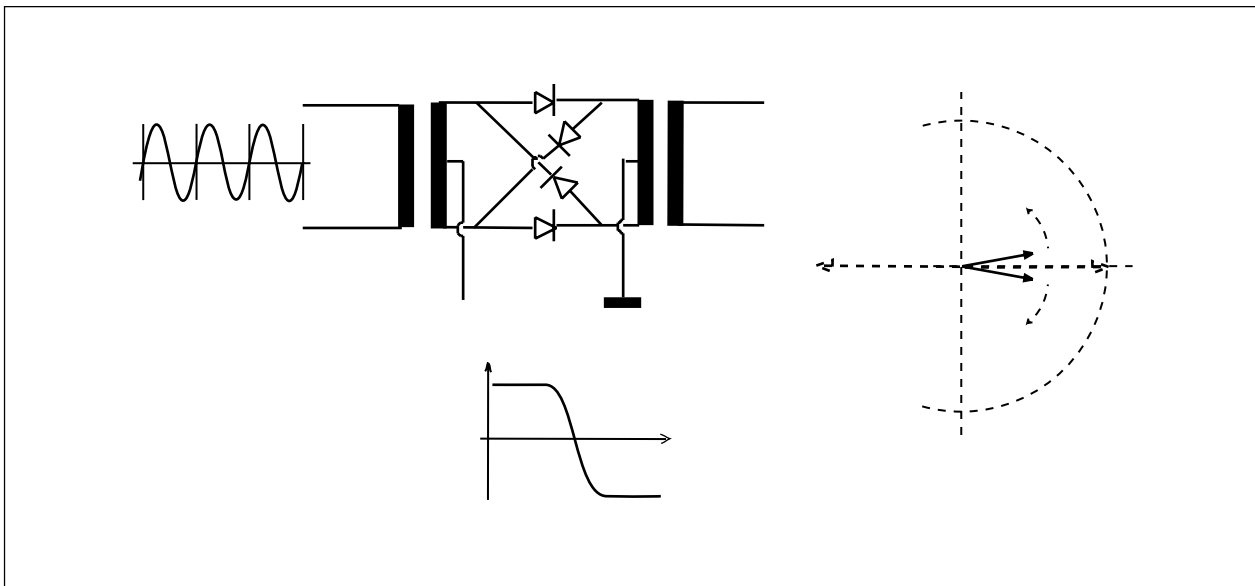
Växelspänningen kan även stänga av sig och sedan växa upp på nytt i ny skepnad. Detta sker i GSM, fast vi stänger av och växer upp samtidigt. Men växelspänningen kan omöjligt "hoppa".



Inte så ...



... utan så. Fasändring tar alltid tid.



CDMA är "frekvenshopp"

Vid CDMA låter man en digital kodsekvens modulera nyttsignalen. Låt oss börja med fallet att nyttsignalen inte innehåller någon information.

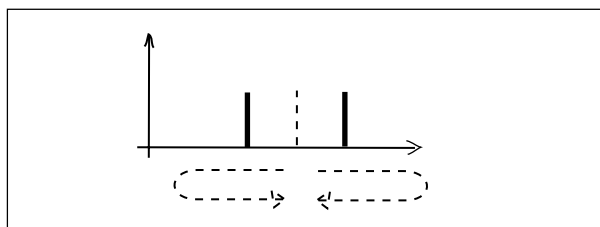
Nyttsignalen är i detta fall en bärvåg. Denna bärvåg matas in i en ringmodulator, som moduleras med kodsekvensen. Kodsekvensen växlar mellan positiv och negativ spänning.

Vid spänningsväxlingarna kommer bärvågen att ändra fasläge 180° . Denna ändring går till på så vis att när kodspänningen sjunker från positivt värde till noll stängs de dioder som leder, bärvågen stängs av. När kodspänningen sedan växer från noll till negativt värde öppnas de andra dioderna i ringmodulatorn och bärvågen kan passera, fast 180° fasvriden.

Att stänga av och sätta på bärvågen på detta sätt kan bara ske på ett sätt, nämligen genom att dela upp bärvågen på två spänningsvisare som vrider sig 180° , den ena medsols, den andra motsols.

Visarna som vrider sig är inget annat än två signaler som ändrar frekvens, den ena uppåt i frekvens, den andra nedåt i frekvens.

Genom att "filtrera" kodsekvensen så att spänningspulserna blir mjukt avrundade ser man till att frekvensspektrat inte blir onödigt brett. Fysikaliskt innebär detta att derivatan



i vinkelvridningen minimeras, dvs de båda spänningsvisarna "hoppar" inte till ytterfrekvenserna utan flyttar sig fram och tillbaka med jämn fart, dvs de befinner sig lika lång tid på alla frekvenser mellan ytterfrekvenserna.

Inte "hoppfrekvens" men väl "glidande frekvens"

Modulering med kodsekvens är fysikaliskt samma sak som att vrida på sändarens frekvensratt, eller egentligen dela upp signalen på två och ha två frekvensrattar. Den ena frekvensratten vrids uppåt i frekvens och sedan tillbaka. Den andra frekvensratten vrids samtidigt nedåt i frekvens och sedan tillbaka. Filtreringen av kodsekvensen gör att frekvensrattarna vrids mjukt.

De två signalerna som sveper över var sin del av kanalbredden, är modulerade med samma "smalbandiga" nyttsignal med låg symbolhastighet, så låg att de båda signalerna hinner svepa kanske 100 ggr eller mer fram och tillbaka under en enda symboltid.

INDEX

- A/D-omvandlare, 20
- Accessnät, 71
- ADC, 14
- ADPCM, 123
- Amplituddetektor, 106
- Amplitudmodulering, 89, 160
- AMPS, 12
- Analoga radiosystem, 12
- Anpassning, 46
- Antenndiversitet, 82
- Antennvinst, 49, 56, 58, 60, 62
- ARQ, 127
- Atmosfären, 68
- Avslutad kabel, anpassning, 46

- Bandbredd, 52
- Bandkabel, 36
- Bandspridningssystem, 128
- Baud, 92
- Bredbandig antenn, 47
- Brus, 112
- Brusfaktor, 112
- Brustemperatur, 112
- Brustäthet, 113
- Burst, 117
- Bärvåg, 88

- C/I, 115
- CDMA, 14, 128, 168
- CELP, 125
- Cirkulär polarisation, 45
- Code Division Multiple Access, 15
- Code Excited LPC, 125
- COFDM, 156
- Coulomb, 26
- CT0, 12
- CT1, 12
- CT2, 13, 138

- DAB, 15, 156
- D-AMPS, 14, 138
- Datapaket, 117
- Dator, strålning från, 37

- dBd, 62
- dBi, 62
- dBm, 62
- dBW, 62
- DCS-1800, 14
- DCS-1900, 14
- DECT, 14, 57, 76, 115, 129, 138
- Digital Audio Broadcast, 156
- Digital radiolänk, 13
- Digitala radiosystem, 13
- Dipol, 47
- Direkt Sekvens-CDMA, 153
- Dispersion, 134
- Diversitet, 82
- DS-CDMA, 153
- Duplex, 118, 138
- Dämpning i skog, 70
- Dämpning, kabel-, 57
- Dämpning, regn-, 68

- Elektrisk pendel, 25
- Elektron, 24, 28
- Envägsutbredning, 78
- ESA, Elektriskt styrd antenn, 135
- ESB, Enkelt Sidband, 95

- Faltningskod, 130
- Faraday, 26
- Fasmodulering, 105, 166
- FDD, 117, 139
- FDM, 117
- FDMA, 117
- Flervägsutbredning, 78
- FM-rundradio, 114
- Fourier-transform, 85
- Frekvens, 42
- Frekvensallokering, 146
- Frekvensdiversitet, 82, 128
- Frekvenshopp, 128
- Frekvensmodulering, 90, 162
- Frekvensplan, 83
- Frekvensskift, 167
- Frekvensspektrum, 83

-
- Frequency Shift Keying, 144
 - Freznel-zon, 72
 - Fri sikt, 72
 - FSK, 144
 - Fyrkantspänning, 84
 - Förkortad dipol, 47

 - Gaussiskt filtererad MSK, GMSK, 144, 164
 - GFSK, 144
 - Gnistgap, 30
 - Gravitationsvågor, 27
 - GSM 1800, 14
 - GSM 900, 14
 - GSM, 57, 76, 110, 115, 120, 130, 138

 - Half-rate, 125
 - Halvvågsantenn, 42
 - Halvvågsdipol, 47
 - Hartleys lag, 96
 - Hastighet, laddningens -, 34
 - Helixantenn, 45
 - Hertz, 30
 - Horisontell polarisation, 45

 - Impedans, 52
 - Interleaving, 20, 130, 143
 - Intersymbolinterferens, 79, 134
 - IS-95, 14
 - ISDN, 14, 102
 - ISI, 79, 134

 - Jonosfären, 65
 - Jordplan, 48

 - Kabel, 35
 - Kabeldämpning, 57
 - Kanaldelning, 138
 - Kanalkodare, 20
 - Kanalkodning, 130, 142
 - Koaxialkabel, 36
 - Koherent detektor, 106
 - Kohär, 31
 - Kopparkabel, 103
 - Kort reflex, 78
 - Kvantiseringsbrus, 101

 - Laddning, 34
 - LPC, Linear Predictive Coding, 124
 - Lång reflex, 78
 - Långrådsantenn, 44
 - Länkbudget, 57
 - Lärsekvens, 20, 136

 - MAHO, 119, 141
 - Makrodiversitet, 82
 - Marconi, 32
 - Maxwell, 27
 - Mikrodiversitet, 82
 - Mobilteleväxel, 21
 - Modulering, 88
 - Motstånd, 43
 - Mottagarantenn, 52
 - Mottagarkänslighet, 112
 - MSK, 144
 - Multiple Access, 140

 - NMT 450, 12
 - NMT 900, 12
 - NMT, 114
 - Nyttosignal, 88

 - Omega-systemet, 65
 - Optokabel, 103

 - Parabolantenn, 30, 51, 59, 61
 - PCM, 122
 - PDC, 14, 138
 - Pendel, elektrisk, 25
 - pi/4-DQPSK, 145
 - Polarisation, 45
 - Polarisationsdiversitet, 129
 - Popov, 31

 - QAM, 145
 - QPSK, 145

 - Radiomottagaren, 106
 - Radiosändaren, 107
 - Reflektorantenn, 51
 - Reflex, 78
 - Regndämpning, 68
 - REL, 124
 - Residual Excited LPC, 124
 - Resonanskrets, 43
 - Riktantenn, 50, 135
 - Riktningdiagram, 29
 - Rombantenn, 44
 - Rumsdiversitet, 82, 129
 - Rymd-diversitet, 82
 - Räckvidd, 57

 - S/N, 114
 - Satellit-TV, 58, 69
 - SDH, 13
 - Shannons lag, 101

Sidband, 95, 96
Signal/brus-förhållande, 114
Signaleringshastighet, 92
SIM-kort, 20
Simplex, 118
Sinusspänning, 84
Skog, 70
Skärmning, 40
Smart antenn, 61
Spole, 38
SSB, Single Side Band, 95
Stadsmiljö, 75
Strålningsresistans, 52
Ström, 34
Symbol, 98
Syre, 68
Sändare, 107

TACS, 12
Talkodare, 20
Talkodning, 142
Talspänning, 86
TDD, 117, 139
TDMA, 117
TDMA-ram, 140
Telenätet, 96, 102, 122
Tidlucka, 117, 140
Tidplan, 83
Trådlös telefon, 12
TV, 114

Uteffekt, 138
Utjämnare, 136

Vattenånga, 68
Vegetationsdämpning, 71
Verkningsgrad, 52
Vertikal polarisation, 45
Vinkeldiversitet, 82, 129
Våglängd, 42

W-CDMA, 15, 154

Yagi-antenn, 50, 52

Öppen kabel, 46
Ørsted, 26