

TELEKOMMUNIKATION

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 REDAN DE GAMLA GREKERIMA

- 1.1 Telekommunikation
- 1.2 Telegrafi
- 1.3 Telefoni
- 1.4 Radio
- 1.5 Standardisering och samarbete

2. MODULERING

2.1 Inledning

Amplitudmodulering

Allmänt om amplitudmodulering

Amplitudmodulering med dubbelt sidband

Generering av DSB-signaler

Detektering av DSB-signaler

Amplitudmodulering med enkelt sidband

Amplitudmodulering med stympat sidband

Sammanfattning

Vinkelmodulering Allmänt om vinkelmodulering

Frekvensegenskaper

Generering av FM- och PhM -signaler

Detektering av FM- och PhM-signaler

Jämförelser med AM

- 2.4 Pulsmodulering
 - 2.4.1 Grundläggande begrepp
 - 2.4.2 Sampling
 - 2.4.3 Pulsamplitudmodulering
 - 2.4.4 Pulsbredd- och pulspositionsmodulering
 - 2.4.5 Kvantisering
 - 2.4.6 Pulskodmodulering
 - 2.4.7 Deltamodulering

3 TRANSMISSIONSMEDIA

- 3.1 Inledning
- 3.2 Blankledning
- 3.3 Parkabel
- 3.4 Koaxialkabel
- 3.5 Vågledare
- 3.6 Optisk fiber
- 3.7 Radioförbindelser
 - 3.7.1 Grundläggande begrepp
 - 3.7.2 Radiolänk
 - 3.7.3 Satellitförbindelse

4 MULTIPLEX

- 4.1 Inledning
- 4.2 Frekvensmultiplex
- 4.3 Tidsmultiplex
 - 4.3.1 Allmänna principer
 - 4.3.2 Organisation av/ ett PCM-system

5 N ÄT

- 5.1 **Inledning**
- 5.2 Telenätet
- 5.3 Rundradionätet
- 5.4 Datanät

6 FRAMTIDEN REFERENSLISTA

1.1 Telekommunikation

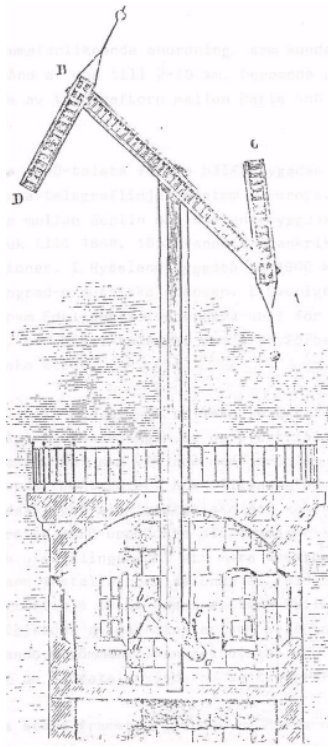
"Begreppet telekommunikation innefattar utsändning, överföring och mottagning av tecken, signaler, bilder, ljud, skrift eller uppgifter av annat slag via tråd, radio, optiska eller andra elektromagnetiska system."

Det anser i alla fall Internationella Teleunionen (ITU) som är högsta internationella organ inom telekommunikationsområdet. Definitionen klassificerar den gamla optiska telegrafen som ett telekommunikationssystem, men inte postväsendet. Tolkat bokstavligt sker telekommunikation när man "delar med sig av något på avstånd". (Begynnelsledet tele är grekiska och betyder fjärran, medan efterledet kommunikation kommer från latinets verb communicare: dela med sig.)

1.2 Telegrafi

De äldsta kommunikationssystemet var förmodligen binär. Vårdkasarna som antändes när fienden siktades bildade ett sådant system. Det är givet att endast enstaka mycket viktiga meddelanden kunde överföras med dessa system. Övriga meddelanden sändes på det vanliga sättet, dvs. med kurir. Mer avancerad telekommunikation bedrev indianerna med sina röksignaler. Med en något ansträngd liknelse var detta en sorts puffamplitudmodulering.

Det dröjde ända fram till slutet av 1700-talet innan den stora utvecklingsprocessen startade. Som vid många andra genombrott för ny teknik skedde det under ett krig, Denna gång gällde det Frankrike efter revolutionen Frankrike förde krig på många fronter och kommunikationerna var långsamma. Den franske ingenjören Claude Chappe konstruerade då en optisk telegraf (figur 1.1),



Figur 1.1 Chappes optiska telegraf

en semaforliknande anordning, som kunde avläsas på ett avstånd av upp till 2-10 km, beroende på terrängen. En linje av telegraftorn mellan Paris och Lille stod klar 1794.

Under 1800-talets första hälft byggdes mängder av optiska telegraflinjer runtom i Europa. En 750 km lång linje mellan Berlin och Koblenz byggdes 1832 och var i bruk till 1848. 1852 fanns i Frankrike 558 semaforstationer. I Ryssland byggdes en 1900 km lång linje Leningrad-preussiska gransen. I Sverige konstruerade Abraham Edelcrantz (sedermera chef för Kungliga Teatern) en optisk telegraf som 1796 förband flera svenska städer.

Parallellt med att de optiska telegraflinjerna byggdes ut pågick utvecklingen av de elektriska kommunikationssystemen. Det som vållade mest problem var konstruktionen av mottagaren. Åtskilliga metoder provades, huvudsakligen elektrostatiske och kemiska, innan de av Ørsted 1820 upptäckta elektromagnetiska effekterna ledde utvecklingen mot ett mera fruktbart område. I England installerades sålunda år 1839 en 21 km lång telegraflinje längs Great Western Railway. Detektorerna utgjordes av magnetnålar som avlänkades av inkommande strömmar. Järnvägsbolagen var förövrigt länge de största användarna av telegraflinjerna.

Nasta stora framsteg gjordes av Morse och Vail i USA omkring 1840 då de konstruerade den första användbara elektromagnetiska skrivaren. Morse konstruerade också en kod där bokstäver som var vanliga i engelska språket fick korta teckenkombinationer och ovanliga bokstäver långa kombinationer. Man lyckades så småningom övertyga kongressen om att hans telegrafsystem var värt att satsa på och 1845 öppnades en linje mellan Washington och Baltimore. Längden var blygsamma 60 km, men redan 1866 hade telegrafnätet i USA en sammanlagd längd av 120.000 km. Nu var det främst tidningarna och nyhetsbyråerna som påskyndade expansionen.

Om telegraftekniken hade etablerats i och med Morses och andras insatser kvarstod vid 1800-talets mitt ett hinder för vidare framgång, nämligen havet. Den isolering man kunde omge koppartrådarna med var ännu för dålig för att kunna fungera i vatten. Bland de många forskare som sökte bemästra problemen var det två broder Brett som lyckades först. De lade år 1850 ut en kabel under engelska kanalen. Tyvärr blev den ganska kortlivad. En fiskare fick upp den i trålen, kapade av en bit och visade i triumf upp det nya sjögräs han funnit. Följande år kom emellertid bröderna tillbaka med en fiskarsäkert armerad kabel och den förblev i bruk i många år.

Framgången med kanalkabeln initierade försök runt om i världen att lägga sjökablar och 1860 fanns det telegrafisk förbindelse mellan London och indiska kontinenten. Det största projektet var emellertid kabeln under Atlanten. Detta gigantiska arbete kunde efter flera motgångar slutföras 1858 och den 14 augusti kunde drottning Viktoria sända sina gratulationer till president Buchanan i USA. Men inte heller atlantkabeln blev långlivad. En slarvig operator matade den med för hög spänning, isoleringen förstördes och förbindelsen bröts.

Efter några års uppehåll under inbördeskriget i USA återupptogs försöken att åstadkomma en varaktig förbindelse över Atlanten och 1866 hade man lyckats lägga ut två fungerande kablar. Fartyget man använde var s/s Great Eastern, länge världens största fartyg och det enda som kunde bära 6000 km sjökabel i lastrummen.

1.3 Telefoni

Även om det ibland rader delade meningar om vem som först uppfann telefonen, kan det inte vara någon tvekan om vem som gjorde den känd och brukbar. Det var Alexander Graham Bell. Den 10 mars 1876 talade Bell för första gången med sin assistent i telefon, föredömligt kort. Han sa: *Mr Watson, come here, I want you.*

Åtskilliga nät av telefonlinjer byggdes ut under 1800-talets två sista decennier, i vissa fall under starkt motstånd från telegrafbolagen. Runt sekelskiftet hade nackdelarna med mångfalden av nät blivit uppenbar och de flesta europeiska länderna monopoliserade telefonkommunikationerna. Vid sekelskiftet kom också två uppfinningar som skulle betyda mycket för telefonin. Begravningsentreprenören Almon Strowger uppfann en automatväljare och matematikern Michael Pupin visade att induktanser inkopplade med jämna mellanrum på ledningarna förbättrade frekvensgången i talområdet.

Utbyggnaden av telefonförbindelserna över stora avstånd krävde förstärkare. Effektiva sådana utvecklades också när efterfrågan på telekommunikationer ökade. Tillförlitligheten i de elektroniska komponenterna var till att börja med skral och det dröjde ända till 1956 innan den första atlantkabeln för telefoni lades ned. (Redan 1927 hade emellertid det första transatlantiska telefonsamtalet utväxlats men då via radio.) Egentligen är det häpnadsväckande att man vågade sig på experimentet att lägga de komplicerade förstärkarna (rörbestyckade!!) på havets botten där de skulle fungera i minst 20 år.

Det senaste skedet i telefontrafikens historia inleddes när Telstarsatelliten sköts upp 1962. Den kunde överföra 80 samtidiga telefonsamtal. Sedan dess har rymden fyllts med satelliter av alla slag och telefoni är inte längre den intressantaste kommunikationsformen.

1.4 Radio

"Radioteknik benämnes den gren av växelströmstekniken som för immateriell kommunikation begagnar elektriska strömmar av så högt periodtal, att den fria elektriska strålningen (därav namnet) från härav genomflutna, lämpligt formade ledare (antennor) blir av väsentlig betydelse."

I allt väsentligt står sig denna beskrivning från 1932 års Nordisk Familjebok än idag. Det är också av tradition man delar in telekommunikationstekniken i telegrafi, telefoni och radio samt datorkommunikation, även om dessa begrepp verkar vara överlappande. I vår framställning låter vi radio beteckna all kommunikation med elektromagnetiska vågor i fri rymd, inkluderande radiotelegrafi och radiotelefoni.

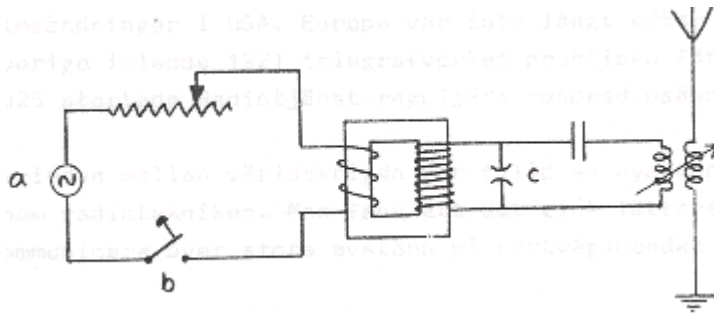
Om utvecklingen av trådbunden telegrafi och kanske också telefoni verkade idyllisk, kan man knappast säga det om radiotekniken eller datakommunikationen. 1864 presenterade Maxwell sin teori om elektromagnetismen, grundad på rent matematiska resonemang. Under de följande tre decennierna byggdes en helt ny vetenskap upp. Hertz i Tyskland, Branly i Frankrike och Lodge i England är de stora namnen i denna utveckling.

Med ett sådant intresse för elektromagnetisk strålning var det bara en tidsfråga innan någon skulle kunna överföra meddelanden trådlöst. År 1896 hade också

flera uppfinnare oberoende av varandra lyckats med uppgiften. Popoff i Ryssland och framför allt Marconi i Italien är de som givits den största äran.

De första adiosändarna var nistsändare, i princip kopplade enligt figur 1.2. Med en induktionsspole alstrades så hög spänning över ett gnistgap att urladdning ägde rum. Urladdningen alstrade i sin tur i antenssvagningskretsen en avklingande signal med en frekvens av storleksordningen 500 kHz. Med telegrafnyckeln kunde längre eller kortare serier av urladdningar åstadkommas motsvarande långa och korta symboler i morsekoden. Dessa sändare var mycket bredbandiga och störde effektivt all annan kommunikation på upp till 10 mils avstånd.

a) Lågfrekvent växelströmgenerator b) telegrafnyckel c) gnistgap



De första mottagarna använde som detektor en så kallad koherer, ett litet glasrör med metallpulver mellan två elektroder. Koherern uppfanns av Edouard Branly 1891. Man fann att elektromagnetiska vågor fick metallpulvret att packas och således öka sin ledningsförmåga. Denna ökning kunde avkännas med en galvanometer eller styra en skrivanordning.

Marconi flyttade 1896 till London för att exploatera sin uppfinning och det lyckades han väl med. 1897 kunde han med en antenn buren av en drake sända signaler över ett avstånd av 14 km. Redan fyra år senare sände han det första meddelandet över Atlanten (bokstaven S i morsekod).

Nya framgångar för radiotekniken noterades när Lee DeForest 1906 uppfann trioden. Den ingick snart i alla sändare och mottagare. Till sjöss fick tekniken särskilt stor betydelse. Tidigare hade man radiokontakt med land endast några hundratals km ut från kusten. Nu kunde man också med fartygsantennerna nå land från varje punkt på oceanerna.

Vid första världskrigets utbrott hade förstärkningstekniken utvecklats så att också radiotelefoner var möjliga över större avstånd och vid krigsslutet förekom rundradiosändningar i USA. Europa var inte långt efter och i Sverige inledde 1921 telegrafverket praktiska försök. 1925 startade Radiotjänst reguljära rundradiosändningar.

Perioden mellan världskrigen var fylld av nya upptäckter inom radiotekniken. Man fann att det gick lättare att kommunicera över stora avstånd på kortvågsbandet än på långvågsbandet vilket man tidigare hade använt. Nya modulationsformer uppfanns (vinkel- och pulsmodulation) som senare skulle få stor betydelse inom datakommunikationen. Radarprincipen utvecklades och lade grunden för dagens mikrovågstransmission. Uppräkningen skulle kunna fortsättas länge, men låt oss avsluta den med att relatera televisionens framväxt.

Mot slutet av 1920-talet arbetade engelsmannen John Baird med roterande

perforerade skivor, så kallade nipkowskivor. Man lyckades få BBC att 1929 påbörja provsändningar efter denna princip. Samma år demonstrerade rysk-född Vladimir Zworykin i USA ett helt elektroniskt system. Sju år senare fanns i Storbritannien och Tyskland reguljära TV-sändningar! 1939 följde USA efter. Andra världskriget satte till vidare stopp för utvecklingen av television, men efter kriget tog den fart igen, hjälpt av krigstidens intensiva radarforskning. 1946 hade fyra länder (USA, Storbritannien, Frankrike och Sovjetunionen) reguljära TV-sändningar, 1957 var det ungefär 50 länder och 1965 nära 100. Det utges numera en bok med alla länders radio och TV kanaler som heter World Radio and TV handbook.

1.5 Standardisering och samarbete

Inom få områden är det så viktigt med standardisering och internationellt samarbete som inom telekommunikationsområdet. Låt oss välja ett vardagligt exempel och se var standardiserings- och samarbetskraven kommer in i funktionen hos en vanlig FM-mottagare.

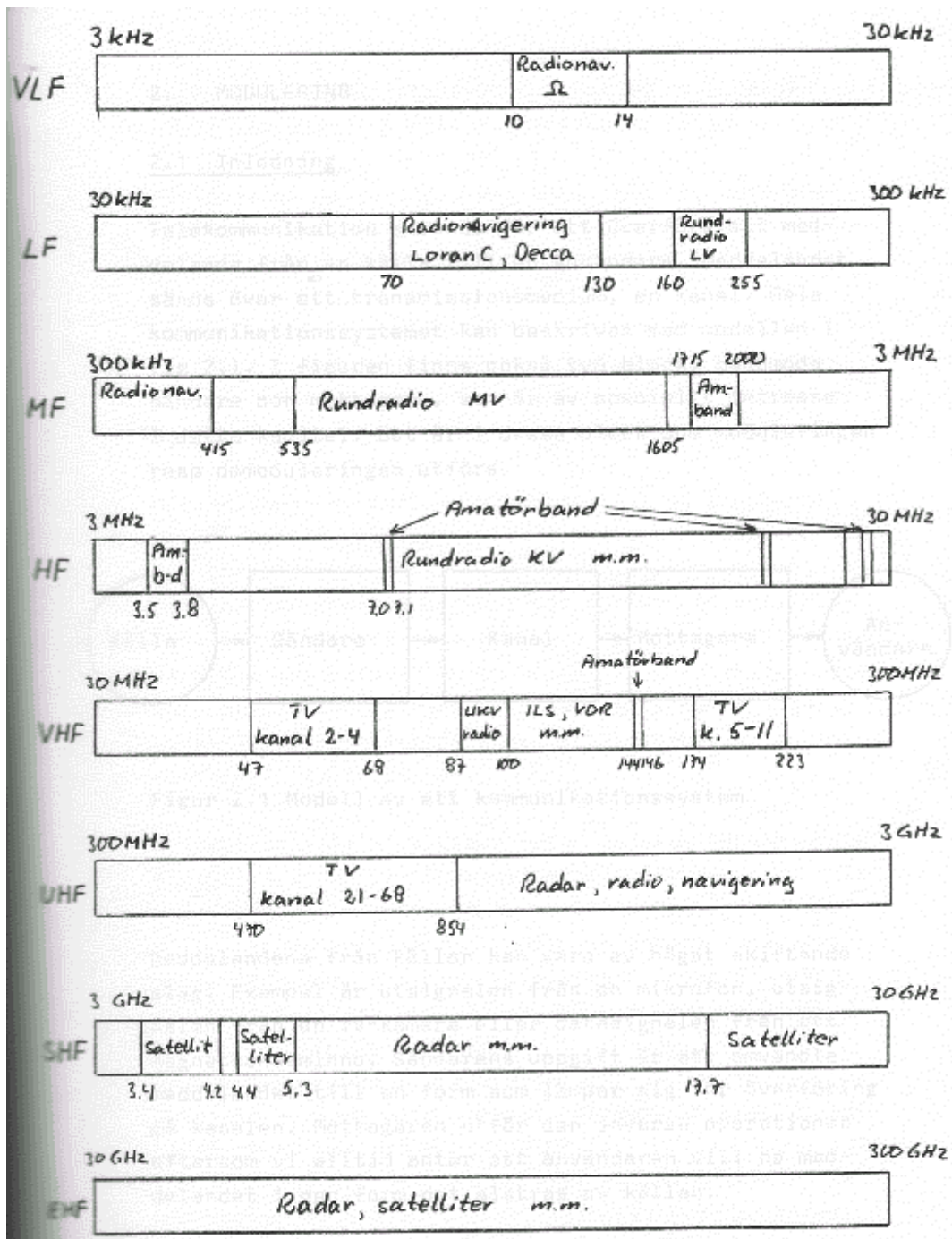
Först och främst måste var FM-mottagare ha ett frekvensband som rymmer de stationer vi vill ta in. Här har man kommit överens om att bandet 87.5-100 MHz skall reserveras för FM-rundradio. Inom detta band kan flera stationer få sända på samma frekvens, men de måste då ligga så långt från varandra geografiskt att de inte stör varandra. Liknande överenskommelser existerar för resten av det användbara frekvensområdet, Figur 1.3 ger en bild av hur frekvensområdet är uppdelat.

Var FM-mottagare bör också vara konstruerad för samma modulationsparametrar som de som används av sändaren. (Samma frekvenssving, bandbredd o s v. Mera därom i kapitel 2). Helst bör sändarna i olika länder ha samma system.

Skulle mottagaren vara utrustad med stereodekoder skall givetvis den också vara anpassad till sändaren. Också här är det önskvärt att man kan ta emot utländska sändningar.

Uppräkningen av standarddetaljer skulle kunna fortsättas ännu längre: in- och utgångsnivåer och impedanser, mellanfrekvenser o s v.

Det internationella samarbetet bedrivs inom ITU, Internationella Teleunionen, med dess underavdelningar CCITT (Comite Consultatif International Telegraphique et Telephonique), CCIR (Comite Consultatif International Technique des Communication Radioelectriques) och IFRB (International Frequency Registration Board). ITU som har hundraåriga anor är numera ett FN-organ med säte i Geneve,

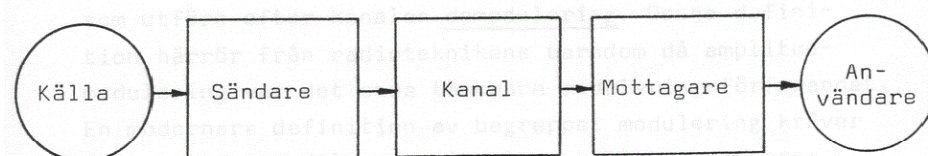


Figur 1.3 Disposition av frekvensområdet 3 kHz - 300 GHz

2. MODULERING

2.1 inledning

Telekommunikation används för att överföra ett meddelande från en källa till en användare. Meddelandet sänds över ett transmissionsmedium, en kanal. Hela kommunikationssystemet kan beskrivas med modellen i fig 2.1. I figuren finns också två block, benämnda sändare och mottagare, som är av speciellt intresse i detta kapitel. Det är i dessa block som moduleringen resp demuleringen utförs.



Figur 2.1 Modell av ett kommunikationssystem

Meddelandena från källan kan vara av högst skiftande slag. Exempel är utsignalen från en mikrofon, utsignalen från en TV-kamera eller datasignalen från ett magnetbandsminne. Sändarens uppgift är att omvandla meddelandet till en form som lämpar sig för överföring på kanalen. Mottagaren utför den inverse operationen eftersom vi alltid antar att användaren vill ha meddelandet i den form det alstras av källan.

En vanlig klass av meddelanden är de som har sin effekt koncentrerad till ett frekvensområde (ω, W) ett så kallat basband. Ibland utesluts frekvenserna allra närmast noll men signalen kallas fortfarande basbandssignal.

Ett exempel på en sådan basbandssignal är telefonisignalen, som enligt internationell standard har uppta frekvensbandet 300-3400 Hz.

En vanlig klass av kanaler är å andra sidan de som tillåter transmission av bandpassfilter, dvs sådana signaler som bär sin effekt koncentrerad i frekvensbandet (f_1, f_2) där vanligen $f_1 - f_2 \ll f_1$.

Omvandlingen av basbandssignalen till en passbandssignal kallas modulering och den inversa proceduren som utförs efter kanalen demulering. Denna definition härrör från radioteknikens barndom då amplitudmodulering var det enda tänkbara moduleringsförfarandet. En modernare definition av begreppet modulering kräver inte att den modulerade signalen skall ha bandpasskaraktär. Då innefattas också olika former av pulsmulering i definitionen.

Insignalen till modulatorens antas i detta kapitel vara analog, dvs den är tidskontinuerlig och kan anta alla amplitudvärden i ett visst, vanligen ändligt, intervall. Den matematiska behandlingen kommer till yttermera visso att begränsas till sinusformade signaler som uppenbarligen är analoga. Vi skall senare också beröra överföring av digital information (datatransmission) Digitala signaler är tidsdiskreta och kan anta ett ändligt antal amplitudvärden. De kan följaktligen beskrivas med en talföljd, exempelvis 1 0 0 1 1 0 0 1 4. Det är värt att notera, att det finns signaler som varken är analoga eller digitala. Man kan tänka sig signaler som är kontinuerliga i tiden men antar diskreta

amplitudvärden och vice versa. Uppställningen i figur 2.2 visar hur de fyra olika signaltyperna betecknas och ger också exempel på sådana signaler.

	Kontinuerlig tid	Diskret tid
Kontinuerlig Amplitud	Analoga signaler Ex : sinussignal	Tidsdiskreta signaler Ex: samplad sinussignal
Diskret Amplitud	Kvantiserade signaler Ex: faksimilsignal	Digitala signaler Ex: signal från remslasare

Figur 2.2 Klassificering av signaler

I de följande avsnitten skall vi presentera några olika former av modulering. Vi börjar som sig bör med den äldsta och mest lättanalyserade formen, amplitudmodulering, fortsätter med vinkel modulering (frekvens- och fasmodulering) och avslutar med några olika former av pulsmodulering, bl a pulskodmodulering och deltamodulering. De sistnämnda är intressanta eftersom de modulerade signalerna där är digitala trots att källsignalen är analog.

2.2 Amplitudmodulering

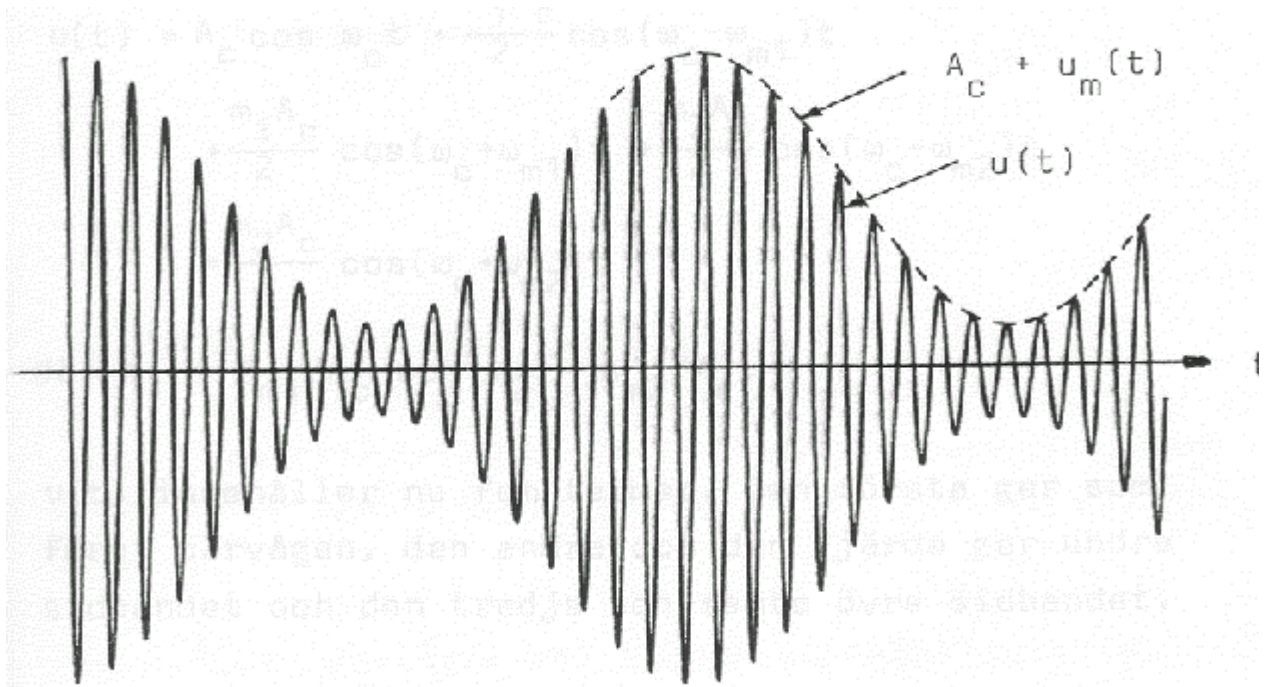
2.2.1 Allmänt om amplitudmodulering

Vid amplitudmodulering utgår man från en bärvågssignal vars amplitud far påverkas av meddelandesignalen. Resultatet kallas konventionell amplitudmodulering eller amplitudmodulering med dubbelt sidband. Genom att filtrera sådana signaler skapar man andra varianter av amplitudmodulering: amplitudmodulering med enkelt sidband och med stympat sidband.

Vi förutsätter att meddelandesignalen är sinusformad även om det just vid amplitudmodulering är relativt enkelt att behandla allmänna periodiska signaler eller vilka andra signaler som helst som uppfyller vissa krav på bandbredd och amplitud. Naturligtvis är det så att endast den senare sortens signaler är av intresse i kommunikationssammanhang. En periodisk signal är känd för all framtid så snart en period registrerats i mottagaren. Överföring av information fordrar ett visst mått av slumpmassighet hos meddelandesignalen. För att kunna behandla slumpmässiga signaler behöver vi emellertid en kraftfullare matematik än den vi nu förfogar över, nämligen teorin för stokastiska processer.

2.2.2 Amplitudmodulering med dubbelt sidband (DSB)

När man på 1920-talet införde reguljära rundradioutsändningar var det naturligt att man använde amplitudmodulering med dubbelt sidband, förkortat AM-DSB, eller helt enkelt DSB, DSB-signalen är enkel att alstra och ännu enklare att demodulera. Sistnämnda faktum är givetvis väsentligt när antalet mottagare är stort. Amplitudmodulering blev snart standard och används än i dag i utsändningar på lång- mellan- och kortvågsbanden. (Se fig 1.3)



Figur 2.3 Amplitudmodulering $U_m(t) = A_m \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$

U_m den modulerade bärvågen, A_m den modulerande signalen, ω_m omega m, t tiden.

Resultaten kan uttryckas grafiskt som i fig. 2.4. Varje moduleringsfall representeras av två spektraldiagram där X-axeln är frekvensaxel och Y-axeln är amplitudaxel.

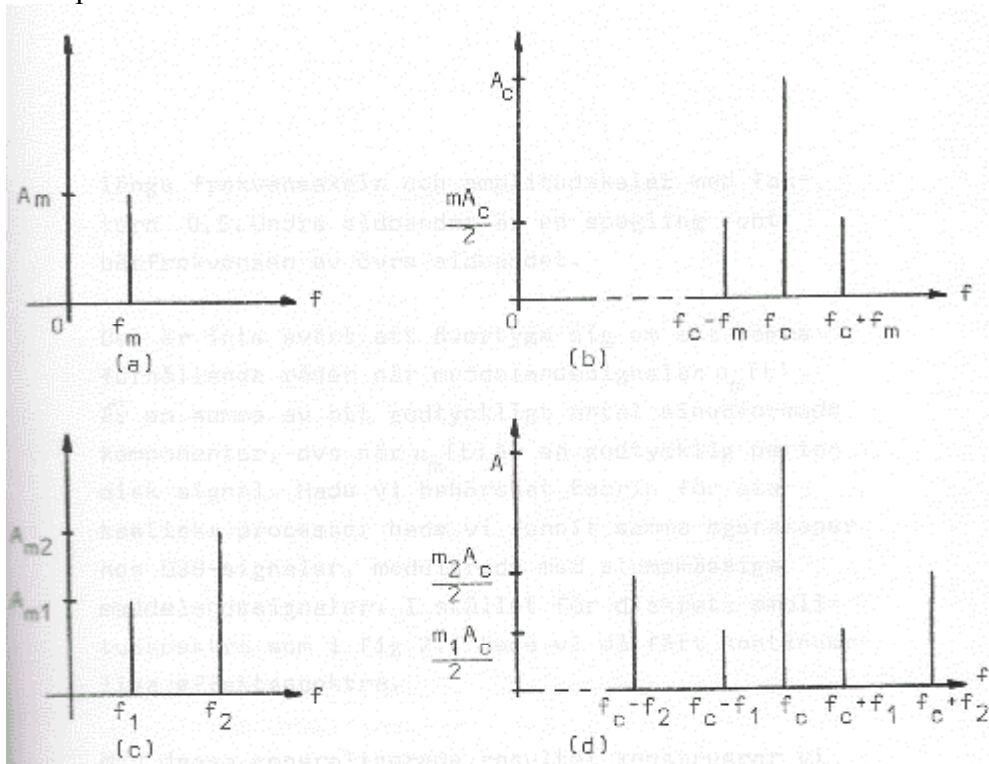


Fig 2.4 (a) och (c) amplitudspektra för meddelandesignaler, (b) och (d) spektra för resulterande DSB-signaler.

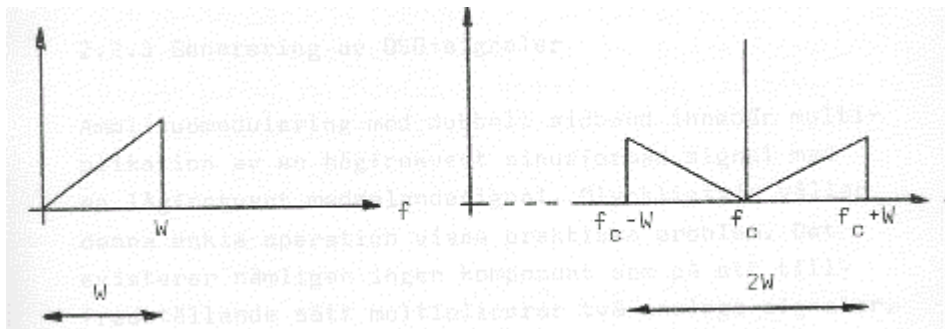
Fig 2.4 (c) visar amplitudspektrum motsvarande spektra när meddelandesignalen består av två cosinussignaler.

Fig 2.4(c)-(d) låter oss skönja en karakteristisk egenskap hos spektra för amplitudmodulerade signaler. DSB-signalens övre sidband känns igen som meddelandesignalens spektrum uppflyttat $-F$ Hz längs frekvensaxeln och amplitudskalat med faktorn $0,5$. Undre sidbandet är en spegling runt bärfrekvensen av övre sidbandet.

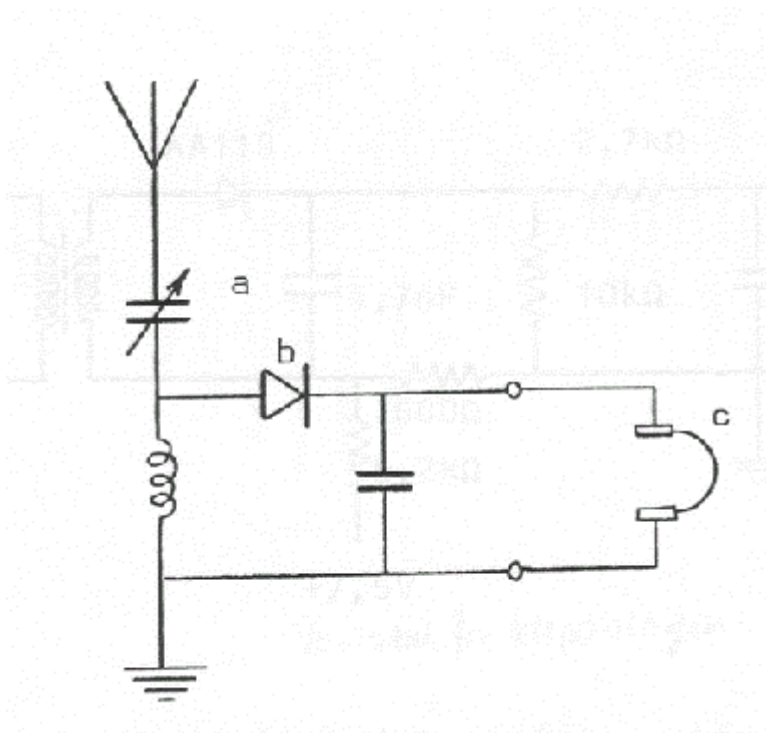
Det är inte svårt att övertyga sig om att samma Förhållande råder när meddelandesignalen $u_m(t)$ är en summa av ett godtyckligt antal sinusformade

komponenter, dvs när $u(t)$ är en godtycklig periodisk signal. Hade vi behärskat teorin för stokastiska processer hade vi funnit samma egenskaper hos DSB-s signaler, modulerade med slumpmässiga meddelandesignaler. I stället för diskreta amplitudspektra som i fig 2.4 hade vi då fått kontinuerliga effektsspektra.

Med dessa generaliserade resultat konstruerar vi fig 2.5 som ger en bild av hur meddelandesignalens spektrum kan återfinnas i DSB-signalen. DSB-signalens band bredd är dubbelt så stor som meddelandesignalens. All information om denna finns i vilket som helst av sidbanden.

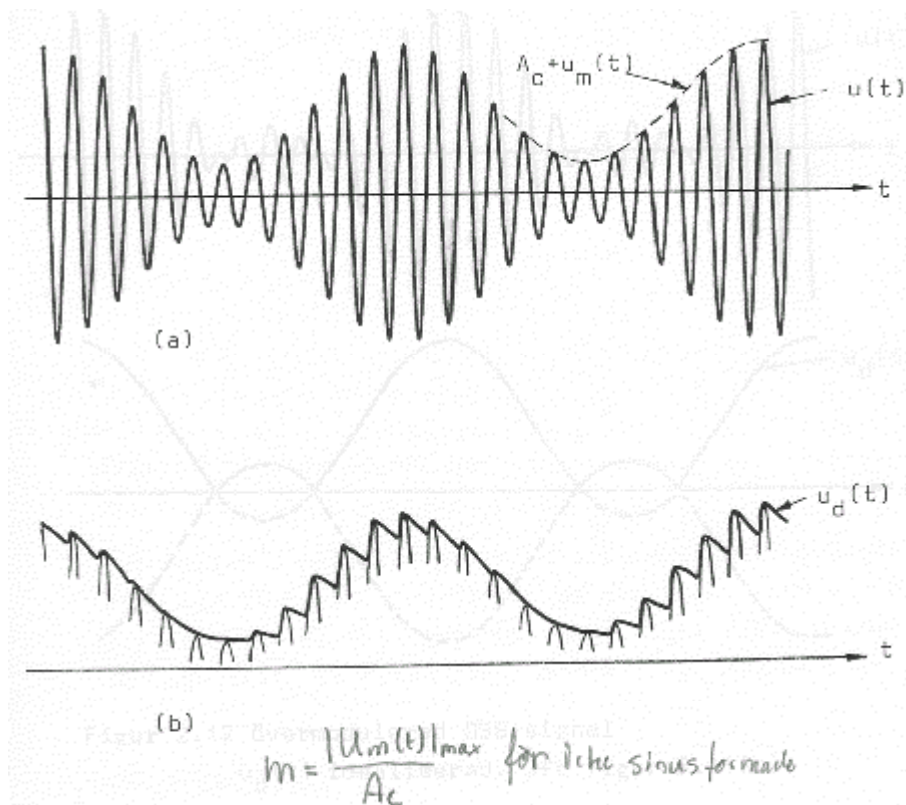


Figur 2.5 Spektra och bandbredder i AM-DSB



Figur 2.9 Kristallmottagare

- a) avstämningskondensator
- b) kristalldetektor
- c) hortelefon



Figur 2.11 (a) DSB signalen vid diodens anod
 (b) Den dektekterade AM signalen vid hörtelefonen

Sammanfattning

En strikt definition av amplitudmodulering borde innebära att endast den modulerade signalens amplitud berodde av meddelandesignalen. Av de AM-varianter vi behandlat är det endast DSB och DSBSC som uppfyller detta krav. För VSB och SSB beror också den modulerade signalens fas av meddelandesignalen. Av hävd räknas VSB och SSB som amplitudmoduleringsmetoder. Båda formerna kan genereras ur en DSB-signal, vars amplitud ju är en linjär funktion av meddelandesignalen.

Vid jämförelser mellan olika modulationsmetoder är störtaåligheten av stor betydelse. I det avseendet är alla AM-varianter i stort sett lika goda (eller dåliga). AM-signalerna är smalbandiga. Effekten hos en utsänd AM-signal beror kraftigt av modulationen.

2.3 Vinkelmodulering (FM modulering)

2.3.1 Allmänt om vinkelmodulering

I en vinkelmodulerad signal är amplituden konstant medan fasen varierar med hjälp av meddelandesignalen. De former av vinkelmodulering vi skall studera är fasmodulering (PhM).

Det finns också mellanformer av fas- och frekvensmodulering, sådana används bl.a. för ljudradions FM-utsändningar och för TV-ljudet.

Vinkelmodulering är betydligt svårare att analysera än amplitudmodulering. Vi kommer därför endast att behandla sinusformade meddelandesignaler. Vi skall ändå utforma resultaten så att de kan tillämpas också på andra typer av signaler. Den viktigaste egenskapen hos vinkelmodulering, tåligheten mot störningar på transmissionskanalen.

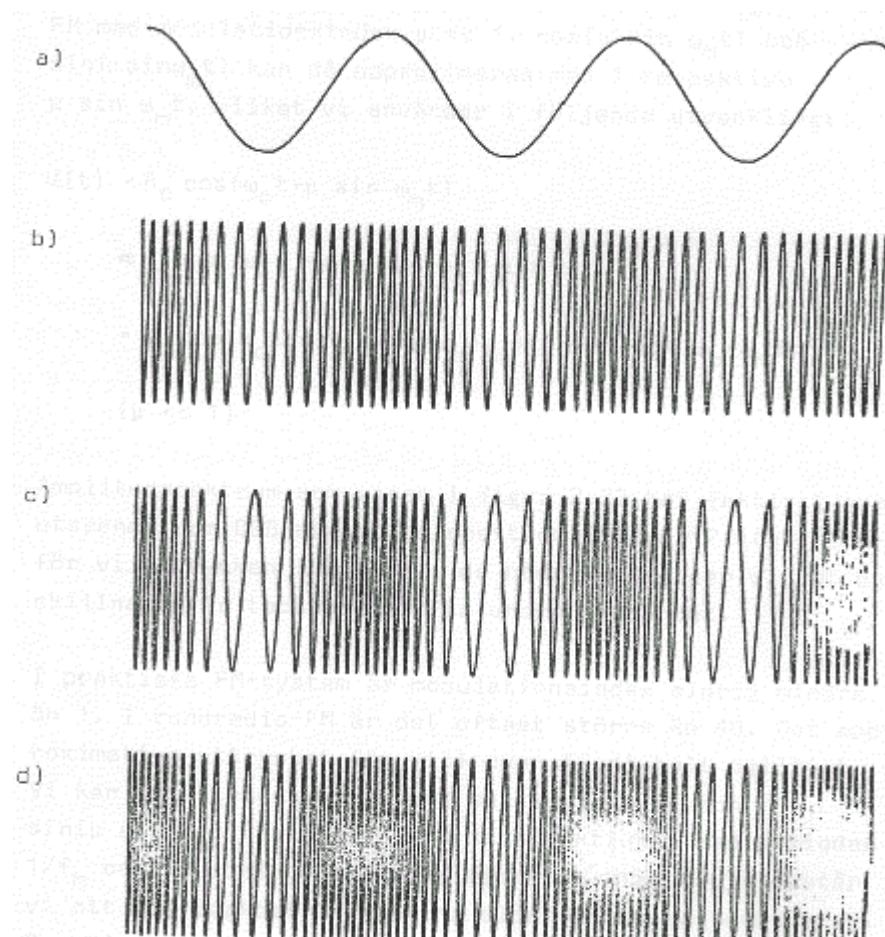
En FM signal kan skapas med hjälp av en spänningsstyrd högfrekvent växelströmskälla. Spänningen som styr växelströmskällan får vara vår signal från mikrofon eller annan informationskälla.

Den minsta och högsta frekvens som kan genereras på detta vis kallar vi för frekvensdeviation, den kan omvandlas till en vinkel och kallas då fasdeviation.

Kvoten mellan växelströmskällans frekvens och meddelandesignalens frekvens kallas modulationsindex. Det är en apparatkonstant.

Vi konstaterar att PhM- och FM-signalerna påverkas olika av ändringar i meddelandesignalens frekvens. När frekvensen är fixerad är emellertid FM med frekvensdeviationen ekvivalent med PhM skillnaden i fasläge saknar betydelse. Så länge vi sysslar med rent sinusformad modulering kan vi nöja oss med att studera exempelvis FM. Först när meddelandesignalen innehåller flera frekvenser får vi skilda resultat för PhM och FM.

Figur 2.21 visar några olika FM-signaler som alla innehåller samma meddelandesignal. Siffrvärdena har valts för att åskadliggöra moduleringsprincipen, inte som exempel på praktiska värden. Deviationen är det sk. Modulationsindexet för apparaten



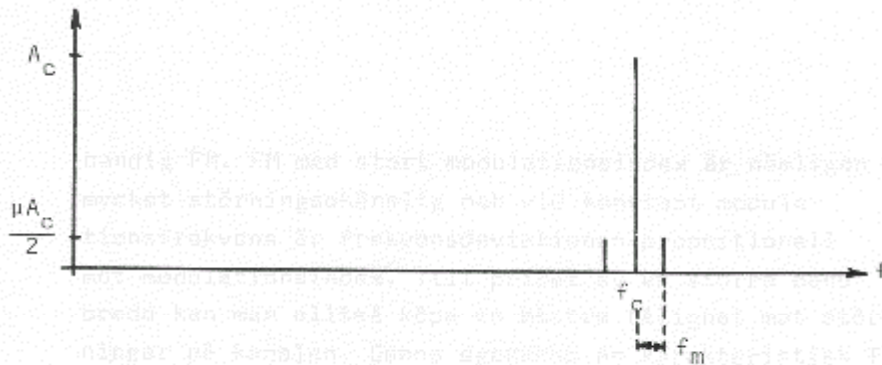
- a) Meddelandesignal, $f_m = 1\text{kHz}$
- b) FM-signal, $f_c = 16\text{kHz}$, $f_d = 5\text{kHz}$, deviation = 5
- c) FM-signal, $f_c = 16\text{kHz}$, $f_d = 10\text{kHz}$, deviation = 10
- d) FM-signal, $f_c = 16\text{kHz}$, $f_d = 10\text{kHz}$, deviation = 10

2.3.2 Frekvensgenskaper

I figur 2.4 i avsnitt 2.2.2 angav vi grafiskt frekvensinnehållet i en sinusformigt modulerad DSB-signal. Vi skall nu konstruera samma diagram för FM-signalen.

Vi börjar med att studera smalbandig modulering, d v s FM med modulationsindex $\ll 1$.

Figur 2.22 Amplitudspektrum för smalbandig FM



Amplitudspektrum som visas i figur 2.22 har faktiskt samma utseende som DSB-signalens spektrum i figur 2.4(b). Samtidigt uttrycken för $u(t)$ i de båda fallen ser vi att enda skillnaden är tecknet framför undre sidbandet.

I praktiska FM-system är modulationsindex aldrig mindre än 1. I rundradio-FM är det oftast större än 40. Det ovan är då helt ogiltigt. Vi kan istället utnyttja att utveckla en fourierserie.

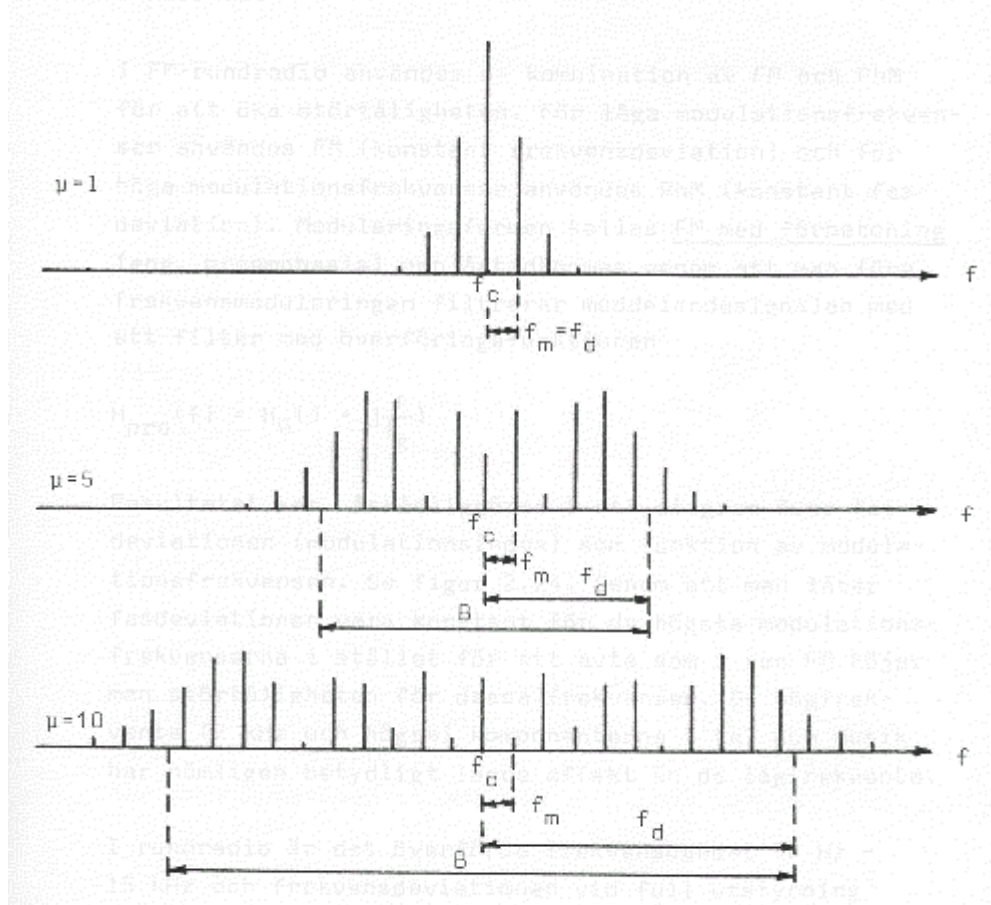
Vi konstaterar då att bandbredden hos FM-signalen formellt sett är oändlig. Denna oroande slutsats mildras av att koefficienterna snabbt avtar mot noll. Ett praktiskt värde på FM-signalens bandbredd skulle då vara $B=2 \cdot u \cdot f_m$. (u modulationsindex, B bandbredd, f_m modulationsfrekvens).

Man har funnit att detta gäller också för icke sinusformigt modulerade FM-signaler. Det skall tolkas så att större delen av FM-signalens effekt (säg 95 %) finns i frekvensbandet $(f_c - B/2, f_c + B/2)$.

Figur 2.23 visar Amplitudspektrum för en sinusformigt modulerad FM-signal med konstant modulationsfrekvens f och varierande modulationsindex β . Vi ser att bandbredden ökar i stort sett som 2β , åtminstone för stora värden på β .

Finns det då någon anledning att generera FM-signaler med stor frekvensdeviation? Det borde tvärt om vara angeläget att hålla frekvensdeviationen liten så att erforderlig bandbredd också blir liten. Det finns emellertid ett starkt skäl för att använda bredbandig FM.

Figur 2.23 Amplitudspektrum för sinusmodulerad FM med konstant moduleringsfrekvens f och några olika värden på modulationsindex.



FM med stort modulationsindex är nämligen mycket störningskänslig och vid konstant modulationsfrekvens är frekvensdeviationen proportionell mot modulationsindex. Till priset av en större bandbredd kan man alltså köpa en bättre tålighet mot störningar på kanalen. Denna egenskap är karakteristisk för alla vinkelmodulerade system och för flertalet pulsmodulationssystem men inte för amplitudmodulerade system, då meddelandesignalen bestämmer erforderlig bandbredd.

I FM-rundradio användes en kombination av FM och PhM för att öka störtåligheten. För låga modulationsfrekvenser användes FM (konstant frekvensdeviation) och för höga modulationsfrekvenser användes PhM (konstant fasdeviation). Moduleringsformen kallas FM med förbättring (eng. preemphasis) och åstadkommes genom att man före frekvensmoduleringen filtrerar meddelandesignalen med ett filter. Ett ytterst vanligt förfarande i alla kommunikationsform. Du höjer rösten i en störningsfylld omgivning.

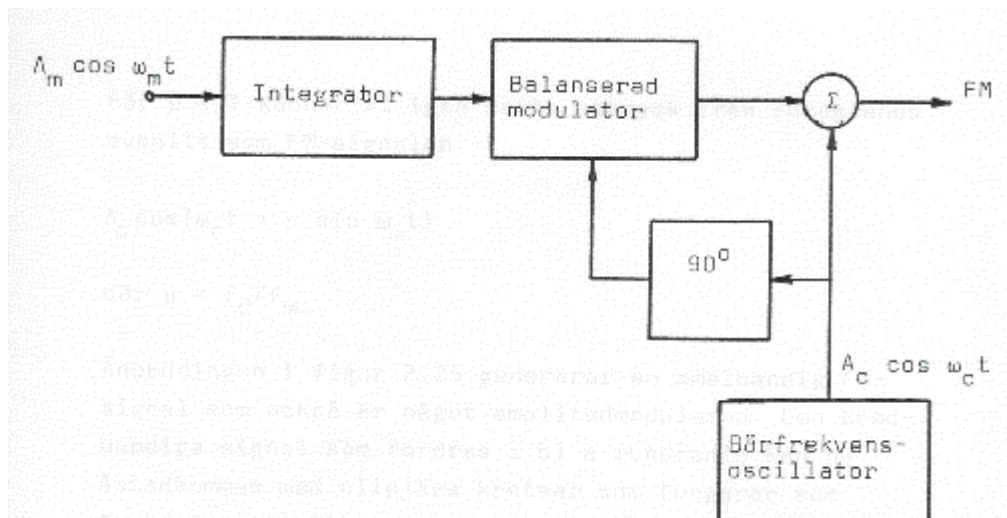
2.3.3 Generering av FM- och PhM-signaler

Man kan skilja mellan två principiellt olika sätt att generera FM-signaler, direkt och indirekt modulering.

Vid direkt modulering låter man meddelandesignalen påverka en frekvensbestämmande komponent i en svängningskrets. Denna komponent kan t ex vara en varaktordiod, ett reaktansrör eller en fälteffekttransistor. I ett tillräckligt litet interval runt bärfrekvensen kan frekvensavvikelsen fås proportionell mot meddelandesignalen och oscillatorn lämnar då en FM-signal.

Direkt modulering används numera inte vid kvalificerad kommunikation på grund av den dåliga frekvensstabiliteten hos de använda oscillatorerna. Den förekommer oftare vid korthållskommunikation som t ex i trådlösa mikrofoner i en föreläsningssal. Utrustningen kan göras ytterst enkel. Leta efter FM79 eller FM-Sändare på internet.

Vid indirekt modulering används en bärvågsoscillator med konstant frekvens. Den kan då vara kristallstyrd vilket vesäntligt ökar frekvensstabiliteten. moduleringen sker med balanserad modulator och fasvridare enligt figur 2.25.



Figur 2.25 Indirekt FM-generering

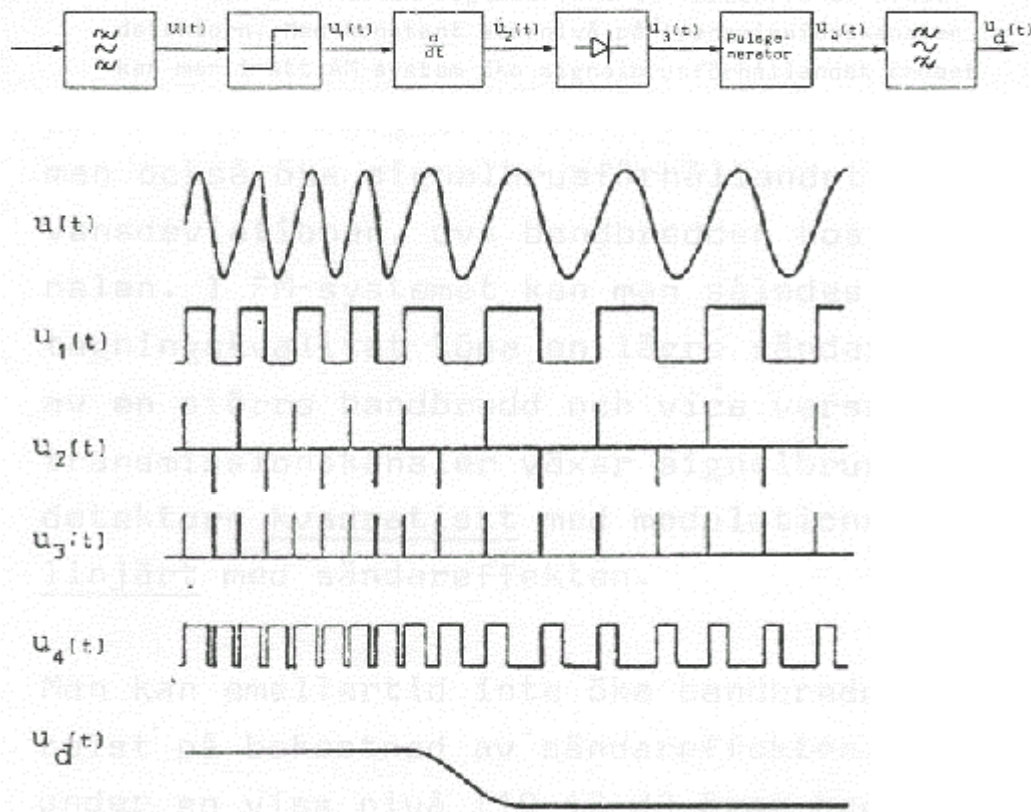
Anordningen i figur 2.25 genererar en smalbandig FM-signal som också är något amplitudmodulerad. Den bredbandiga signal som fordras i bla a rundradio kan nu åstadkommas med olinjära kretsar som fungerar som frekvensmultiplikatorer och med blandare som fungerar som frekvensskiftare. De förra ökar både bärfrekvens och modulationsindex med en faktor n. De senare höjer endast bärfrekvensen med en term f

2.3.4 Detektering av FM- och PhM-signaler

Liksom i föregående avsnitt nöjer vi oss med att studera FM-signaler. Omvandling mellan FM och PhM sker genom linjär filtrering. En FM-detektor eller diskriminator är vanligen konstruerad så att frekvensvariationerna först görs om till amplitudvariationer som sedan detekteras i en enveloppedemodulator, likt kristalloscillatorn.

En annan mindre använd princip innebär omvandling av FM-signalen till en pulsföljd med ett pulsavstånd proportionellt mot momentana frekvensen. (en halvdigital mottagare). Lågpassfiltrering av pulsföljden ger den önskade utsignalen. Denna FM-detektor kallas pulsräknande detektor eller nollgenomgångsdetektor.

Den pulsräknande detektorn har ett principalschema som i figur 2.28. Figuren ger också ett exempel på hur en frekvensändring detekteras. Den alternativa benämningen nollgenomgångsdetektor kommer av det förhållande att signalen efter pulsgeneratoren innehåller en puls vid varje nollgenomgång hos den ursprungliga signalen $u(t)$. Pulserna är av konstant längd och när de integreras ger de upphov till en signal som är en linjär funktion av antalet nollgenomgångar per tidsenhet, dvs av momentana frekvensen.



Figur 2.28 Nollgenomgångsdetektor

Jämfört med konventionella FM-detektorer är den pulsräknande detektorn mycket bredbandig. Den ger också en mycket distorsionsfri utsignal, även om

brusnivån kan vara högre än för andra detektorer. Den är dock mycket enkel att tillverka med moderna halvledare eller microprocessorer.

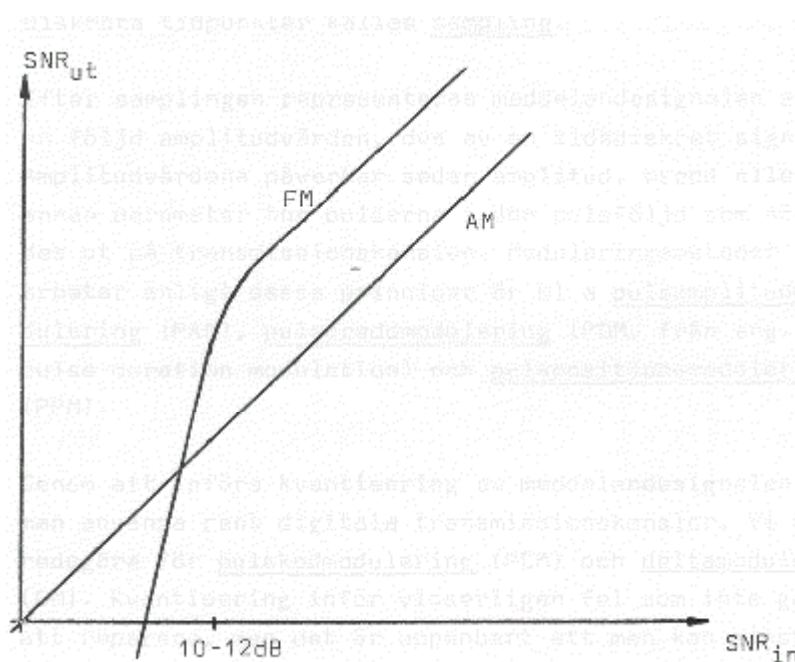
2.3.5 Jämförelser med AM

Jämförande analyser av amplitud- och vinkelmoduleringsystem kräver beräkning av störningskänsligheten lämpligen med stokastiska processer som modell för störningarna.

I denna framställning ger vi endast en redogörelse för de viktigaste resultaten av sådana analyser.

Som kvalitetsmått användes ofta signalbrusförhållandet (förhållandet mellan signaleffekt och bruseffekt) efter detektorn. Med konstant störnivå på transmissionskanalen kan man i ett AM-system öka signalbrusförhållandet endast genom att öka modulatorens uteffekt. I ett FM-system kan man också öka signalbrusförhållandet genom att öka frekvensdeviationen, dvs bandbredden hos den modulerade signalen. I FM-systemet kan man således med bibehållen mottagningskvalitet köpa en lägre sändareffekt till priset av en större bandbredd och vice versa. Med normala transmissionskanaler växer signalbrusförhållandet efter detektorn kvadratisk med modulationsindex men endast linjärt med sändareffekten.

Man kan emellertid inte öka bandbredden hur mycket som helst på bekostnad av sändareffekten. När denna sjunker under en viss nivå (10-12 dB över bruseffekten) inträder en snabb kvalitetsförsämring hos den demodulerade FM-signalen. Man brukar tala om en tröskleffekt för FM. Figur 2.29 visar sambandet mellan signalbrusförhållandena före och efter detektorn för AM och FM. Det exakta läget hos FM-kurvan beror bl.a. av frekvensdeviationen.



Figur 2.29 Sambandet mellan signalbrusförhållandena före detektorn (SNR_{in}) och efter detektorn SNR_{out} för AM och FM.

Pulsmodulering

2.4.1 grundläggande begrepp

De moduleringsmetoder vi hittills studerat kan med ett gemensamt namn kallas tidskontinuerlig modulering (Jfr figur 2.2). Pulsmodulering som också kan kallas tidsdiskret modulering innebär att information om meddelandesignalen endast överföres i diskreta tidpunkter.

Man kan visa att detta inte innebär någon informationsförlust så länge meddelandesignalen är bandbegränsad. Processen att: avkänna en tidskontinuerlig signal i diskreta tidpunkter kallas sampling.

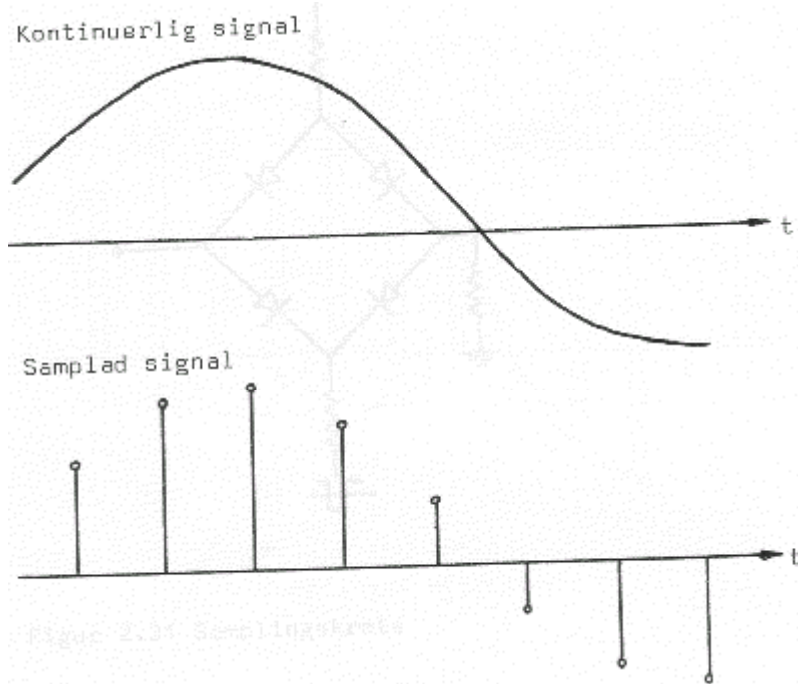
Efter samplingen representeras meddelandesignalen av en följd amplitudvärden, dvs av en tidsdiskret signal. Amplitudvärdena påverkar sedan amplitud, bredd eller annan parameter hos pulserna i den pulsföljd som sändes ut på transmissionskanalen. Moduleringsmetoder som arbetar enligt dessa principer är bl a pulsamplitudmodulering (PAM) , pulsbreddmodulering (PDM/PWM, -Från Eng. pulse duration modulation) och pulspositivnsmodulering (PPM).

Genom att införa kvantisering av meddelandesignalen kan man använda rent digitala transmissionskanaler. Vi skall redogöra för pulskodmodulering (PCM) och deltamodulering (DM). Kvantisering inför visserligen fel som inte går att reparera, men det är uppenbart att man kan minska dessa fel genom att kvantisera med mindre intervall.

2.4.2 Sampling

Det finns en berömd sats, det s k samplingsteoremet, som säger att en strikt bandbegränsad signal är entydigt bestämd av sina värden i diskreta tidpunkter, förutsatt att avståndet mellan dessa tidpunkter inte överstiger $1/2W$, där W är signalens bandbredd. Den lägsta frekvens med vilken signalen kan samplas är således $2W$, dvs dubbelt så stor som bandbredden hos signalen. Även känt som NyquistTeoremet.

Figur 2.30 ger ett exempel. Den ursprungliga signalen återfås mycket enkelt ur följderna av sampelvärden. Ger man nämligen en följd av smala pulser ("spikar") amplituder som är proportionella mot sampelvärdena och lågpasfilterar denna pulsföljd med gränsfrekvensen W så får man tillbaka den kontinuerliga signalen .



Figur 2.30 Sampling

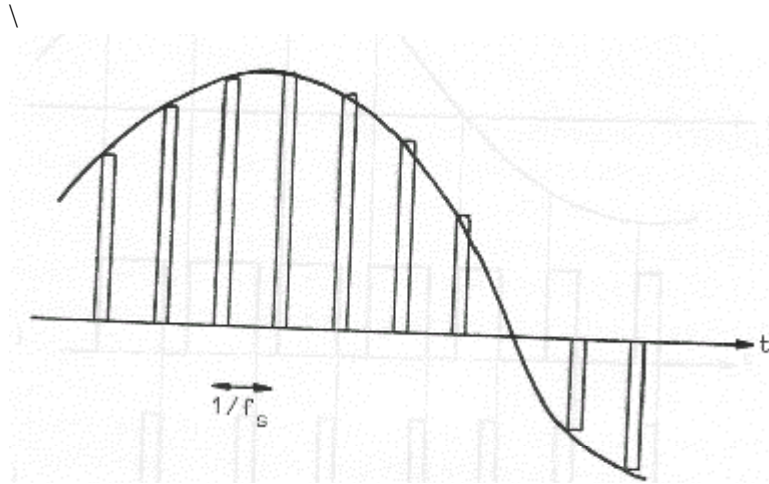
Nu finns det inga strikt bandbegränsade signaler, men samplingsteoremet kan ändå ge en uppfattning om hur hög samplingsfrekvens som fordras.

Exempelvis användes för telefonisignaler där övre gränsfrekvensen är 3,4 kHz en samlingsfrekvens på 8 kHz. För god kvalitet (HIFI) krävs betydligt högre samlingsfrekvens, vanligt är 64kHz eller 128kHz. Dock får bithastigheten inte överstiga 64kbit/s i Europa eller 56Kbit/s i USA och Japan.

2.4.3 Pulsamplitudmodulering (PAM)

Vid pulsamplitudmodulering (PAM) överföres den samplade signalen som ett pulståg där pulsernas amplituder är proportionella mot sampelvärdena.

Avståndet mellan pulserna är konstant och lika stort som avståndet mellan samplingspunkterna. Pulsformen kan utformas så att den passar transmissionskanalen. I figur 2.32 ges ett exempel med rektangulära pulser. PAM-signalen är enkel att generera. Den fas ju direkt som utsignal från samplingskretsen, eventuellt via ett pulsformande nät. PAM är emellertid i brustålighet underlägsen de flesta andra modulationssystem, till och med vanlig AM. Den användes därför sällan på transmissionskanalen men desto oftare som förstadium till andra typer av pulsmodulation.



Figur 2.32 Pulsamplitudmodulering
 f = samplingsfrekvsnsen

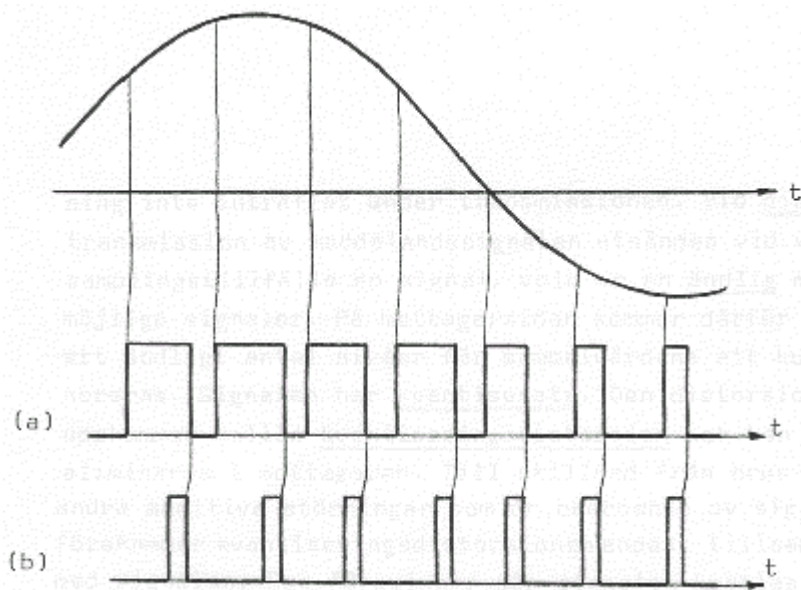
2.4.4 Pulsbredd- och pulspositionsmodulering (PDM/PWM, PPM)

I stället för att låta pulsernas amplituder vara proportionella mot sampelvärdena som i PAM kan man påverka andra parametrar i pulståget. I pulsbreddmodulering (PDM) beror pulsbredden T_p av sampelvärdet enligt:

$$T_p = T_0 + k \cdot U_s$$

där U är sampelvärdet och T och k konstanter. T och k väljes så att T varierar maximalt utan att bli negativ och utan att bli större än avståndet till nästa puls, vilket är detsamma som samplingsperioden. Se figur 2.33.

I pulspositionsmodulering (PPM) användes smala pulser med konstant bredd. Pulståget (fördröjningen) bestäms av sampelvärdet på samma sätt som pulsbredden i PDM. I figur 2.33 har vi valt att låta PPM-pulserna få samma bakkanter som PDM-pulserna.



Figur 2.33 (a) pulsbreddmodulering
(b) Pulspositionsmodulering

PPM har den fördelen gentemot PDM att den utsända effekten kan göras låg med bibehållande av störårligheten. Smala pulser kräver emellertid stor bandbredd hos transmissionskanalen, men på bredbandiga kanaler kan PPM ge relativt störningsökänslig transmission.

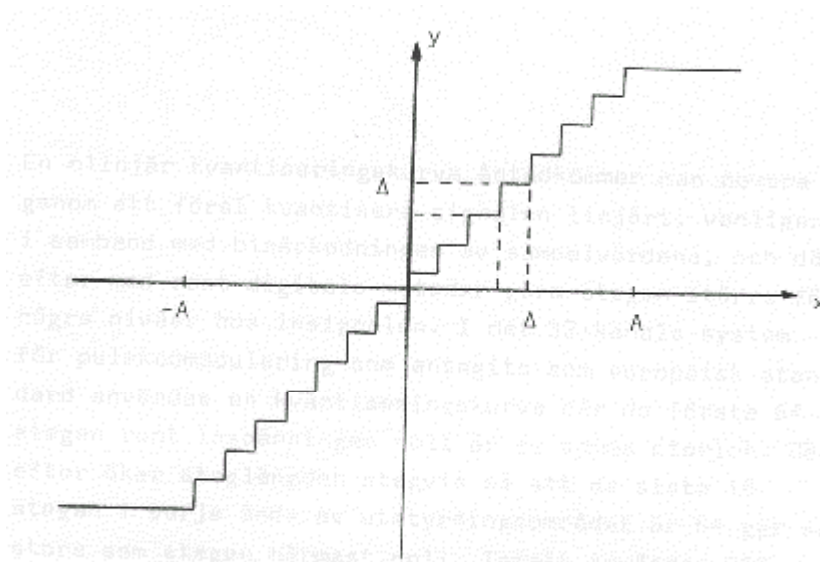
PDM och PPM används sällan för transmissionsändamål. De är i allt väsentligt underlägsna de rent digitala pulskodmodulering och deltamodulering.

2.4.5 Kvantisering

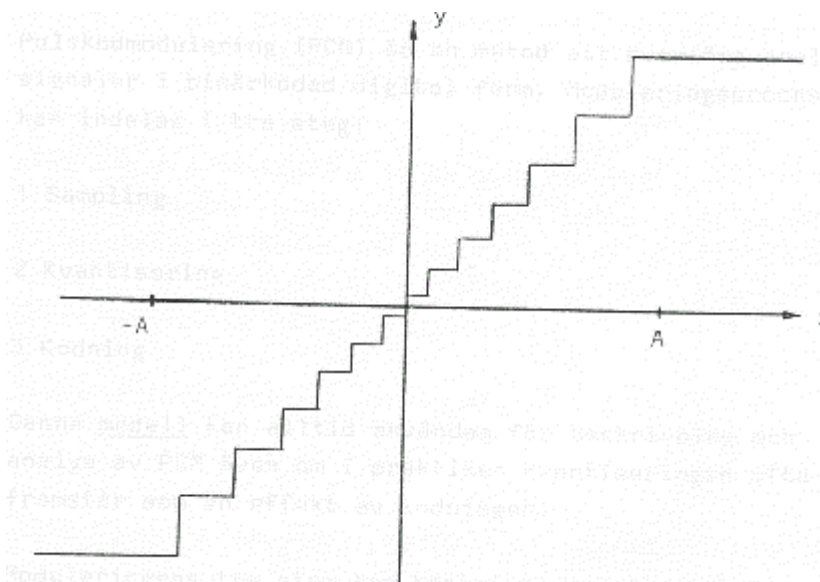
De hittills behandlade pulsmoduleringsformerna har alla överfört sampelvärdena i analog form. Amplitud, bredd eller läge har varierat kontinuerligt. På mottagarsidan har den samplade meddelandesignalen kunnat regenereras exakt, förutsatt naturligtvis att någon störning inte inträffat under transmissionen. Vid digital transmission av meddelandesignalen utsändes vid varje samplingstillfälle en signal, vald ur en ändlig mängd möjliga signaler.

På mottagarsidan kommer därför endast ett ändligt antal nivåer för sampelvärdena att kunna genereras. Signalen har kvantiserats. Den distorsion som uppkommer kallas kvantiseringsdistorsion och kan inte elimineras i mottagaren. Till skillnad från brus och andra additiva störningar som är oberoende av signalen förekommer kvantiseringsdistorsion endast tillsammans med signalen. Den försvinner när signalen kopplas bort.

Kvantiseringen av ett sampelvärde kan beskrivas med kurvan i figur 2.34. x är det ursprungliga värdet och y det kvantiserade. Vid inspänningarna $x = \pm A$ inträder mättningsdistorsion. När trappstegen i figuren är lika stora säger man att kvantiseringen är linjär.



Figur 2.34 Linjär kvantisering



Figur 2.35 Olinjär kvantisering

En olinjär kvantiseringskurva åstadkommer man numera genom att först kvantisera signalen linjärt, vanligen i samband med binärkodningen av sampelvärdena, och därefter med rent digitala metoder göra stegen större för högre nivåer hos insignalen. I det 32-kanals system för pulskodmodulering som antagits som europeisk standard användes en kvantiseringskurva där de första 64 stegen runt inspänningen noll är av samma storlek. Därefter ökar steglängden stegvis så att de sista 16 stegen i varje ändå av utstyrningsområdet är 64 ggr så stora som stegen närmast noll. Totalt användes 256 steg. Med denna kvantisering åstadkommes ett signalstörförhållande som är bättre än 36 dB över ett 30 dB brett dynamikområde för insignalen. Olinjär digitalisering av analoga signaler är mycket vanligt.

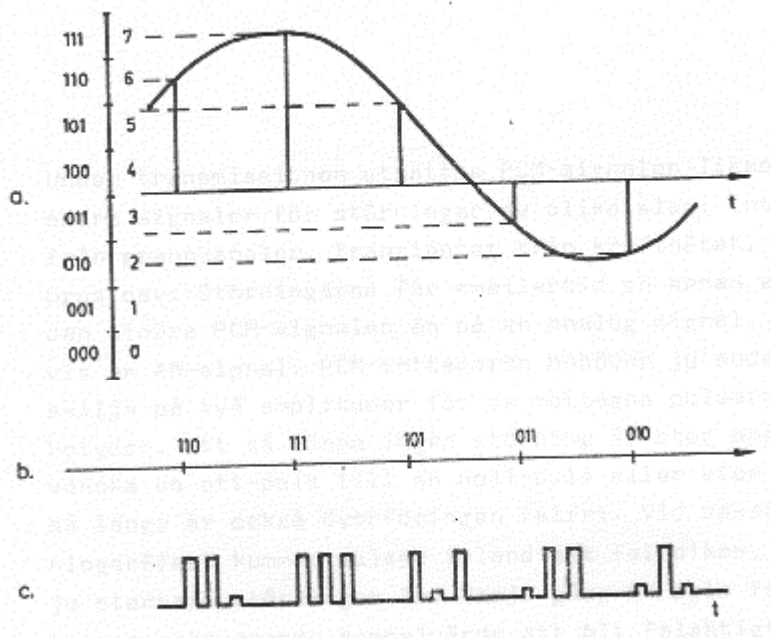
2.4.6 Pulskodmodulering

Pulskodmodulering (PCM) är en metod att överföra analoga signaler i binärkodad digital form. Moduleringsprocessen kan indelas i tre steg:

1. Sampling
2. Kvantisering
3. Kodning

Denna modell kan alltid användas för beskrivning och analys av PCM även om i praktiken kvantiseringen ofta framstår som en effekt av kodningen.

Moduleringsens tre steg kan beskrivas med figur 2.36. Antalet kvantiseringarnivåer är där åtta, vilket vid binärkodningen svarar mot tre binära siffror per sampel. Binärtalen utsändes som grupper av binära pulser.



Figur 2.36 Pulskodmodulering

- (a) Sampling och kvantisering
- (b) Binär representation av sampelvärdena
- (c) Utsänt pulståg

Binär etta kan till exempel motsvaras av en puls med amplituden +5 V och binär nolla av en puls med amplituden 1 V. (Detta är hypotetiska värden som lämpar sig väl för illustrationer. För praktiskt bruk användes ett mera komplicerat system.)

Demoduleringsprocessen kan indelas i två steg:

- 1 Avkodning
- 2 Övergång från tidsdiskret till tidskontinuerlig form

Något steg som är omvandningen till kvantiseringen i modulatorens finns givetvis inte. Kvantiseringsfelet kan inte elimineras. Under transmissionen utsätts PCM-signalen liksom alla andra signaler för störningar av olika slag:

interferens från grannkanaler, transienter från kraftnätet, termiskt brus osv. Störningarna får emellertid en annan effekt på den binära PCM-signalen än på en analog signal, ex em pelvis en AM-signal. PCM-mottagaren behöver ju endast kunna skilja på två amplituder för de mottagna pulserna. Detta betyder, att så länge ingen störning är stor nog att förvanska en ett-puls till en noll-puls eller vice versa, så länge är också överföringen felfri, Vid växande störningseffekt kommer pulsen ibland att feltolkas, oftare ju starkare störningen är. Varje gång en puls feltolkas kommer motsvarande sampelvärde att bli felaktigt.

Vid mätningår på PCM-system med 8 bitar per sampel har man funnit att talkvaliteten är acceptabel om bitfelfrekvensen är mindre än 10^{-5} . Med en samplingsfrekvens på 8 kHz innebär detta att tiden mellan två felaktiga sampelvärden är i medeltal 1,6sek.

Redan vid en kabellängd av några få kilometer kan emellertid störningarna vara så stora att felfrekvensen når kritiska värden. Man sätter därför in regenererande förstärkare längs ledningen. Avståndet mellan regenereratorerna är som standard omkring 2 km. En regenererator tolkar de inkommande störda och distorerade pulserna och utsänder en återbildad följd av brusfria pulser.

Brusnivån vid mottagaren blir således oberoende av förbindelsens längd, något som är unikt för digitala transmissionssystem. Givetvis ökar risken för feltolkningår med antalet regenereratorer längs ledningen, men genom att t ex kräva en felfrekvens om högst 10^{-7} för varje regenererator kan 100 sektioner kaskadkopplas (seriekopplas) innan hela förbindelsens felfrekvens uppgår till 10^{-5} .

PCM är en relativt ung teknik. Metoden uppfanns visserligen redan 1939, men utvecklingen tog inte fart förrän halvledartechnologin utvecklades under 1960-talet. 1976 var ungefär en halv miljon PCM-system för telefoni i drift, merparten av dessa i USA, Japan och Storbritannien. De första PCM-systemen sammanförde med tids Tidsmultiplex 24 enkelriktade talförbindelser på ett trådpar i en kabel.

Nuvarande europastandard sänder 32 kanaler på ett trådpar. Med samplingsfrekvensen 8 kHz och 8 bitar per sampel (64kBit/s) ger detta en pulsrepetitionsfrekvens av 2,048 MHz (2Mbit/s). I USA har utvecklats ett system för 2400 kanaler med pulsrepetitionsfrekvensen 224 MHz (PDH). Överföringen sker då på koaxialkabel.

Även räknat per talförbindelse är PCM ett mycket bredbandigt moduleringsätt. Detta är priset man får betala för den extrema störningståligheten och okänsligheten för fasdistorsion på kanalen. PCM-system användes framförallt för kapacitetsökning på existerande partrådskablar för telefoni, men också för tillförlitlig kommunikation med låga effekter som från rymdsonder och satelliter samt inom datakommunikationen.

2.4.7 Deltamodulering

Vid deltamodulering (DM) samplas den analogs signalen betydligt snabbare än vid PCM. 40-50 kHz är vanliga värden på samplingsfrekvensen för en

talsignal. Vidare kodas inte hela sampelvärdet utan endast ändringen relativt föregående sampelvärde. Har signalen ökat utsänds en positiv puls, har den minskat utsänds en negativ.

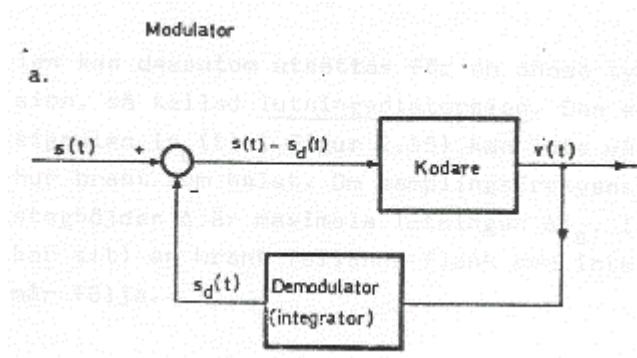
Demodulatorens enklaste utförande är en integrator. Förfarandet illustreras av figur 2.38. Kodaren, som klockas med samplingsfrekvensen, utsänder den delamodulerade signalen $v(t)$. I modulatorens återkopplingsring sitter en demodulator, exakt lika den som finns i mottagaren. Demodulatorens utgång genom integrering ger en trappstegsapproximation $s_d(t)$ av den analoga signalen $s(t)$. Om signalen $s(t) - s_d(t)$ är positiv i nästa samplingsögonblick alstrar kodaren en positiv puls, annars en negativ.

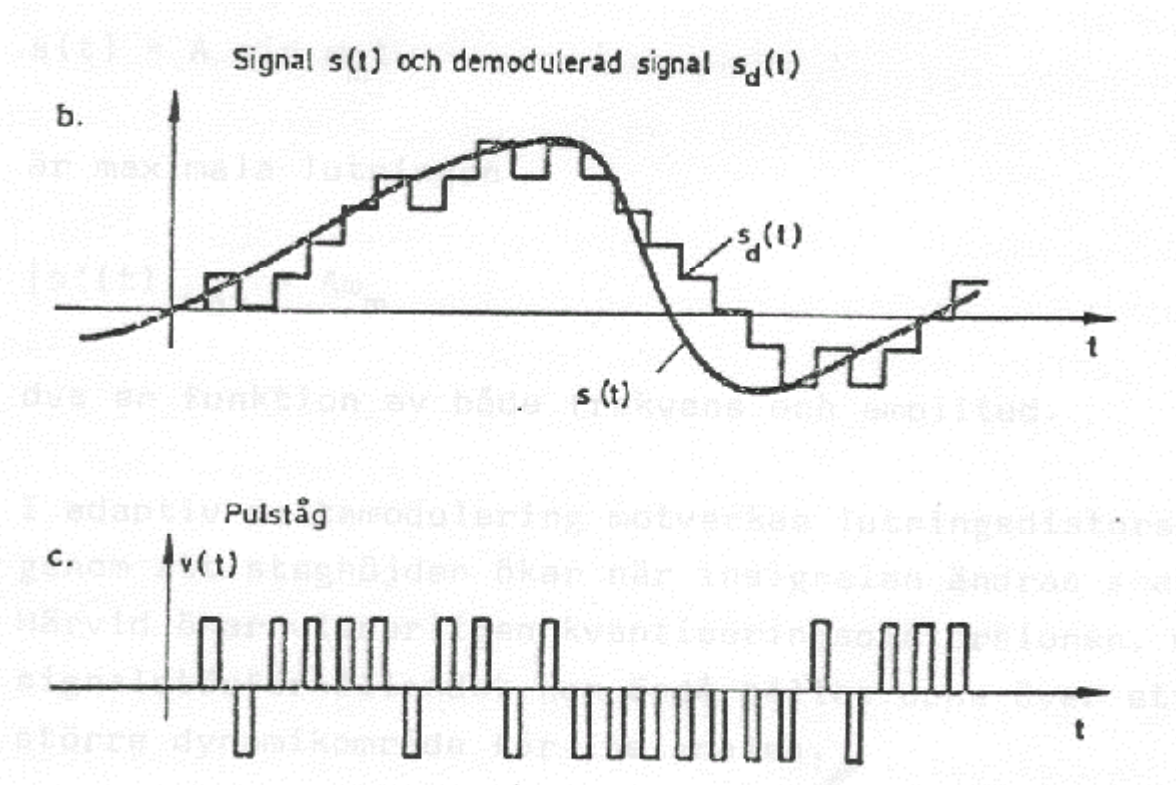
Som synes är delamodulatorens kretstekniskt mycket enkel och demodulatorens är ännu enklare. Detta är en fördel gentemot PCM-kodare och avkodare som är relativt komplicerade utrustningar.

Vad som gör att DM ändå inte används i samma utsträckning som PCM är att DM fördrar högre pulsrepetitionfrekvens än PCM för god transmissionskvalitet.

Delamodulering används bland annat i digitala bildtelefonisystem och på överföringsmedia av mycket låg kvalitet. Med avancerade DM-system med bland annat adaptiva återkopplingsnät i modulatorens återkopplingsring kan tal överföras på kanaler med signalbrus-förhållanden ned till 0 dB.

Den delamodulerade DM-signalen lider av en kvantiseringsdistorsion av ungefär samma slag som vid PCM.





Figur 2.38 Deltamodulering

(a) Modulator

(b) Analog insignal $s(t)$ och demodulerad signal $s_d(t)$

(c.) Utsänt pulståg $v(t)$

Dessutom kan DM utsättas för en annan typ av distorsion, så kallad lutningsdistorsion. Den approximerande signalen $s(t)$ i figur 2.38 kan inte växa eller avta hur brant som helst.

TRANSMISSIONSMEDIA

3.1 Inledning

I föregående kapitel behandlade vi de delar av kommunikationssystemet som kallas sändare och mottagare (se figur 2.1). I detta och följande kapitel skall vi ägna oss åt det mellanliggande blocket, kanalen. I sin enklaste form består kanalen av två trådar som sammanbinder sändare och mottagare. Norm ingår emellertid också förstärkare, väljare, multiplexorer osv. Dessa enheter förbindes med transmissionslänkar av olika slag. I en transmissions länk sändes meddelandet på elektromagnetisk våg genom ett transmissionsmedium en kabel, en vågledare, en optisk fiber eller den fria rymden.

I detta kapitel ska 11 vi beskriva några transmissionsmedia, deras egenskaper, användningsområden och utvecklingsmöjligheter. I kapitel 4 redogör vi för begreppet multiplex och i kapitel 5 avslutar vi med att kortfattat beskriva tele- nät och teletrafik.

3.2 Blankledning

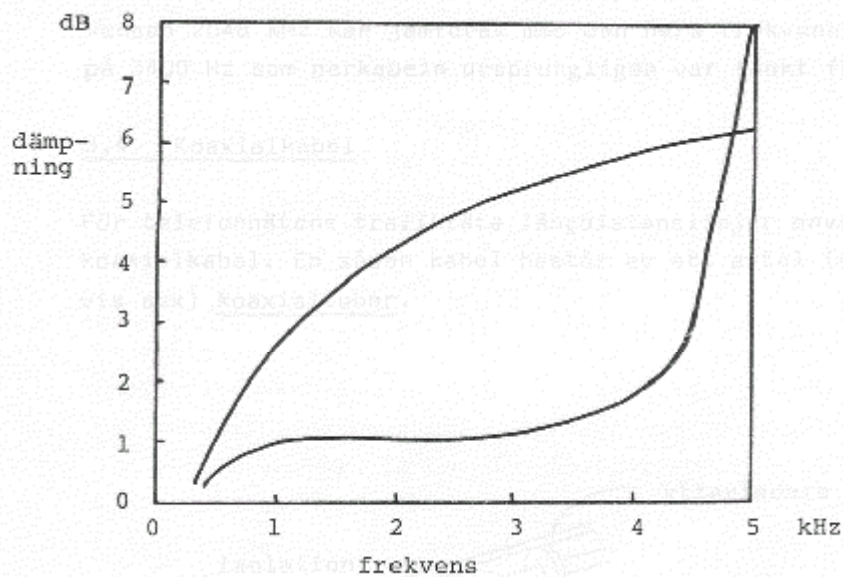
De första telefonledningarna var enkeltrådiga och hade telegrafledningarna som förebild. Järn- eller koppartrådar fästes med isolatorer på stolpar eller hustak. Denna s k blankledning var en enkel och billig konstruktion. De grova trådarna gav också mycket låg dämpning för talfrekvenserna. Till nackdelarna hörde stor känslighet för elektriska störningar från åska, jordströmmar, kraftledningår och andra teleledningår samt naturligtvis också för nedisning, fallande träd och andra mekaniska påfrestningar. Den svåra överhöringen och störningarna från jordströmmar minskades när man övergick till två trådar per förbindelse, men övriga problem kvarstod. Blankledningen har efterhand ersatts av andra media. Långt in på 1940-talet var dock blankledning den vanligaste ledningstypen på långdistanslinjerna. Trafikkapaciteten hade då utakats på olika sätt, t ex genom att man använde fyra trådar en s k fyrskruv, för tre förbindelse och genom att man införde bärfrekvenssystem med upp till 12 enkelriktade förbindelser per tråddar. ? ;

3.3 Parkabel

En parkabel är uppbyggd av tvinnade par av isolerade koppartrådar, ett par för varje förbindelse. Trådarna är betydligt tunnare än blanktrådarna, diametern är numera 0,3-0,4 mm. Isoleringsmaterialet är vanligen papper eller polyeten. Antalet par i en kabel varierar från några få upp till 5000.

Kabeln är skyddad mot fukt och mekanisk åverkan med en mantel av polyeten, bly eller annat material. När den används som luftledning är den förstärkt med en bärlina av stål. Vanligast är dock att man förlägger kabeln i marken. I tätorterna löper ofta flera kablar parallellt genom flerpipiga betongblock.

Parkabelns små dimensioner ger också önskade resultat som högre dämpning och mindre bandbredd. Bandbreddsminskningen, som främst orsakas av kapacitansen mellan ledarna i paret, kan man motverka genom pupinisering. Metoden uppfanns 1899 av Michael Pupin i USA och användes för både blankledning och parkabel. Den innebär att man på jämna avstånd, 1-2 km, kopplar induktanser i serie med ledningarna. Genom resonanseffekten minskar dämpningen i talfrekvensbandet, men den ökar i stället starkt vid högre frekvenser. Se figur 3.1.dämpning.



Figur 3.1 Dämpningen hos en opupiniserad resp pupiniserad kabel.

Pupiniserade kablar kan användas för talöverföring på avstånd upp till 100 km utan förstärkare. Större distanser kräver inkoppling av förstärkare, en för varje förbindelse, längs ledningen.

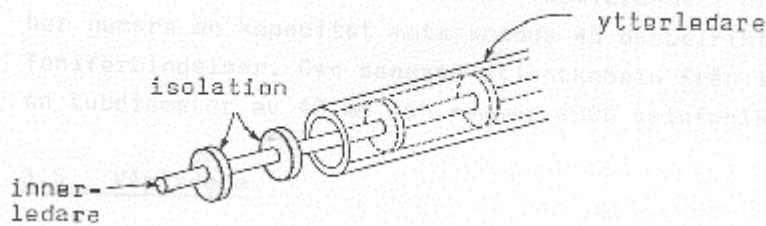
När man på 1930-talet utvecklat tillräckligt linjära förstärkare kunde bärfrekvenstekniken (se vidare kapitel 4) utnyttjas för att öka kapaciteten hos kablar. Sveriges första egentliga bärfrekvenssystem för parkabel installerades 1940 på sträckan Göteborg - Helsingborg - Malmö". Antalet kanaler var från början 12 men utökades senare till 29. Så småningom kunde man konstruera system med ändå upp till 120 kanaler per trådpar. Sådana system krävde emellertid omsorgsfull balansering av trådparen och inte alla par i en kabel kunde utnyttjas.

Halvledarteknikens utveckling under 1960- och 70-talen har gjort digitala transmissionssystem (PCM) till allvarliga konkurrenter med bärfrekvenssystem på parkablar.

Ett system med 32 kanaler har standardiserats av CCITT. Bitfrekvensen 2048 kHz kan jämföras med den övre frekvensgräns på 3400 Hz som parkabeln ursprungligen var tänkt för.

3.4 Koaxialkabel

För telefonnätets trafiktata långdistanslinjer användes koaxialkabel. En sådan kabel består av ett antal (exempelvis sex) koaxialtuber.



Figur 3,2 Koaxialtubens uppbyggnad

Koaxialtuben (figur 3.2) består av en ytterledare i form av ett metallrör och en innerledare i form av en ledningstråd som med plastbrickor hålls väl centrerad i metallröret, Isoleringsmaterialet är alltså huvudsakligen luft. Koaxialtuben har mycket goda transmissionsegenskaper upp till höga frekvenser, framförallt är överhörning och dämpning låga.

De elektriska egenskaperna bestäms helt av innerledarens ytterdiameter och ytterledarens innerdiameter. Standardvärden för telefoni är 2.6/9.5 mm (normalkoaxialtub) och 1.2/4.4 mm (klenkoaxialtub). Skillnaderna mellan olika slags tuber yttrar sig framst i priset (proportionellt mot diametern) och i dämpningen (omvänt proportionellt mot diametern).

Koaxialkabel är mycket dyrbar och lönar sig endast om stort trafikbehov föreligger så att kabelkostnaderna kan delas upp på många kanaler. Vidare måste förbindelserna vara långa (100-tals km) eftersom modulations och multiplexförfaranden medför att också terminalkostnaderna blir höga.

En exklusiv form av koaxialkabel är den som användes som undervattenskabel. Den första telefonikabeln under Atlanten (se avsnitt 1.3) innehöll två tuber, en för varje riktning, med ytterdiametern 16 mm. Den är fortfarande i drift och har numera en kapacitet motsvarande 48 dubbelriktade telefoniförbindelser.

3.5 Vågledare

En vågledare är ett metallrör med rektangulart eller cirkulart tvärsnitt avsett för transmission av elektromagnetiska vågor. Frekvensområdet för den överförda signalen bestäms av vågledarens dimensioner. Hos rektangulära vågledare, som bla användes för matning av radar och radiolänksantennar, är tvärsnittsmåtten av samma storleksordning som signalens våglängd.

Cirkulära vågledare av den typ som är aktuell för bredbandsoverföring har en diameter som är 5-20 gånger så stor som signalens våglängd. De system som nu testas använder vågledare med 50-60 mm diameter vilka tillåter transmission av frekvenser från ca 40 GHz till ca 110 GHz (våglängder ca 3-7 mm). Kapaciteten för ett sådant system är enorm: 300.000 telefonikanaler eller 200 färg-TV-kanaler. Modulationsmetoden är PCM med två eller fyra faslägen hos den modulerade signalen. (DPSK, QPSK)

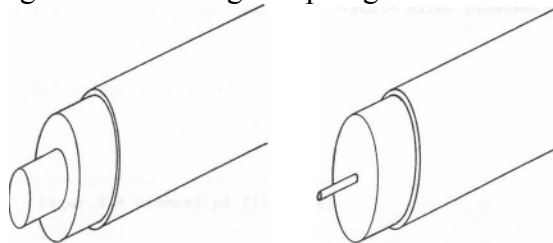
Om kapaciteten är hög så är också de tekniska svårigheterna avsevärda. Toleranserna vid tillverkning av vågledarna är snäva; avvikelser från nominell diameter får inte vara större än 10 micrometer. Endast obetydliga

krökningår tillåtes; en krökningsradie av 100 m ger en dämpningsökning av 2 dB/km.

De ekonomiska problemen är också avsevärda. I motsats till vad som gäller för ett koaxialkabelsystem är själva transmissionsmediet, vågledaren, flera gånger dyrare än terminalerna. Denna kostnad är dessutom oberoende av utnyttjandegraden. Troligen kommer vågledare att bli konkurrenskraftiga endast om nya bandbreddskrävande kommunikationssystem (som InternNet) installeras.

3.6 Optisk fiber

Vid sidan av cirkulära har vi ett transmissionsmedium med ännu större potentiell kapacitet, nämligen den optiska fibern. En optisk fiber (se figur 3.3) är en mycket tunn tråd av kvartsglas (eller plast) med en kärna vars brytningsindex är ca 1% högre än den omgivande manteln. På så sätt kommer ljusvågor som exciteras i kärnan att totalreflekteras mot manteln och förplantas längs fibern med låg dämpning.

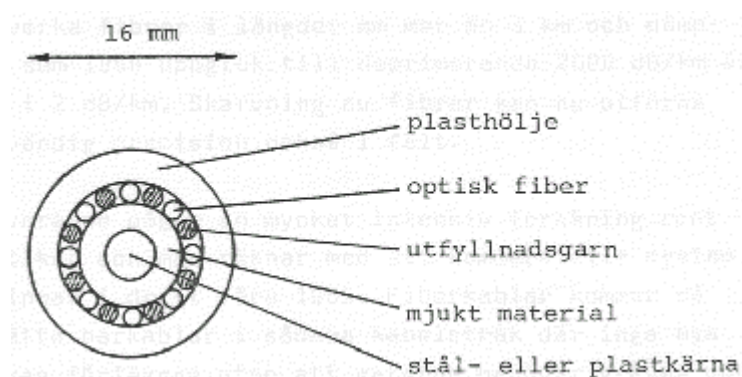


Figur 3.3 Optiska fibrer. a) Multimodsfiber. b) Enkelmodsfiber.

För telekommunikationsändamål använder man optiska fibrer av i princip två olika utseenden; en enkelmodsfiber som endast tillåter en svagningsmod för ljusvågen och en multimodsfiber som tillåter flera.

Enkelmodsfibern har en mycket mindre kärna än multimodsfibern; 2-5 µm diameter mot 30-100 µm.

Fibrens ytterdiameter är i båda fallen av storleksordningen 200 µm. Se figur 3.4



Figur 3.4 Exempel fiberkabel

Optiska fiber används också för datatransmission i elektromagnetiskt mycket

störda miljöer, exempelvis i flygplan. Plastfiberknippen har högre dämpning och lägre bandbredd än glasfiberknippen men högre mekanisk hållfasthet.

Ett sätt att ytterligare radikalt öka kapaciteten på en fiberkabel är med DWDM teknologi. Modularad flerfärgslaser, man skapar olika frekvenser i ljusvågsområdet, ungefär som i FM bandet. Kapaciteten på en fiber kan så ökas med åtskilliga tiopotenser.

Som ljuskälla (bärvågsgenerator) i ett fiberkommunikationssystem användes vanligen en lysdiod med infrarött ljus (våglängd omkring 800 nm) . För förbindelser över långa avstånd och med bandbredder över ca 30 MHz användes en halvledarlaser som är snabbare och smalbandigare än lysdioden men också dyrare.

Ljuskällan moduleras binärt av t ex en datasignal eller en PCM-signal. Detektering av ljuset vid mottagarandan av fibern sker med PIN-diod eller lavindiod. Systemets bandbredd begränsas av lysdiodens bandbredd eller när laser används av drivkretsar till denna och dispersion i fibern. Man brukar tala om OpticalCarrier -nivåer för kapaciteten.

3.7 Radioförbindelser

3.7.1 Grundläggande begrepp

Vid radiokommunikation utnyttjas utbredningsegenskaperna hos den elektromagnetiska strålningen i fri rymd. Dessa egenskaper varierar avsevärt, främst med frekvensen hos strålningen, men också med markförhållandena och tidpunkten på dygnet. Mycket högfrekvent strålning utbreder sig ungefär som ljus. Den dämpas i atmosfären av regn, snö och olika gaser och brytes på samma sätt som ljus/mikrovågssystem (frekvens 75,000 Hz-300 GHz) är något större än vad som geometriskt kan beräknas ur jordytans krökning och antennernas höjd över marken. Man får ett approximativt värde på räckvidden genom att anta att jordradien är $4/3$ av den verkliga. Räckvidden blir då:

$$d = 8/\sqrt{h} \text{ km}$$

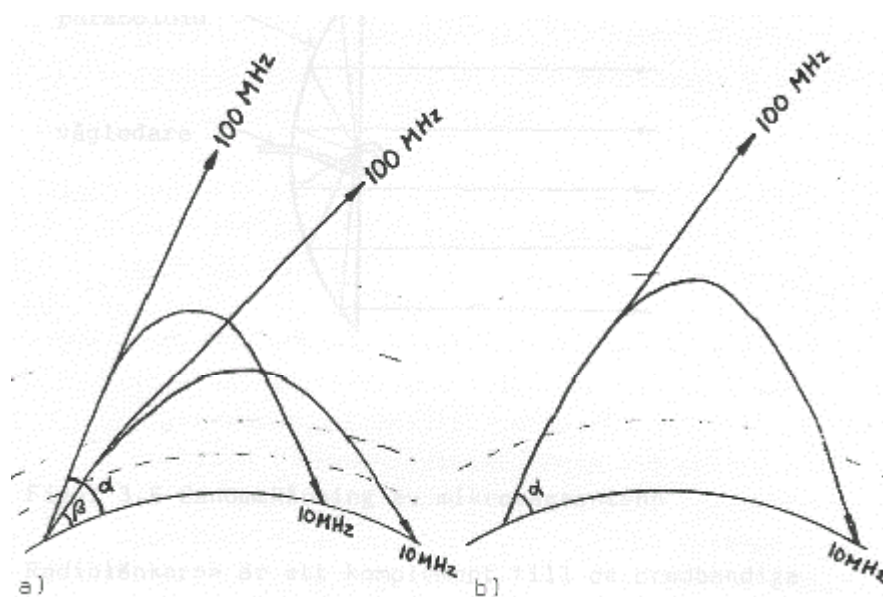
där h är antennernas höjd över marken i meter.

Ultrakorta radiovågor (frekvensområdet 30 MHz-1 GHz, se också figur 1.3) har i stort sett samma räckvidd som mikrovågor. Vid frekvenser under ca 100 MHz kan man emellertid ibland uppnå förbindelse på betydligt större avstånd. Radiovågen har då reflekterats i något av de joniserade skikt som på 50-500 km höjd omger jorden. Dessa skikt ingår i den sk jonosfären och har sitt ursprung i den från solen infallande ultravioletta strålningen. Jonosfärens struktur ändras också med dygnet så att joniseringen avtar under natten, speciellt i de undre skikten.

Hur vågor av olika frekvens och med olika infallsvinkel bryts i jonosfären visas schematiskt i figur 3.5. Speciellt inom kortvågsområdet (3-30 MHz) och under natten kan multipelreflexioner uppstå mot de högre skikten och medge förbindelse halvvägs runt jorden och längre.

För lägre frekvenser (av storleksordningen 1 MHz och nedåt) blir

dämpningen i jonosfären så stor att inga reflekterande vågor när jorden. Här blir i stället den s k markvågen av betydelse. Markvågen, som följer jordytans krökning, når särskilt långt över hav och när frekvensen är låg (10-100 kHz).

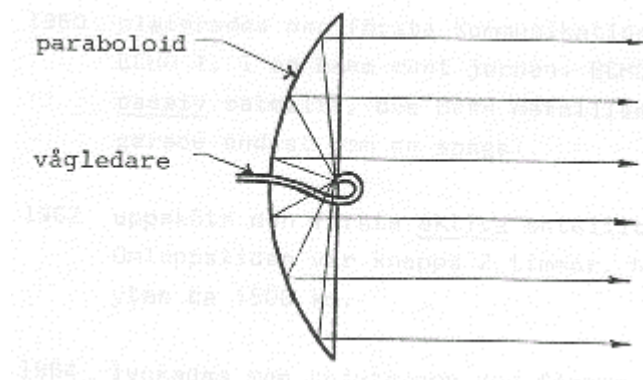


Figur 3.5 Vågutbredning i jonosfären.

- a) under dagen
- b) under natten

3.7.2 Radiolänk

För mikrovågsområdet (våglängd under 1 m) kan man relativt enkelt bygga antenner med dimensioner av storleksordningen flera våglängder. Med en sådan antenn kan den utsända vågen koncentreras till ett smalt knippe med nära parallella stralar. Se figur 3.6. Med en mottagarantenn av samma typ kan man vid nattlig sändareffekt uppnå mycket goda signal - stör - förhållanden. Med antennerhöjder av ca 100 m överbryggar dessa s k radiolänkar avstånd av ca 50 km.



Figur 3.6 Genomsnitt av mikrovågsantenn

Radiolänkarna är ett komplement till de bredbandiga koaxialkabelsystemen och användes ofta tillsammans med dessa. I de militära naten användes radiolänkar av stråte-giska skal även för smalbandiga förbindelser. Ett tredje användningsområde utgör de report agelänkar som forbinder de s k OB-

bussarna med TV-nätet.

En radiolänk ger vid överföring av bredbandiga analoga signaler (exempelvis TV-signaler) bättre kvalitet än en kabelförbindelse eftersom bl a fasdistorsionen är större på kabeln.

De bredbandigaste radiolänkarna har fn. en bandbredd av 800 MHz vilket medger >27000 telefonkanaler eller >10 TV-kanaler i vardera riktningen.

3.7.3 Satellitförbindelse.

Om man vill, kan man se en Satellitförbindelse som en dubbel radiolänk, där den mellersta stationen placerats i en satellit som kretsar runt jorden.

Räckvidden för en satellitförbindelse är enorm, men de tekniska problemen är också stora. Utvecklingen inom detta område har emellertid gått mycket fort, vilket belyses av följande kronologi:

1960

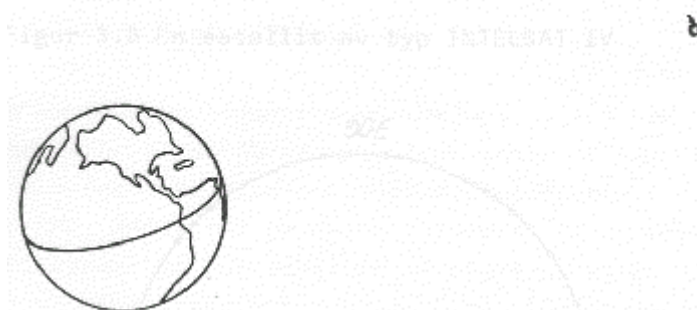
Placerades den första kommunikationssatelliten, ECHO 1, i en bana runt jorden. ECHO 1 var en passiv satellit, dvs dess Metalliserade yta fungerade endast som en spegel.

1962

Sändes den första aktiva satelliten TELSTAR I. Omloppstiden var knappa 2 t immar, höjden över jordytan ca 1500 km.

1964

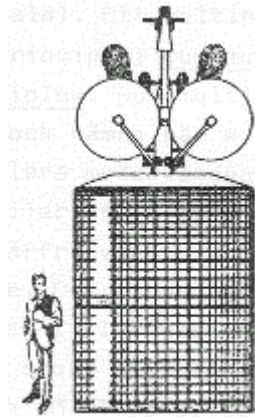
Lyckades man skjuta upp den första geostationära satelliten SYMCOM III. En geostationär eller synkron satellit kretsar 35 800 km över jordytan i ekvatorsplanet. Dess omloppstid blir då 24 timmar och den synes stå stilla ovanför en punkt på ekvatorn. Se figur 3.7. En synkron satellit täcker geometriskt mer än 160° av ekvatorbagen. Tre satelliter täcker hela jordytan bortsett från polarområdena.



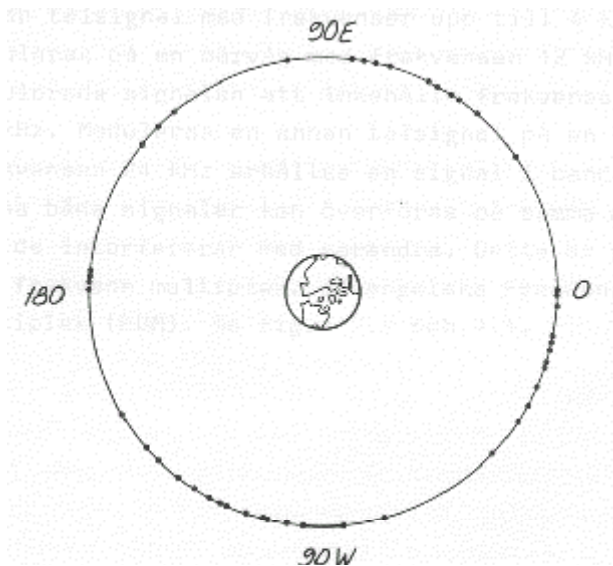
Figur 3.7 Placering av synkron satellit 35 800 km över ekvatorn. Jordradie är 6 400 km.

För kommunikation med jordstationerna användes vanligen frekvenser runt och 6 GHz men områden på 10 och 11 GHz, 20/40GHz och 60/80GHz samt högre nyttjas, frekvensplaner finns.

Man brukar ha två "bredband" ett uppband (upplänkar) och ett nerband (nedlänkar). Tillgänglig bandbredd varierar men närmar sig fiberknippets. Vanligt är 12 500 till 300,000 telefonkanaler plus 48 TV kanaler.



Figur 3.8 En satellit av typ INTELSAT IV



Figur 3.9 Geostationära banan och några viktiga kommunikationssatelliter utduttade.

4. MULTIPLEX

4.1 Inledning

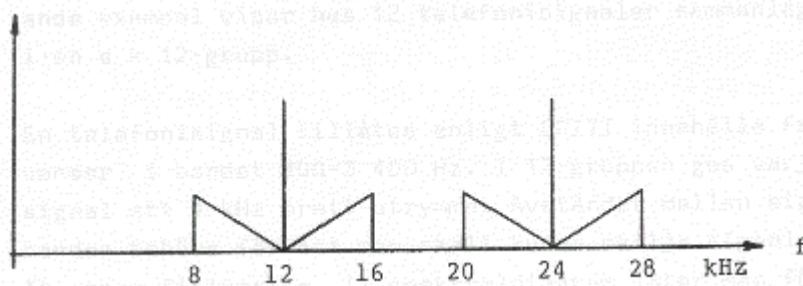
En förutsättning för telekommunikationernas användbarhet är möjligheten att överföra flera meddelanden samtidigt. Den term man använder för detta är multiplex (ordagrant: mångfald). Ett multiplexsystem kan fungera efter tre olika principer: rumsmultiplex, frekvensmultiplex och tidsmultiplex.

Rumsmultiplex är egentligen ett trivialt begrepp och nämns här endast för fullständighet. Det innebär att flera meddelanden kan överföras samtidigt på olika kablar eller andra media. Frekvensmultiplex bildar grunden för bärfrekvenstekniken och är framst ett analogt förfarande. Det behandlas i avsnitt 4.2. Tidsmultiplex är knutet till tidsdiskreta moduleringsmetoder men användes i stort sett endast för rent digitala system som PCM och DM. Tidsmultiplex behandlas i avsnitt 4.3.

4.2 Frekvensmultiplex

Om en talsignal med frekvenser upp till 4 kHz amplitud-moduleras på en bärvåg med frekvensen 12 kHz kommer den modulerade signalen att innehålla frekvenser från 8 till 16 kHz. Moduleras en annan talsignal på en bärvåg med frekvensen 24 kHz erhålls en signal i bandet 20-28 kHz. Dessa båda signaler kan överföras på samma medium utan att de interfererar med varandra.

Detta är principen för frekvens multiplex, på engelska Frequency Division Multiplex (FDM). Se figur 2.5 och 4.1.20



Figur 4.1 Frekvensmultiplex med två DSB-signaler

Ett FDM-system överför alltså genom modulering flera signaler på samma transmissionsmedium. Moduleringsmetod och bandbredd kan skifta -För olika signaler.

Ett exempel på detta är radiokommunikation. Frekvensplanen i figur 1.3 ger en uppfattning om mångfalden användningssätt. Det finns med bandbredden 10 kHz i mellanvågsområdet, med bandbredden 200 kHz i UKV-området, AM+FM med bandbredden 7 MHz för TV i VHF-bandet osv. Det bör kanske påpekas att man med kännedom om räckvidden hos radiovågorna kan utnyttja samma frekvensområden på olika platser. Detta är naturligtvis en form av rumsmultiplex.

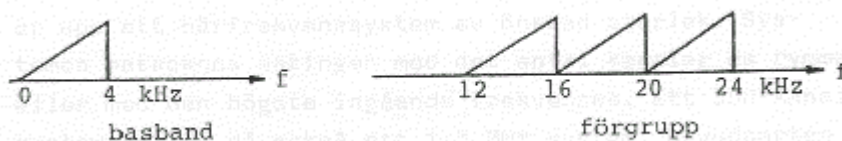
En väsentlig del av bärfrekvenstekniken har utvecklats för

telsfoniförbindelser. Den stora mängden parallella signaler gör det särskilt lönsamt att satsa på system som effektivt utnyttjar existerande transmissionsmedia. Frekvenstransponeringen ombesörjes här genom amplitudmodulering med enkelt sidband.

Principiellt skulle man kunna alstra en FDM-signal genom att i sändaren modulera varje basbandssignal på en egen bärvåg och i mottagaren särskilja önskad signal genom filtrering. Denna metod ställer emellertid alltför stora krav på de använda filtren när många signaler skall multiplexas. I stället sker moduleringen i flera steg. Följande exempel visar hur 12 telefonsignaler sammanlagras i en sk 12-grupp.

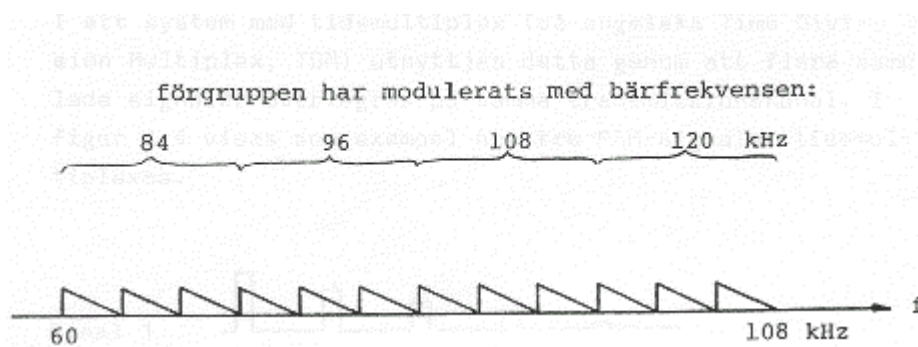
En telefonsignal tillåtes enligt CCITT innehålla frekvenser i bandet 300 - 3400 Hz. I 12-gruppen ges varje signal ett 4 kHz brett utrymme. Avståndet mellan signal-banden behövs för att man ska kunna skilja signalerna åt genom filtrering. (I spektraldiagram later man för enkelhets skull signalerna tacka hela bandet 0-4 kHz).

Första steget i bildandet av en 12-grupp innebär att tre telefonsignaler SSB-moduleras med bärfrekvenserna 12, 16 resp 20 kHz till en sk förgrupp. Övre sidbanden används. Se figur 4.2.



Figur 4.2 Första steget i bildandet av en 12-grupp

Fyra förgrupper SSB-moduleras därefter med bärfrekvenserna 64, 96, 108 resp 120 kHz till en 12-grupp. Nu används undre sidbanden och 12-gruppen kommer därmed att uppta frekvensområdet 60-108 kHz. Se figur 4.3



Figur 4.3 Kanalernas placering i en 12-grupp

Högre ordningars bärfrekvenssystem bildas på liknande sätt som 12-gruppen.

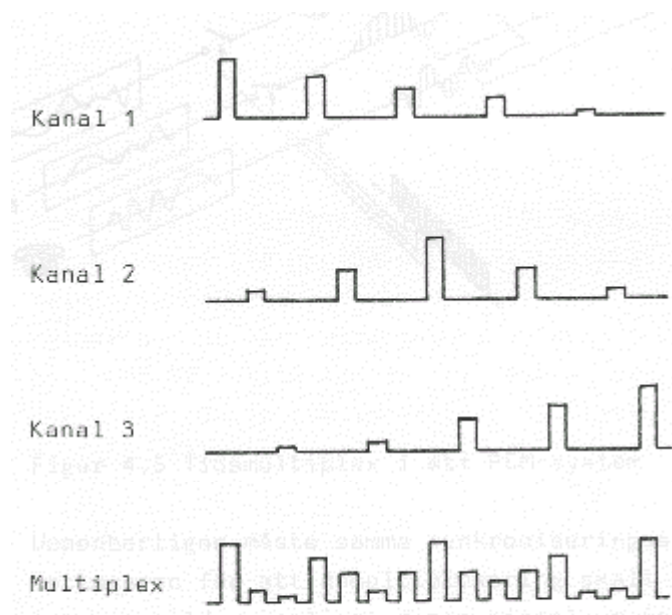
En 60-grupp bildas av fem 12-grupp-er, en 300-grupp av fem 60-grupper osv.

De olika multiplexeneterna fungerar som byggbitar med vilka man bygger upp ett bärfrekvenssystem av önskad storlek. Systemen betecknas antingen med det antal kanaler de rymmer eller med den högsta ingående frekvensen. Ett 300-kanal system kallas då också ett 1.3 MHz system. Huvudparten bärfrekvensförbindelser i Sverige finns i system med 900, 2 700 och 10 800 kanaler (4, 12 och 60 MHz-system).

4.3 Tidsmultiplex

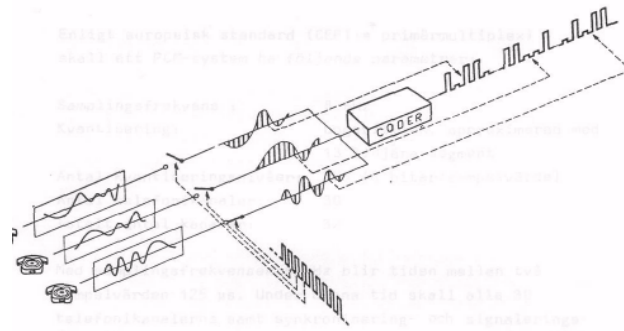
4.3.1 Allmannaprinciper

Som vi sett i avsnitt 2.4.2 kan en bandbegränsad signal fullständigt beskrivas av sina värden i samplingstidpunkterna, förutsatt att samplingsfrekvensen är minst dubbelt så stor som högsta frekvensen i signalen. Sampelvärdena kan överföras med någon lämplig form av pulsmodulering. Den tid som atgår för att överföra ett sampelvärde bestäms av kanalens bandbredd och är ofta mycket mindre än avståndet mellan samplingstidpunkterna. I ett system med tidsmultiplex (på engelska Time Division Multiplex, TDM) utnyttjas detta genom att flera samplade signaler överlagras på samma transmissionskanal. I figur 4.4 visas som exempel hur tre RAM-sig-naler tidsmultiplexas.



Figur 4.4 Tidsmultiplex med PAM-sig-naler

I figur 4.4 skulle man i princip kunna erhålla multi-plexsignalen genom att addera de tre kanalsignalerna. I praktiken styrs multiplexeringen av en särskild synkroniseringssignal sasom visas i figur 4.5. Observera att signalerna inte är ritade i samma tidsskala.



Figur 4.5 Tidsmultiplex i ett PCM-system

Uppenbarligen måste samma synkroniseringssignal finnas i mottagaren för att demultiplexering skall kunna ske. Mottagaren bildar vanligen denna signal ur inkommande pulsföljd, som av sändaren försetts med regelbundet återkommande synkroniseringspulser.

En exklusiv variant av tidsmultiplex är TASI (Time Assignment Speech Interpolation). TASI användes för telefoni över mycket dyrbara transmissionsmedia som satellitförbindelser och undervattenskablar. Systemet utnyttjar förhållandet att också upptagna telefonkanaler är tysta mer än halva tiden.

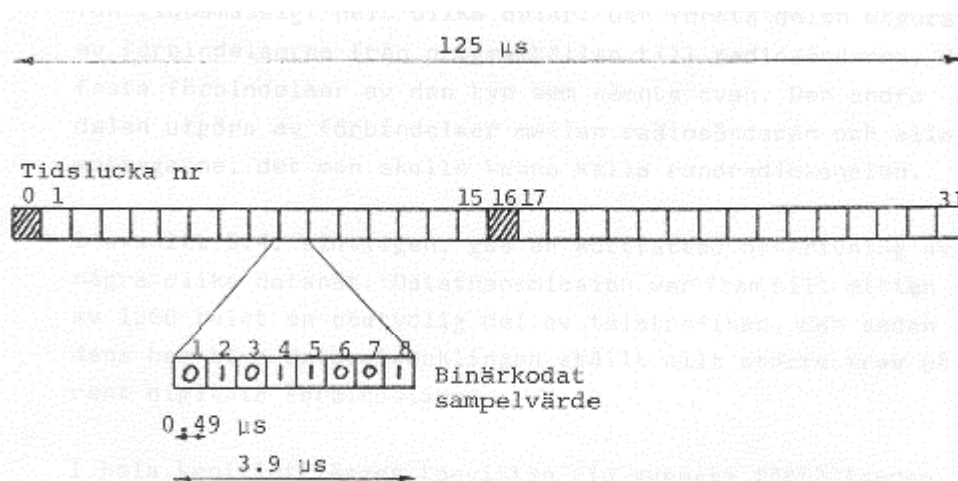
Genom ett avancerat kopplingsförfarande kan de tysta kanalerna utnyttjas för nya telefoniförbindelser. I en tillämpning betjänar 96 dubbelriktade kanaler 235 samtal.

4.3.2 Organisation av ett PCM-system

Enligt europeisk standard (CEPT:s primarmultiplex) ska 11 ett PCM-system ha följande parametrar:

Samplingsfrekvens:	8KHz
Kvantisering:	Logaritmisk, approximerad med 13 linjära segment
Antal kvantiseringssnivåer:	256 (8 bitar/sampelvärde)
Antal telefonkanaler:	30
Totalt antal kanaler:	32

Med samplingsfrekvensen 8 kHz blir tiden mellan två sampelvärden 125 microsekunder. Under denna tid skall alla 30 telefonkanalerna samt synkroniserings- och signalerings-pulserna i de två restsrande kanalerna överföras. Samplingsperioden 125 μ s kallas en ram och är organiserad som figur 4.6 visar. Varje ram innehåller 32 tidsluckor med vardera 8 bitar. Bitfrekvensen är $32 \cdot 8 \cdot 8 = 2048$ kHz.



Figur 4.6 Ram i 30/32-kanals PCM-system. Streckade tidsluckor innehåller synkroniseringsinformationen

5. NÄT

5.1 Inledning

I den enklaste och ursprungligaste formen av telekommunikationsnät sammanbinds varje sändare och mottagare med en fast förbindelse. Sådana nät existerar främst för trådbunden kommunikation. Ett exempel är larrnanläggningar av olika slag, ett annat radiolänkar, ett tredje bankdatasystem samt internet.

Om i ett nät med många sändare och mottagare alla sändare skall förbindas med alla mottagare med fasta förbindelser blir antalet förbindelser mycket stort. (För n sändare och n mottagare fordras $n(n-1)/2$ förbindelser). Man löser problemet genom att använda koncentratorer och växlar. Den viktigaste tillämpningen av denna princip är telefonnätet och vi ägnar avsnitt 5.2 nedan åt att närmare studera detta.

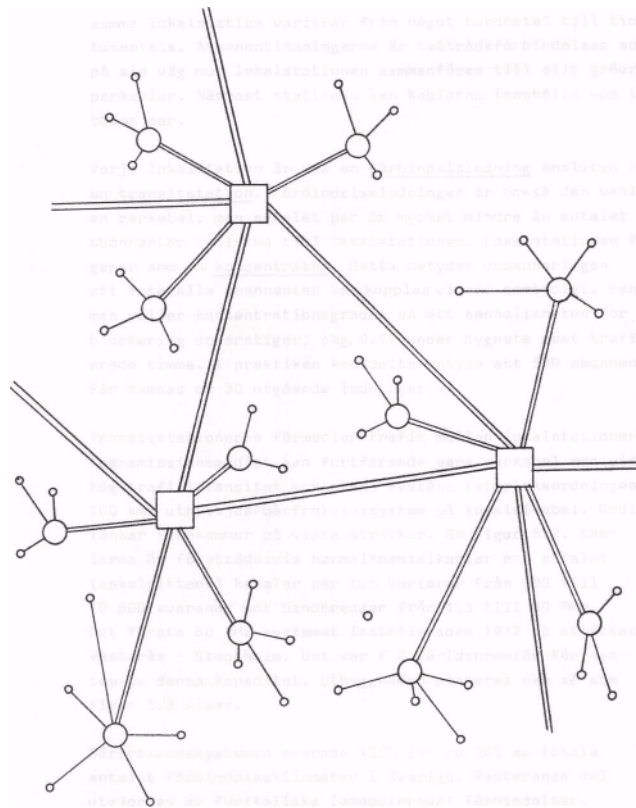
Rundradionätet, som beskrivs i avsnitt 5.3, består av två funktionsmässigt helt olika delar. Den första delen utgörs av förbindelserna från programkällan till radiosändarna, dvs fasta förbindelser av den typ som nämnts ovan. Den andra delen utgörs av förbindelser mellan radiosändaren och alla mottagarna, det man skulle kunna kalla rundradiokanalen.

I avsnitt 5.4, slutligen, ges en kortfattad beskrivning av några olika datanät. Datatransmission var fram till mitten av 1960-talet en obetydlig del av teletrafiken, men sedan dess har bl a datorutvecklingen ställt allt större krav på rent digitala förbindelser.

I hela kapitlet lägges tonvikten vid svenska förhållanden.

5.2 Telenätet

Det allmänna telenätet är principiellt uppbyggt som figur 5.1 visar. Varje abonnent är via en abbonentledning anslut-



Figur 5.1 Telenets uppbyggnad

en till en lokalstation. Antalet abonnenter anslutna till samma lokalstation varierar från något hundratal till tiotusentals. Abonnentledningarna är tvatradförbindelser som på sin väg mot lokalstationen sammanfores till allt gravre parkablar. Närmast stationer: kan kablarna innehålla upp till tusen par.

Varje lokalstation är via en förbindelseledning ansluten till en transitstation.

Förbindelseledningen är också den vanliga en parkabel, men antalet par är mycket mindre än antalet abonnenter anslutna till lokalstationen.

Lokalstationen fungerar som en koncentrator. Detta betyder uppenbarligen att inte alla abonnenter kan kopplas vidare samtidigt, men man väljer koncentrationsgraden så att sannolikheten för blockering understiger, säg, 0.1 % under dygnets mest trafikerade timma. I praktiken kan detta betyda att 500 abonnenter får samsas om 30 utgående ledningar.

Transitstationerna formidlar trafik mellan lokalstationerna.

Transmissionsmediet kan fortfarande vara parkabel men vid hög trafikintensitet och stora avstånd (storleksordningen 100 km) utnyttjas bärfrekvenssystem på koaxialkabel. Radiolankar förekommer på vissa sträckor. Se figur 5.2. Kablarna är förtradesvis normal koaxialkablarna och antalet (enkelriktade) kanaler per tub varierar från 300 till 10 800 svarande mot bandbredder från 1,3 till 60 MHz. Det första 60 MHz-

systemet installerades 1972 på sträckan Vasteras - Stockholm. Det var fö. världspremiar för system av denna kapacitet.

Bärfrekvenssystemen svarade 1950 för ca 20% av totala antalet förbindelsekilometer i Sverige. Resterande del utgjordes av fysikaliska (omodulerade) förbindelser. Som figur 5.4 visar var förhållandet 1970 det omvända. Under perioden ökade dessutom antalet förbindelsekilometer med nästan en faktor tio.

Under 1970-talet har PCM-system blivit ekonomiskt attraktiva på vissa förbindelseledningar i storstadsnäten. Det gäller då 30/32-kanals system på parkablar av måttlig längd (storleksordningen 50 km) där man kan utnyttja att PCM-systemen har lägre terminalkostnad än bärfrekvenssystemen. Många av dessa användes fortfarande idag. Dock har Sverige växlat över till AXE system, dvs stationerna har digitaliserats och kommunikationen har glidit över till datorkommunikation. Dock nyttjas samma teknologier som transportmedia idag.

5.3 Rundradionätet

Rundradio är en sammanfattande benämning för ljudradio och television men innefattar inte till exempel mobilradio som ju till syftet är ett tvåanvändarsystem. Många av de egenskaper som kännetecknar ett rundradionät återfinns emellertid hos bland annat mobilradionät. Särskilt gäller detta rundradiokanalen, dvs kanalen mellan en radio-sändare och ett stort antal mottagare. Rundradiokanalens egenskaper bestäms helt av lagarna för den elektromagnetiska vågutbredningen. Dessa har kortfattat beskrivits i avsnitt 3.7. Ytterligare belysning ges av figur 5.5 och 5.6 som visar täckningsområdena för de större svenska MV- och LV-sändarna samt för FH-sändarna för P1, P2 och P3.