

Mikrovågsteknik:
Trådlös kommunikation

Krister Andreasson

Mikrovågsteknik: Trådlös kommunikation

Copyright © 2009, 2020 Krister Andreasson

Tryckt hos: Författarens Bokmaskin
Stockholm 2009

ISBN 978-91-978296-0-1

Mångfaldigandet av innehållet i denna bok, helt eller delvis, är enligt lagen om upphovsrätt den 30 december 1960 förbjudet utan medgivande av copyright innehavaren.

Förord

Utvecklingen inom mikrovågsområdet har lett till att det finns en mängd färdiga komponenter att köpa. Dessa komponenter är uppbyggda som moduler med anpassad in- och utgång. Mikrovågsarbetet har delats upp i dels komponentkonstruktion och dels systemkonstruktion.

Systemkonstruktören behöver en beskrivande förklaring av funktionen, för att på bästa sätt utnyttja komponenterna. Dessutom behövs en översikt över samtliga komponenter för att kunna bedöma alternativa systemlösningar. Det gäller ju att välja den kombination som ger den enklaste och billigaste slutprodukten.

Komponentkonstruktören bör ha en bred översikt över alla komponenter för att få nya idéer till kretslösningar. Det gäller ju att utnyttja varandras erfarenheter så mycket som möjligt. Idag använder man datorer för att dimensionera och optimera kretsarna. Det underlättar den matematiska hanteringen avsevärt, men det är fortfarande lika viktigt att välja lämpliga kretskopplingar.

Servicetekniker och testingenjörer behöver en beskrivande förklaring, av en stor mängd kretskopplingar, som inte är belastad med matematisk dimensionering. En tekniker behöver snabbt kunna sätta sig in i ett stort blockschema eller en speciell testuppkoppling.

Även försäljare och inköpare behöver en översiktlig förståelse för mikrovågsmarknaden. De måste kunna förstå teknikernas önskemål.

Det finns alltså idag många som arbetar med trådlös kommunikation, som behöver en bred kunskap om mikrovågskomponenter, samt en förståelse för de speciella egenskaper som utnyttjas på mikrovåg. Målsättningen med boken är att ge den översikt och introduktion som behövs för att arbeta med trådlös kommunikation.

Innehåll

DIGITAL MODULERING	1
1. Inledning	1
ASK	1
PSK	2
PSK kombinerat med ASK	3
PSK kombinerat med en snabb sekvens	3
FSK	4
FSK med extremt många frekvenser	5
PSK & QAM	6
1. BPSK	6
Switchad ledning	6
180° hybrid	6
Reflektionskoppling	7
Switch med transistor	7
Slot-line	8
Bifas modulator för UHF	10
Dioder och drivkrets	11
2. QPSK	12
Switchad ledningslängd	12
Fasvridande nät	12
Cirkulator	13
Hybrider	13
Vektormodulator	14
Strip / Slot	16
Subharmoniskt pumpad QPSK	17
Vektor diagram	18
Spektra för PSK	20
Korrigerig av fasfel och amplitudfel	22
Offset QPSK	24
3. MSK	25
Amplitudvariation före bifas-modulaton	26

VCO	Spänningsstyrd oscillator	29
NCO	Numeriskt styrd oscillator	29
MSK	formning efter modulaton	31
	Injektionslåst MSK	32
ACI	Adjacent Channel Interferens	33
ISI	Inter Symbol Interference	33
4.	Filtrering.....	34
	"Nykvist" filter	34
	"Raised Cosine" filter	36
	Variationer i amplitud	37
	Filtrets placering	38
	Gaussisk MSK GMSK.....	39
	Partiell Respons	40
5.	Andra pulsformer	43
	Nästan konstant amplitud.....	43
	$\pi/4$ QPSK	44
	Sammanställning av olika pulsformer	46
	8 PSK och 16 PSK	48
	Fastolerans	49
6.	QAM.....	50
	16 QAM	50
	32 QAM	53
	64 QAM	54
	Jämförelse	56
	256 QAM	57
	256 SSQAM.....	58
	Triangulär fördelning.....	59
	Cirkulär fördelning	59
	QPRS.....	60
	Bandbredd - effekt indelning	61
	Signal/brus förhållande	64
7.	Sammanfattning.....	65
	Hög känslighet	65
	Stor informationsmängd.....	65
	PSK & QAM MOTTAGARE.....	66
1.	Inledning	66
	PSK demodulering	66
	PSK demodulering med fasdetektor	67

2. Regenerering av bärvåg med dubblare	68
BPSK	68
QPSK	71
Låsning av frekvensen	72
Högre känslighet	73
MSK.....	74
QAM	75
3. Regenerering av bärvåg med Costas Loop.....	76
Costas Loop för BPSK.....	76
Squaring Loss	78
AFC.....	79
Tri-mixer	80
Polarity Loop	82
Costas Loop för QPSK	83
Costas Loop med information om frekvens och amplitud.....	84
Costas Loop för MSK.....	85
Beslutsstyrd faslåsning	86
Remodulator.....	89
Remodulator för QPSK.....	90
Reverse modulation	91
8 PSK demodulering.....	92
4. Data detektering.....	94
Ögonogram.....	94
5. Delay detektor	97
Delay-detektor för BPSK.....	97
Delay-detektor för QPSK.....	99
Delay-detektor för MSK	100
Jämförelse	101
$\pi/4$ QPSK.....	101
Jämförelse vid Offset-QPSK	102
6. Frekvensdiskriminator.....	103
Frekvensdiskriminator för MSK.....	103
Jämförelse FD och DD	104
Ögonogram.....	105
7. Beslutsstyrd demodulering	106
Beslutsåterkoppling	106
MLS-detektor.....	108
8. Regenerering av klockfrekvens	109

Inledning	109
Omslags detektor	112
Delay detektor.....	113
Frekvens dubbling.....	113
Differentiering med $\lambda/4$ ledning	114
Differentiering med två hybrider	115
Diffkrets med en hybrid.....	115
Filtrering	116
Equalizer	117
Sammanställning.....	117
9. Felrättande koder	118
Trellis-kodad modulation.....	119
10. Sammanfattning demodulering.....	122
FSK & OFDM	125
1. FSK modulering.....	125
MFSK.....	126
Spektra	126
Störningar.....	127
Koherent FSK	128
2. FSK demodulator.....	129
FSK demodulering	129
En detektor per frekvens	129
Fädning	130
Gemensam detektor som hoppar i frekvens	131
Frekvensdiskriminator	132
Koherent detektor	133
3. OFDM	134
Modem med FFT	134
Frekvensselektiv fädning	136
Skyddsområde i tiden.....	138
Synkronisering av FFT	139
Modulation.....	140
Offset av LO-frekvensen.....	141
Diversitet.....	141
SFN – Single Frequency Network	142
Fördel.....	143
Nackdel	143
Applikationer	144

4. Sammanfattning.....	145
FSK	145
OFDM	146
 SPEKTRUM SPRIDNING.....	 147
1. Inledning.....	147
2. Direkt sekvens	148
Beskrivning av modem	148
PN-sekvenser	149
Gold koder	151
Modulering med data	151
Olika typer av multipel access	153
Process Gain	155
Kapacitet	156
Reglering av amplituden	157
Soft hand-over.....	158
3. DS demodulator	159
Korrelatorns funktion.....	159
Heterodyn korrelator.....	161
Synkronisering	161
Tracking	162
Tau-Dither.....	163
Delay-Lock.....	164
Rake mottagare	165
Rake fingrar	167
4. Sammanfattning.....	169
 MOBILTELEFON	 171
1. Inledning.....	171
2. Cell-radio	172
Frekvenser	174
Microcell	174
Erlang.....	175
Sektorceller	176
Cellens uppdelning i lager	177
Sammanfattning	177

3. GSM systemet.....	178
Mobilstation.....	178
Basstation.....	179
Nätverk.....	179
SIM-kort.....	180
Logiska kanaler.....	181
Fysiska kanaler.....	181
TDMA.....	182
Tidskorrigering.....	184
Hand-over.....	184
Uteffekt.....	185
Frekvensindelning.....	186
Interleaving.....	186
4. Diversitet.....	187
Fading.....	187
Rician.....	188
Rayleigh.....	188
Rymd diversitet.....	189
Polarisations diversitet.....	190
Kombinering med switch.....	191
Kombinering för max C/N.....	191
Kombinering med lika gain.....	192
Frekvens diversitet.....	193
Jämförelse.....	195
Delay spread.....	196
Koherent bandbredd.....	198
Kluster med sektorceller.....	199
Ännu tätare återanvändning av frekvenserna.....	201
Hierarkisk cell-planering.....	202
Cell-optimering.....	202
5. Förbättring av GSM.....	203
HSCSD High Speed Circuit Switched Data.....	203
EDGE Enhanced Data rate for GSM.....	203
GPRS General Packet Radio Services.....	204
ANDRA SYSTEM FÖR TAL.....	206
1. Trådlösa telefoner.....	206
Dynamisk tilldelning av kanaler.....	206
Tidsduplex.....	206
2. DECT.....	207

Användning.....	207
Datahastighet	208
Duplexer.....	209
Hand-over	209
DCA Dynamic Cell Allocation	209
Räckvidd	209
Modulator.....	210
3. TETRA.....	211
4. Mobil-satellit	212
Satellit på låg höjd	212
Geostationär satellit	212
5. IS-95 cdmaOne.....	213
Forward link (basstation till mobil)	213
Kort kod 1,2288 MHz.....	213
Walsh-koder	213
Pilot-kanalen	214
Synk-kanal	214
Paging-kanal.....	214
Reverse link (mobil till basstation).....	215
Lång kod 1,2288 Mcps	215
Kort kod	216
Walsh-kod	216
Modulation.....	216
Process Gain	216
TREDJE GENERATIONEN.....	217
1. Inledning.....	217
Standardisering av 3:e generationen	218
Frekvenser.....	219
3:e generationens modulationer	220
3:e generationens tjänster	220
2. WCDMA	221
Pilotsymboler	221
Räckvidd	222
Nätverk.....	222
Uppdelning i grupper	223
Hierarkisk uppdelning.....	224
Compressed Mode	225
Variabel datahastighet	226

Modulation i nerlänk.....	226
Modulation i upplänk.....	227
Variationer i amplitud.....	228
TPC (transmit power control).....	228
Asynkron cellsökning.....	228
Diversitet.....	229
Paket-data.....	229
3. Cdma2000.....	230
cdma 2000 1x.....	230
cdma2000 1x EV-DO.....	230
cdma2000 1x EV-DV.....	231
cdma2000 1x EV-DO Rev A.....	231
cdma2000 1x EV-DO Rev B.....	231
cdma2000 1x EV-DO Rev C.....	231
4. TD-CDMA.....	232
TDD.....	232
Frekvensområde.....	233
Användningsområde.....	233
UMTS-TDD.....	234
TD-CDMA.....	234
DCA - Dynamic Cell Allocation.....	235
Reglering av uteffekten.....	235
Undertryckning av interferens.....	236
TD-SCDMA.....	237
Synkronisering.....	238
5. Sammanfattning.....	239
Multipel Access.....	239
Duplex.....	240
Utbyggnad av GSM.....	241
3:e generationen.....	241
Mobilsystem på 900 MHz bandet och 800 MHz bandet.....	242
Mobilsystem på 1800 MHz bandet, 1900 MHz bandet samt Japan.....	242
Cordless.....	243
Mobilsystem 3G.....	243
TRÅDLÖSA DATANÄT.....	244
1. WLAN.....	244
HiperLAN 2.....	245
OFDM.....	246
Modulation av bärvågorna.....	246

Störningar.....	247
Prioritering.....	247
Blockschema.....	248
IEEE 802.11.....	249
802.11 – Frekvenshopp.....	249
802.11 – Direktsekvens.....	249
802.11 b – CCK.....	250
802.11 a – 5 GHz.....	250
802.11 g.....	251
802.11 d.....	251
802.11 e.....	251
802.11 h.....	252
802.11 i.....	252
802.11 j.....	252
802.11 n.....	252
802.11 p.....	253
802.11 s.....	253
Sammanställning WLAN.....	253
2. Bluetooth.....	254
Modulation.....	255
Uteffekt.....	255
Mottagare.....	256
Profiler.....	257
Datapaket.....	258
Pico-nät.....	258
Scatter-nät.....	259
3. BWA.....	260
MMDS.....	261
FWA.....	261
LMDS.....	262
Vågutbredning.....	262
Mesh.....	263
IEEE 802.16.....	265
Korrigerig av frekvensen.....	265
Uteffekt.....	266
802.16 a.....	267
Tillägg till 802.16.....	268
Jämförelse.....	268
802.20.....	269
Vidareutveckling av 802.16.....	269
4. WiMAX.....	270

Bandbredd	270
Subkanaler	272
Modulation.....	273
Skyddsområde i tiden.....	274
Datahastighet	274
Hybrid-ARQ.....	275
FDD - TDD	275
Störningar.....	276
Jämförelse: WLAN - WiMAX	277
Jämförelse: Fixed - Mobile WiMAX.....	279

ANTENNER FÖR BASSTATIONER.....281

1. Smarta antenner	281
Flexibilitet och adaptiv styrning	281
Olika generationers mobilsystem.....	282
Sektorer	282
Tilt.....	283
Lobbredd	286
Switchade lobar.....	288
Switchade lobar i olika system	291
Adaptiva antenner	292
Uteffekt och räckvidd	297
Diversitet på sändaren.....	298
Delay-Diversitet.....	299
Rymd-Tid diversitet	300
Rymd-Frekvens diversitet	301
MIMO	302
4-Branch antenn	303
Matning av antenn	305
Sändare och mottagare kombinerat med antennen	307
Radiohuvud med styrning av tilt.....	308
System för multiband.....	309
Radiohuvud för multiband	310
Översikt.....	311
Sammanfattning	312
2. Mobiltelefon inomhus	313
Närliggande basstation.....	314
Picobas	314
DAS – Distribuerat Antenn System.....	315
DAS med stort nät.....	316
Aktiv DAS	317

Repeater	318
Läckande kabel	319
Picoceller	319
Flera picobaser	319
Företagsnät	320
Femtobas	321
Sammanställning över olika celler	322

FJÄRDE GENERATIONEN.....323

1. Utbyggnaden från 3G mot 4G 323

HSDPA	323
AMC (Adaptiv modulation och kodning).....	324
HARQ	325
Snabb trafikplanering.....	325
Kanalkoder.....	326
HS-DSCH.....	326
HSUPA	327
Jämförelse	328
Evolved HSPA	328

2. LTE.....329

OFDM signalens uppdelning	330
Fördelning av resurserna.....	332
Pilotsignaler	332
Upplänk med SC-FDMA	333
Skyddsområde i tiden.....	334
Effektreglering	335
Mobiler i granncellen.....	335
Referens till koherent demodulering.....	335
Uppmätning av upplänken	336
Korrigerig av avståndet.....	336
Frekvensband	337
FDD eller TDD	337

3. Sammanfattning.....338

UMTS mobilsystem	338
Transmission (Backhaul)	339
Jämförelse mellan teknologier	339
Trend inom kommunikation.....	340

KONVERGENS MED ANDRA NÄT.....341

1. DVB	341
Frekvensområdena för TV	342
Returkanal	342
Fördel	343
Hierarkisk modulation	343
2. HFC Hybrid Fiber Coax	345
Kabelnät	346
Nackdel	347
Nästa generation	347
DVB-C	348
3. DSL.....	349
4. Sammanfattning.....	352
Informationspaketets begränsning	352
Konvergens mellan olika tekniker	353
Trippel tjänster.....	354
WiMAX	355
Resursernas utnyttjande	356
Nya kombinationer.....	358
Nya frekvenser	359
FEMTE GENERATIONEN.....	360
1. Olika generationer	360
2. Applikationer	361
3. Frekvensband	362
4. Modulation	363
5. OFDM signalens uppdelning	364
Hög tillförlitlighet och snabb åtkomst	365
6. Massive MIMO	366
Högre gain och smalare lob	368
Vertikal styrning	368
Integration av access/backhaul	369
Elektronik i masten	369
Blockschema för antennenheten	370
7. Mobil access på mm-våg.....	371

Antenn på mm-våg..... 372

Digital Modulering

1. Inledning

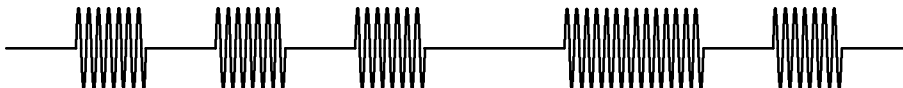
Digital information kan moduleras på RF signalens amplitud, frekvens eller fas.

ASK	—	Amplitud Shift Keying
FSK	—	Frequency Shift Keying
PSK	—	Phase Shift Keying

Inom varje grupp finns en mängd olika varianter med olika fördelar. Det finns också många olika kombinationer mellan amplitud-, frekvens- och fasmodulation.

Man väljer modulationsprincip för att få en lämplig kompromiss mellan informationsmängd, RF bandbredd, störtaålighet (minsta signal/brus förhållande) och komplexitet (kostnad).

ASK



ASK ger enkel konstruktion av både sändare och mottagare. Binär etta ger uteffekt till, och binär nolla switchar uteffekten från. Den kallas ibland On-Off Keying, OOK.

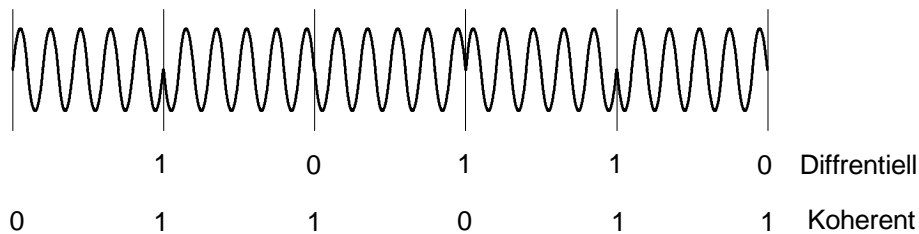
Hälften av tiden är sändningen switchad från. Medeleffekten är alltså 3 dB mindre än topp-effekten. Jämfört med BPSK behöver den 3 dB mer signal/brus förhållande för samma felsannolikhet. Med koherent detektering av ASK vinner man bara 0,5 dB. ASK används till enkla billiga system för telemetri på korta avstånd.

PSK

Av de olika digitala metoderna så är PSK den modulation som ger den teoretiskt lägsta felsannolikheten. PSK kan alltså arbeta på lägre signal/brus förhållande.

- PSK — Phase Shift Keying
- BPSK — Bi Phase (två faslägen)
- QPSK — Quadra Phase (fyrfas)

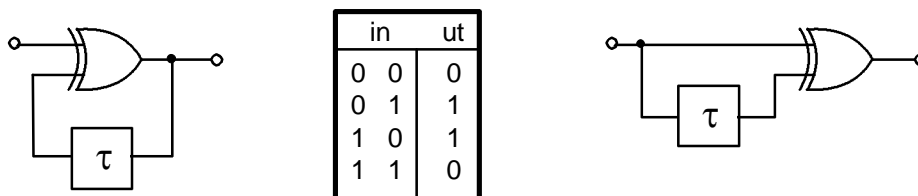
Fasmoduleringen kan vara antingen koherent eller icke koherent (differentiell).



Den differentiella fasmoduleringen ändrar fas för t.ex. varje binär etta. Koherent modulering innebär att alla nollor har ett fasläge och alla ettor har det andra fasläget (0° respektive 180°).

Den koherenta modulationen ger den lägsta felsannolikheten, men den kräver en mer komplicerad demodulator. För att kunna demodulera en koherent PSK måste man nämligen ha en omodulerad fasreferens. Dessutom behövs en speciell kodsekvens (preamble) för att avgöra vad som är 0 respektive 1.

Differentiellt dataflöde kan alstras och detekteras med XOR-grind och fördröjningen en databit.



En encoder alstrar en etta då databiten inte är lika som den föregående databiten. Det differentiella dataflödet modulerar sen fasen. I mottagaren demoduleras först fasen och sen görs en jämförelse med föregående databit i decodern med hjälp av en XOR-grind. Alternativt kan man få en enklare mottagare med en differentiell demodulator som kombinerar de två stegen.

Det differentiella systemet blir enklare, men med sämre känslighet. När en symbol tolkas fel blir två databitar fel. Varje symbol jämförs ju både med föregående och efterföljande symbol.

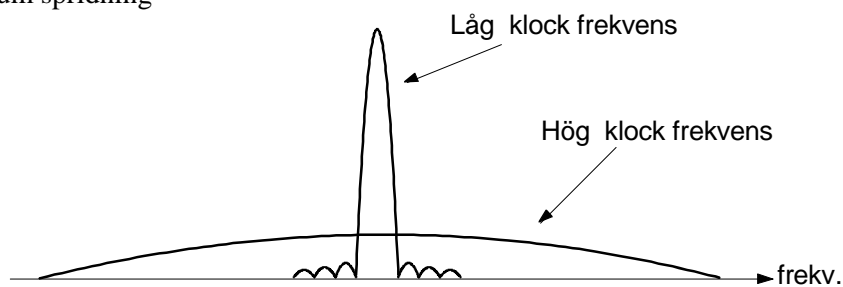
PSK kombinerat med ASK

QAM - Quadrature Amplitude Modulation

PSK hoppar mellan två faslägen för att överföra ett dataflöde. Med fyra faslägen överförs två bitar parallellt, och med åtta faslägen överförs tre bitar. Men det är opraktiskt att använda fler än åtta faslägen. Istället kombineras fyra faslägen med fler olika amplituder. Signalen hoppar alltså både i fas och i amplitud, för att samtidigt överföra fler databitar. På en viss bandbredd kan man alltså överföra högre datahastighet genom att utnyttja amplituden också.

PSK kombinerat med en snabb sekvens

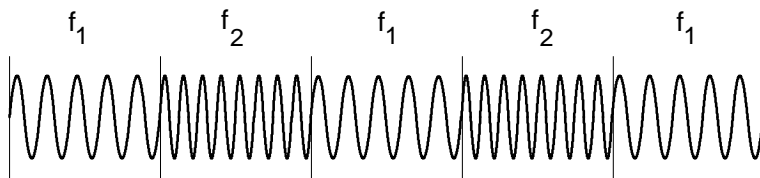
Spektrum spridning



Dataflödet har en ganska låg klockfrekvens, som ger ett smalt spektra. Dessutom används en känd sekvens, som har ett mycket brett spektra. Både data och den kända sekvensen modulerar fasen, BPSK eller QPSK.

Resultatet blir ett brett spektra med låg amplitud. I mottagaren tas den kända sekvensen bort, så att det blir ett smalt spektra med hög amplitud igen.

FSK



Vid FSK hoppar signalen mellan olika frekvenser i takt med dataflödet.

FSK används:

1. då transmissionen störs av kraftig flervägsförbindelse, t.ex. vid HF-kommunikation på långa avstånd.
2. på mm-våg därför att problemen med fasjitter överväger spektrumekonomin.
3. då demodulatorens behövs vara mycket enkel, t.ex. personsökare (pager).

PSK används gärna på mikrovåg eftersom den kräver så liten bandbredd.

HF-bandet (3 - 30 MHz) har stora problem med reflektionen från jonosfären.

Variationer i jonosfären ger fasdistorsion och snabba amplitudförändringar.

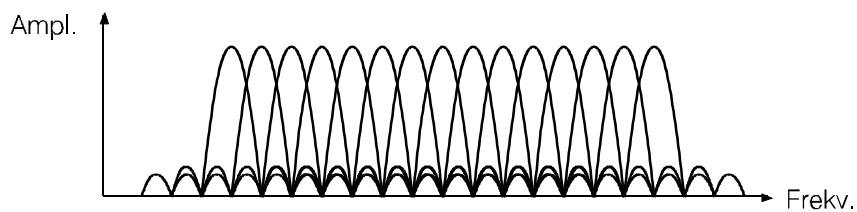
Det är då bättre med FSK. En kompromiss kan vara differentiell PSK som ger 3 dB bättre känslighet än FSK.

PSK är 6 dB känsligare än FSK, dvs kan arbeta på lägre signal/brus förhållande. Men det gäller bara på mikrovåg, som begränsas av vitt brus. Alla modulationstyper störs i lika hög grad av impulsbruset, som dominerar på HF-bandet. Även VHF och UHF besväras av impulsbruset.

MSK (Minimum Shift Keying) är en koherent FSK som kräver till och med mindre bandbredd än PSK.

FSK med extremt många frekvenser

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

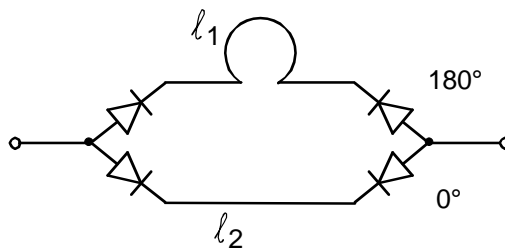


OFDM är en FSK med extremt många frekvenser som ligger så tätt packade som det går. Dessutom är varje frekvens modulerad med QAM. Med extremt många parallella databitar blir klockfrekvensen mycket låg i förhållande till datahastigheten. Fördelen är att man kan använda hög datahastighet trots att det är mycket reflektioner i omgivningen.

PSK & QAM

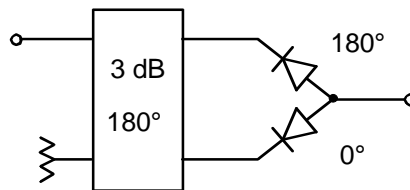
1. BPSK

Switchad ledning



Ett enkelt sätt att få 180° fasskift är att förlänga ledningen en halv våglängd. l_1 är alltså 180° längre än l_2

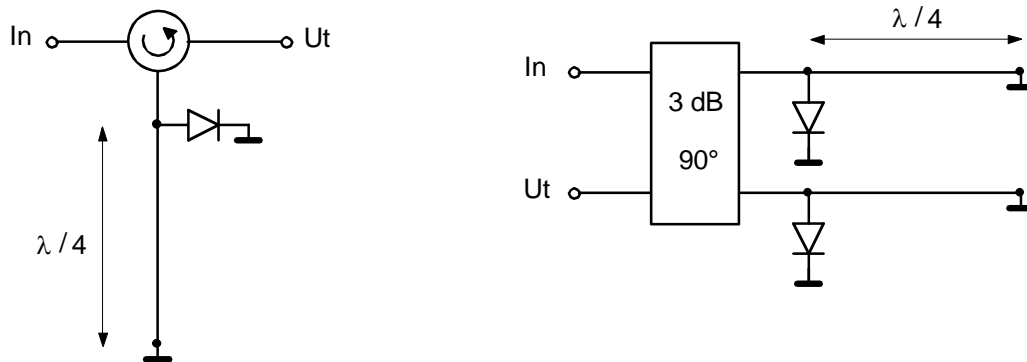
180° hybrid



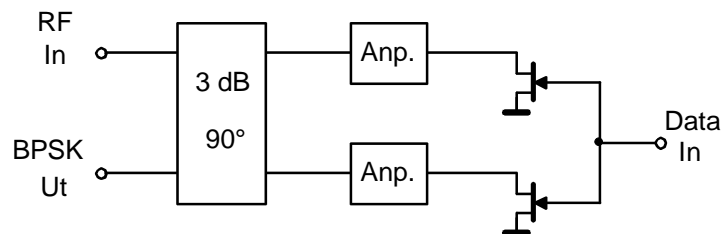
För att få större bandbredd kan man använda en 180° hybrid. Är det viktigt med lågt VSWR på ingången får man använda en PIN omkopplare med intern avslutning.

Reflektionskoppling

Vid reflektionskoppling används ledningslängden både fram och tillbaks. In- och utgång separeras då med en cirkulator eller en 90° hybrid.



Switch med transistor

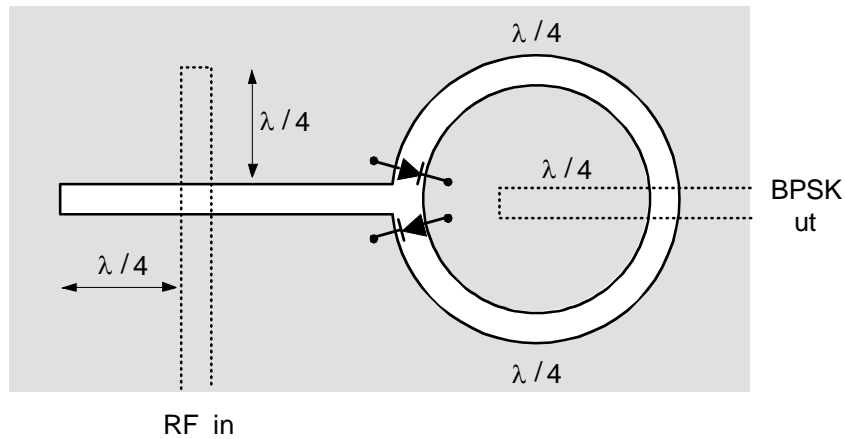


Man kan också använda transistorer istället för dioder. Transistorn switchas till och från, så att hybriderna blir avslutade med en öppen respektive kortsluten ledning. Det ger 180° fashopp.

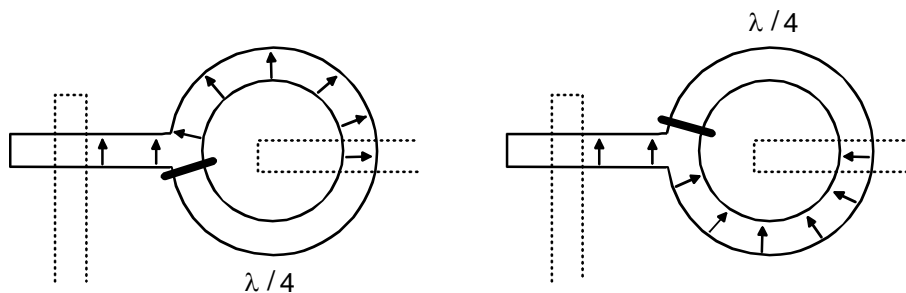
En FET-transistor för medelhög effekt ger ganska små variationer i reflektionskoefficienten då temperatur och signalnivå varierar.

På mm-våg ger ströreaktanserna fashel. Det är då bättre att använda två BPSK-modulatorer i en balanserad koppling med två 90° hybrider. Ett annat sätt att balansera är att använda 180° delning med en balun på ena sidan, och sammansättning i fas med en Wilkinson på andra sidan.

Slot-line

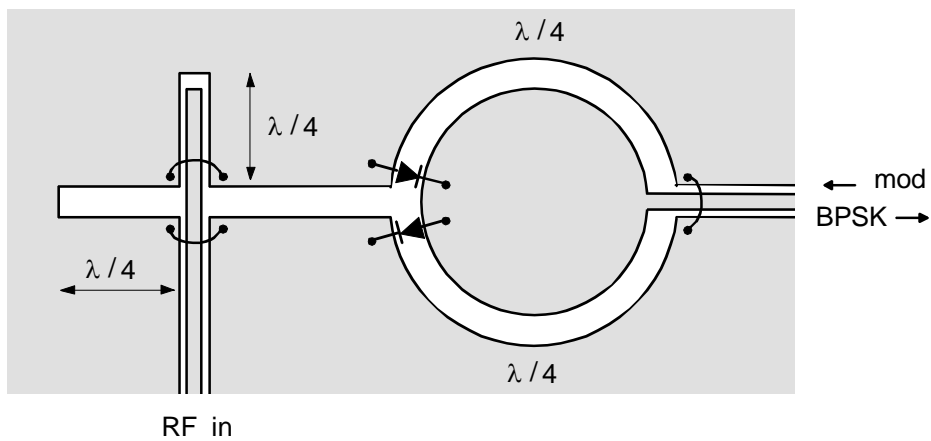


Micro-strip på in- och utgång kopplar till slot-line i jordplanet. Signalen som modulerar kortsluter en diod i taget.



Insignalen leds den övre eller nedre vägen. Det ger olika riktningar på RF-fältet i utgången. En vändning av polariteten är detsamma som ett 180° fasskift. Slot-ledningen ser en kortsluten diod en kvarts våglängd längre bort. Övergången blir alltså inte nerlastad.

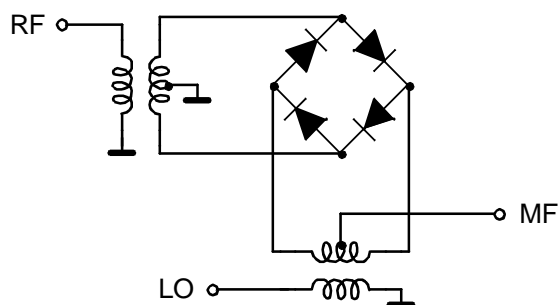
Fasvändningen i en strip/slot övergång ger ett mycket litet fassfel. Felet bestäms främst av asymmetrin i de två slot-line armarna, dvs placeringen av strip-ledaren till utgången. Det ställs alltså stora krav på inpassningen då de två sidorna på laminatet ska etsas.



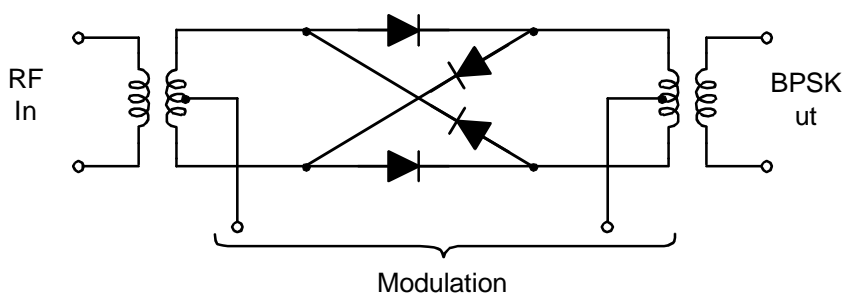
Om man använder coplanar ledning istället för micro-strip, kan allt etsas på samma sida av laminatet. Det ger hög noggrannhet, så att den även kan användas på mm-våg.

Nackdelen är överbyglingarna som behövs vid varje diskontinuitet av coplanara ledningen.

Bifas modulator för UHF



I en balanserad modulator switchar dioderna insignalen till och från. I en dubbelbalanserad modulator med diodring switchas insignalen mellan två olika faslägen. Faslägena syns tydligast om figuren ritas om.



Antingen leds signalen rakt över mellan transformatorerna, eller så leder de dioder som kopplar signalen tvärs över till motsatt sida på transformatorn. Det betyder 180° fasvändning i takt med modulationsfrekvensen på MF ingången.

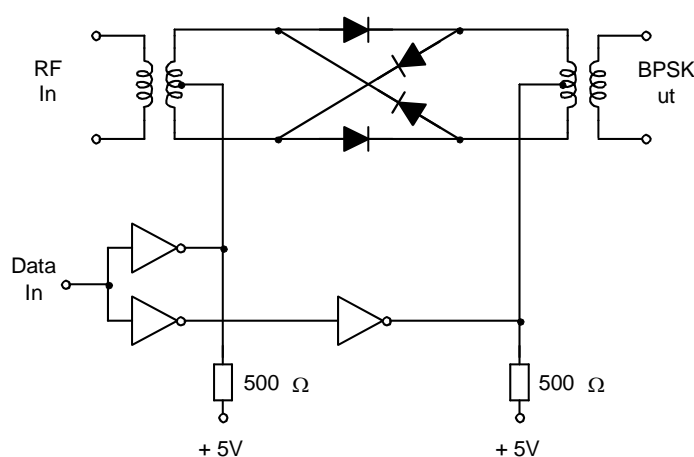
Modulatorn switchas alltså av två olika polariteter på drivspänningen. Det är samma krets som kan fungera som pulsmodulator, men då switchas den mellan noll och en (valfri) polaritet.

Bifas modulatorn ger således två distinkta faslägen på RF signalen, i takt med den digitala insignalen. Eftersom modulatorns MF-kanal kan vara mycket bredbandig, kan datahastigheten vara mycket stor.

Dioder och drivkrets

Till modulatoren används Schottky eller PIN-dioder. Schottky ger den snabbaste modulatoren. PIN-dioderna klarar högre signalstyrkor med lägre intermodulation. PIN-dioderna ger också lägre dämpning.

Modulationsingången drivs balanserad, dvs när den ena sidan är hög så är den andra sidan låg. Man skulle också kunna jorda den ena sidan och driva den andra obalanserad, men då måste den drivas bipolärt. Vanligast är balanserad drivning direkt med logikkretsar.



Med zero-bias Schottky kan modulatoren drivas med lågeffekts CMOS. Den klarar då RF-signaler upp till ca 0 dBm.

Vanliga Schottky klarar +5 till +15 dBm och kan moduleras med TTL eller ECL.

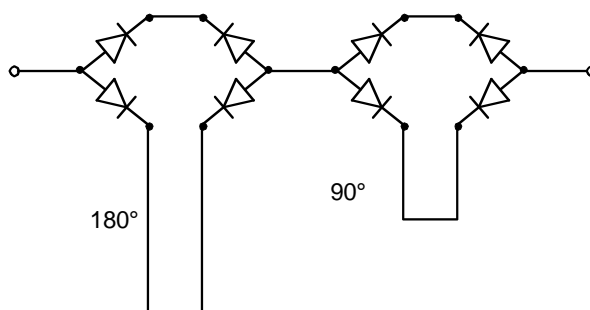
Är signalen mer än +20 dBm bör man använda PIN-dioder som drivs med TTL.

Valet mellan olika dioder och drivkretsar är en avvägning mellan datahastighet och signalstyrka. Datahastigheten begränsas av hur snabbt dioderna kan switchas. För att få Gbit/s måste omkopplingen vara snabbare än 1 ns. En PIN-diod har vanligen en omkopplingstid på ca 5 ns. Men man kan komma ner strax under 1 ns genom att minimera induktansen i tillledningarna. En Schottky kan switchas på 500 – 700 ps. Den är snabbare eftersom den inte har så stor laddningslagring som PIN-dioden. Den snabbaste dioden är tunnel-dioden. Mindre än 75 ps är möjligt, men den är begränsad till ganska låga effekter. En FET-switch kan ha en switchtid på ca 125 ps.

2. QPSK

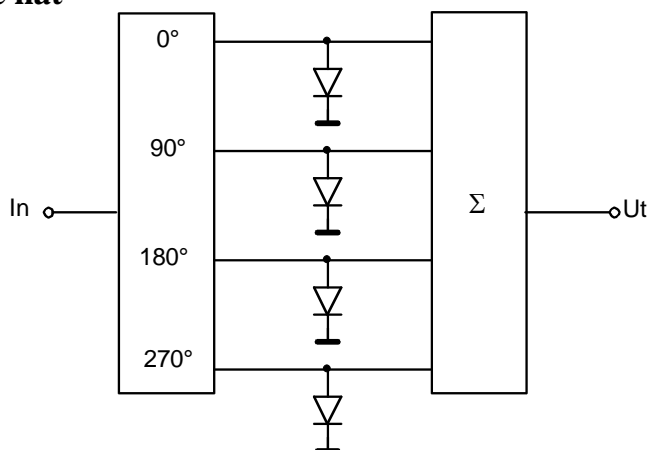
QPSK modulering behöver en digital fasmodulator med fyra faslägen 0° , 90° , 180° och 270° . Den byggs efter samma principer som BPSK-modulatorn, men med två olika fasskiftare. Som switch kan man använda diod eller transistor.

Switchad ledningslängd



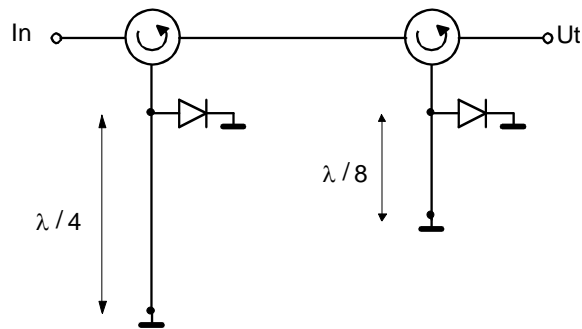
Dioderna kan switcha signalen den övre vägen (referensen 0°). Alternativt kan dioderna switcha in 90° ledningen, 180° ledningen eller båda ledningarna (dvs 270°). Nackdelen är att det åtgår ganska många dioder.

Fasvridande nät



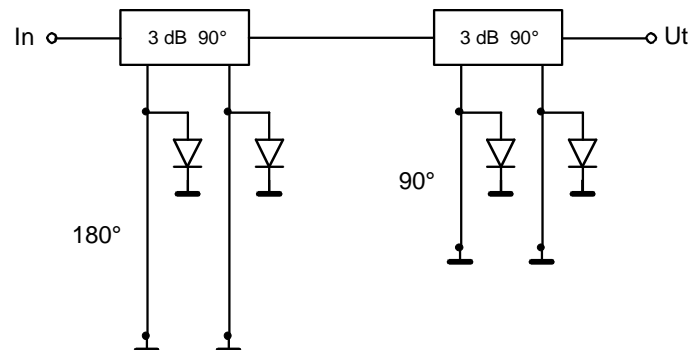
Signalen fasvrids till 4 utgångar med hjälp av reaktanser, ledningslängder, hybrider eller transistorer. Önskat fastillstånd väljs med dioderna (Schottky eller PIN-dioder).

Cirkulator



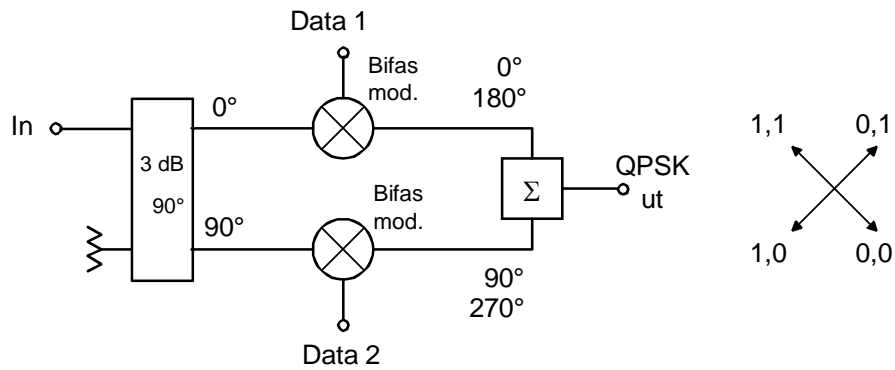
Med ledningslängder i reflektionskoppling behövs det inte så många dioder. En cirkulator separerar in- och utgång i respektive steg.

Hybrider



Alternativt kan reflektionen separeras med hybrider. De är enklare och billigare än cirkulatorerna. Nackdelen är att det åtgår fler dioder.

Vektormodulator

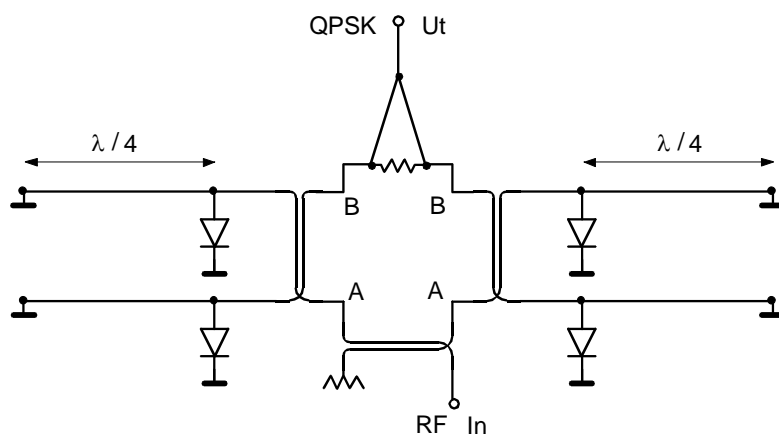


RF-signalen delas upp med en 90° hybrid och går till två bifasmodulatorer. Den ena modulatorens switchar mellan 0° och 180° och den andra modulatorens switchar mellan 90° och 270° . Signalerna från de båda modulatorens adderas sedan i en effektdelare (combiner). Fasen enligt figuren är vriden 45° på grund av vektoradditionen av två 90° skilda signaler. Men i praktiken har absolutfasen ingen betydelse.

Utsignalen har således de fyra faslägena som önskas i QPSK. Det aktuella fasläget bestäms av de två dataingångarna.

QPSK modulerar samtidigt två olika datakanaler. Det betyder att den innehåller dubbelt så stor informationsmängd som BPSK.

QPSK modulatorens (vektor modulatorens) kan byggas i micro-strip med switchade ledningslängder.



Signalen delas upp i två vägar med en 3 dB 90° hybrid. De båda vägarna ges olika faslängd beroende på hur PIN-switcharna är förspända. Sedan sammansätts signalerna med en 0° Wilkinson combiner. Faslägena adderas där vektoriellt.

Faslängden från A till B, då dioderna är kortslutna, är 270°. En kortslutning ger ju -180° och hybriderna ger -90°. Om dioderna är öppna blir fasgången ytterligare 180° (gångvägen fram och tillbaks), dvs sammanlagt -90°.

Wilkinson combinern är en kvarts våglängd lång, dvs har -90° fasgång. Den totala fasen blir summan av: hybriderna på ingången, BPSK modulatorens och Wilkinson combinern.

Vänster sida, slutna dioder	-90	-270	-90	= -90
Höger sida , slutna dioder	0	-270	-90	= 0

Dessa båda signaler sammansatt ger en fas på -45°

Vänster sida, slutna dioder	-90	-270	-90	= -90
Höger sida , öppna dioder	0	-90	-90	= -180

Dessa båda signaler sammansatt ger en fas på -135°

Vänster sida, öppna dioder	-90	-90	-90	= -270
Höger sida , öppna dioder	0	-90	-90	= -180

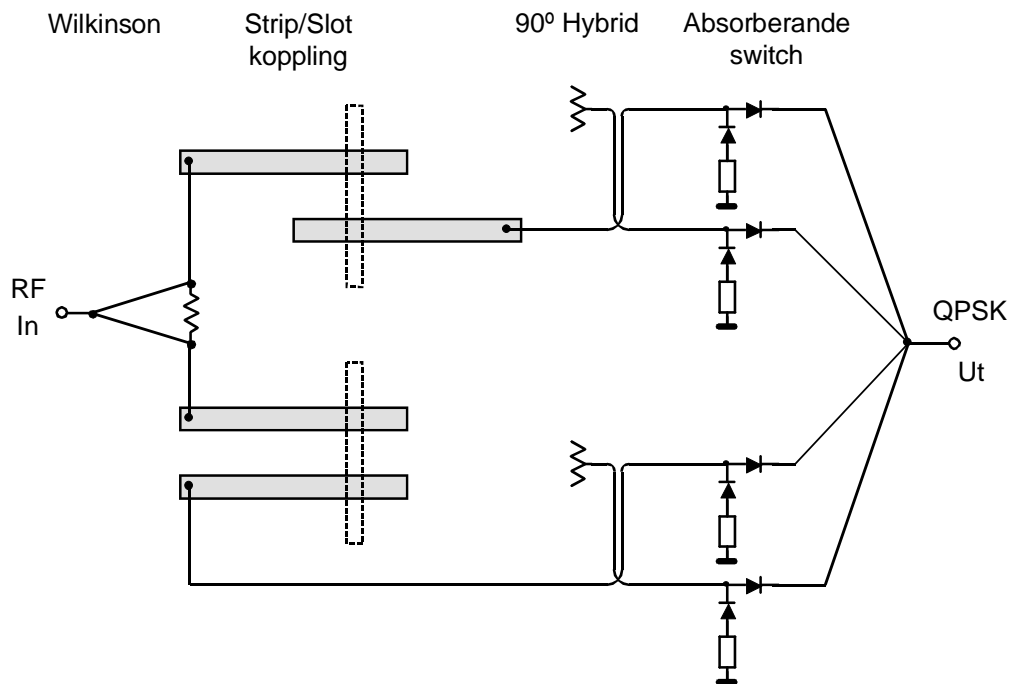
Dessa båda signaler sammansatt ger en fas på -225°

Vänster sida, öppna dioder	-90	-90	-90	= -270
höger sida , slutna dioder	0	-270	-90	= 0

Dessa båda signaler sammansatt ger en fas på -315°

Resultatet blir de fyra faserna	-45	-135	-225	-315
Om man tar ena fasen som referens	0	-90	-180	-270

Strip / Slot

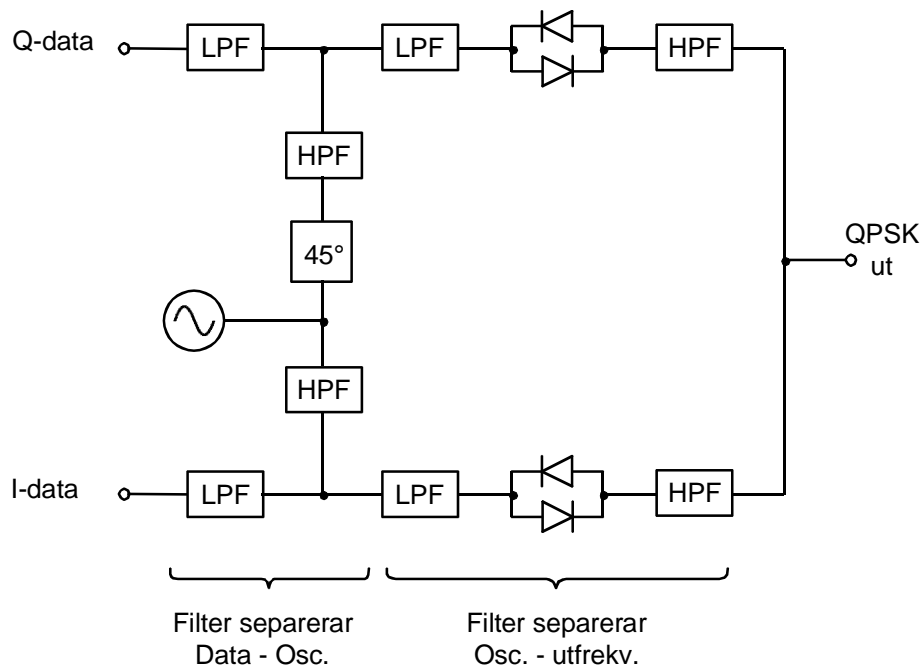


En Wilkinson effektdelare delar upp signalen i två lika vägar, dvs 0° delning. Övergångar mellan strip-line och slot-line används för att vända fasen. Beroende på riktningen av utgångsledningen får man 0° eller 180° fäsvändning. Hybriderna ger 90° uppdelning av respektive signal. De fyra fastillstånden väljs sedan med absorberande (anpassade) switchar.

Över ett par GHz kan amplitudfelet bli så litet som 0,5 dB och fasfelet mindre än 5° .

Alternativt kan man använda 90° hybrid på ingången och två Wilkinson effektdelare före switchen. Om bandbredden inte är så stor, får man enklast 180° med en halv vågsledning. Med transistorer kan man vända fasen 180° mycket bredbandigt.

Subharmoniskt pumpad QPSK



Dataflöde och oscillatorns frekvens kombineras med hjälp av filter (multiplexer). Signalerna leds fram till mixern, som består av två motvända dioder. Dioderna alstrar den dubbla övertonen. Fasen väljs med dataflödet.

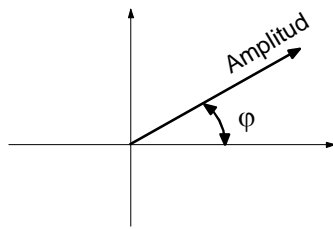
Filtret efter mixern tar bort de lägre frekvenserna från dataflödet och oscillatorn, men släpper fram den modulerade dubbla frekvensen. Filtret före mixern förhindrar att dubbla frekvensen går bakåt.

Oscillatorns signal delas upp till I och Q kanalerna med 45° fasskillnad. Vid frekvensdubblingen i mixern dubblas även fasen, så att man får de önskade 90° . Fasskiftaren kan vara en $1/8$ lång ledning.

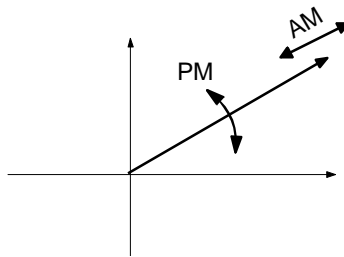
Men en oscillator på 19 GHz blir utsignalen 38 GHz. Den kan arbeta med ett dataflöde på 4 Gbit/sek per kanal.

Vektor diagram

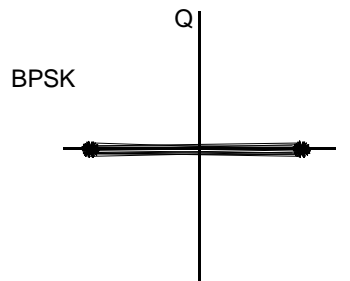
Inom digital kommunikation presenteras ofta signalen i ett polärt diagram.



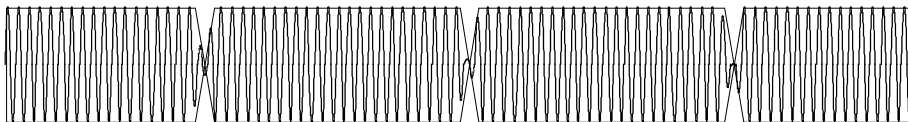
Amplituden bestämmer avståndet till centrum och fasen bestämmer vektorns riktning.



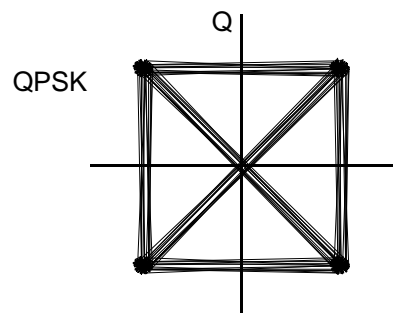
AM-modulering varierar längden på vektorn och fasmodulering varierar riktningen på vektorn.



BPSK innebär att signalen hoppar mellan två faslägen som skiljer sig 180° . De två tillstånden har samma amplitud. Men för att komma från ena tillståndet till det andra minskar först signalens amplitud ner till noll, och sedan växer den upp med det motsatta fasläget. I övergången mellan de båda faslägena av BPSK-signalen är det alltså 100 % AM.



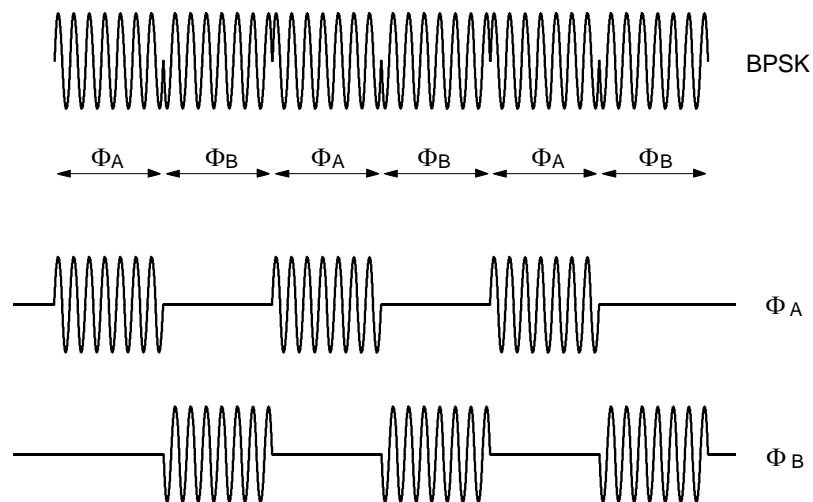
Om signalen är tillräckligt stark kan man alltså se koden med en enkel diod-detektor.



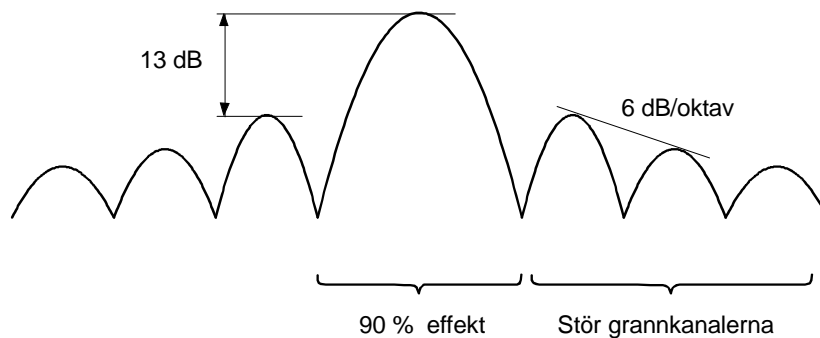
En QPSK signal hoppar mellan fyra olika faslägen. När I- och Q-kanalerna hoppar samtidigt går amplituden också ner till noll (genom origo). QPSK har alltså 100 % AM på hälften av sitt dataflöde.

Spektra för PSK

För att förstå hur spektrat ser ut, för en PSK-signal, kan man dela upp den i två delsignaler med varsitt fasläge.

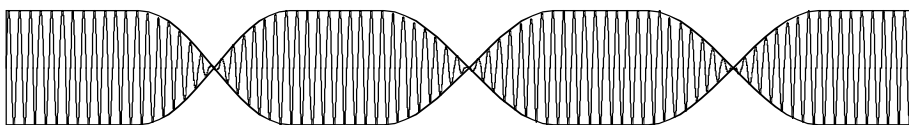


Den består alltså av pulskodade RF signaler, och har således ett spektrum som en fyrkantpuls.

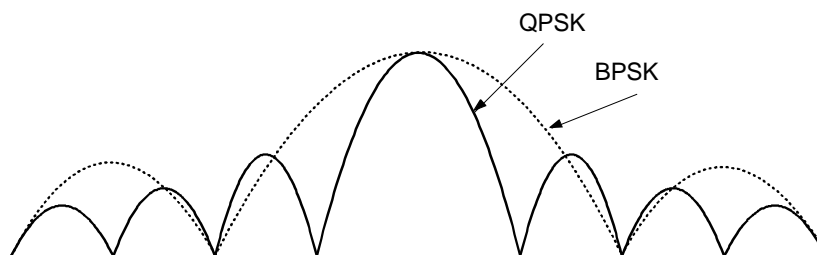


En pulskodad RF-signal har ett linjespektrum som bestäms av avståndet mellan pulserna. Men eftersom ett dataflöde har ett pulskodavstånd som hela tiden varierar så ser man endast spektrats envelop. Med fyrkantiga databitar blir första sidloben endast 13 dB undertryckt, och sen avtar övertonerna med 6 dB/oktav.

När flera signaler ligger på olika frekvensband intill varandra, kommer spektrats sidlobor att störa i grannkanalerna. Man kan lätt filtrera bort sidloberna. Det gör inte så mycket eftersom endast 10 % av effekten finns där. 90 % av effekten ligger i huvudloben. Men en filtrerad fyrkantpuls ger långsammare stig- och falltider.



En filtrerad datapuls blir avrundad. Om den sen förstärks och klipps blir den mer fyrkantig igen. När signalen går genom ett olinjärt element, t.ex. en klass C förstärkare, så kommer alltså sidloberna alltså att återgenereras.



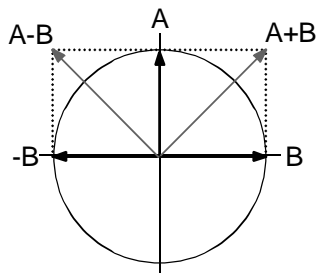
Bredden på huvudloben bestäms av datahastigheten, eller närmare bestämt längden på datapulserna. För samma datamängd kan QPSK klockas långsammare. Då får man bara hälften så stor bandbredd.

Man kan också säga att för samma spektra (klockhastighet) kan QPSK innehålla dubbelt så mycket information som BPSK. QPSK har ju två parallella datakanaler.

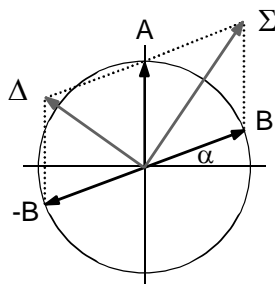
Korrigering av faskel och amplitudfel

Det största problemet med QPSK modulatorer på mikrovåg och mm-våg är att de två kanalerna har obalans i amplitud och fas. Ett system på mm-våg, som ska klara stora variationer i temperatur, får i praktiken ett faskel på några grader och amplitudfel på ca 1 dB.

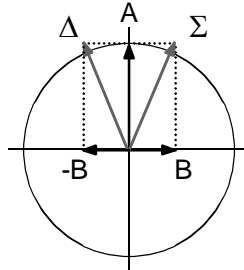
En modulator på låg frekvens får bra prestanda. Men efterföljande uppblandning till mm-våg är komplicerad och dyr. Ett annat alternativ är att modulera direkt på mm-våg och korrigera fas och amplitudfel i samma MMIC.



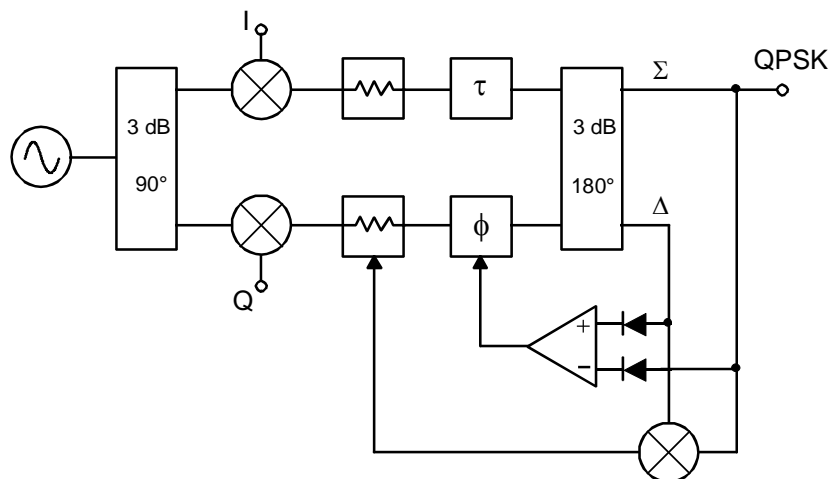
Två signaler (A och B) som är lika stora och skiljer sig 90° adderas vektoriellt till en signal på 45° . Om ena signalen vänds i negativ riktning, blir resultatet en skillnadssignal som lutar 135° . Summan och skillnaden skiljer sig alltså 90° och är lika stora.



Om ena signalen har ett faskel, så blir Σ och Δ inte lika stora. Den ena ökar och den andra minskar i amplitud. Amplitudskillnaden är alltså ett mått på faskellet.



Om de två signalerna inte är lika stora, så blir det inte 90° skillnad mellan Σ och Δ . Genom att mäta fasskillnaden får man ett mått på insignalernas amplitudbalans.



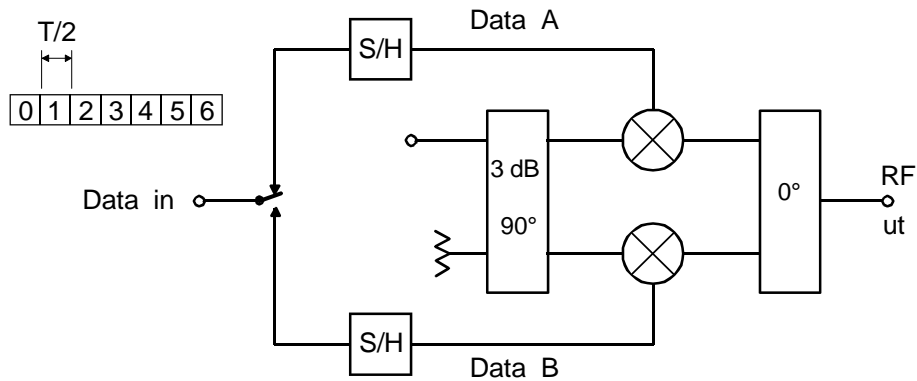
Den ena kanalen har försetts med en variabel dämpningsfaktor och variabel fasskiftare. Den andra kanalen har en kompensering för att reglerområdena ska hamna rätt. Med en 180 hybrid alstras Σ Δ signalerna.

En fasdetektor på Σ Δ kanalerna ger ett mått på avvikelserna i amplitud, och korrigerar dämpningsfaktorn i en sluten slinga. Med detektorer och differentialsförstärkare får man ett mått på fasfelet, som en fasskiftare korrigerar i en annan sluten slinga.

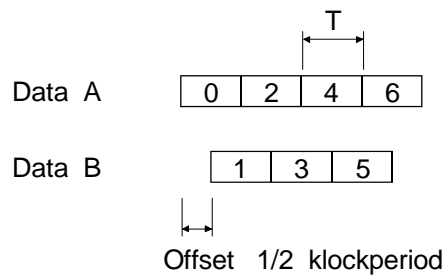
Fördelen med den här modularen är att den själv alstrar sina referenser för att balansera bort fasfel och amplitudfel.

Offset QPSK

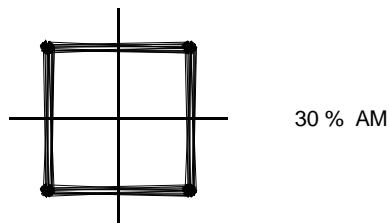
OQPSK eller SQPSK (Stagger QPSK) är en modulering med fyra faslägen, där de två bifas-modulatorerna förhindras att switcha samtidigt.



Dataflödet delas upp till de två bifas-modulatorerna. Varannan databit till A och varannan till B. Aktuell data förlängs i "Sample and Hold" kretsarna.



De två dataflödena är tidsförskjutna $\frac{1}{2}$ klockperiod. Endast en bifas-modulator i taget kan switchas. Fashoppen blir således begränsade till endast intilliggande fasläge.

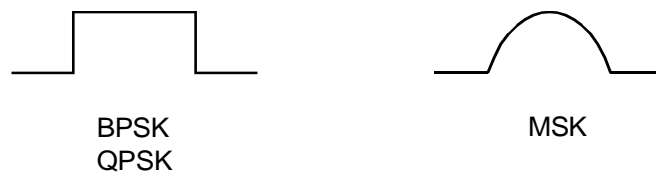


Eftersom signalen inte går diagonalt genom origo, går amplituden aldrig ner till noll. Variationerna motsvarar bara 30 % AM.

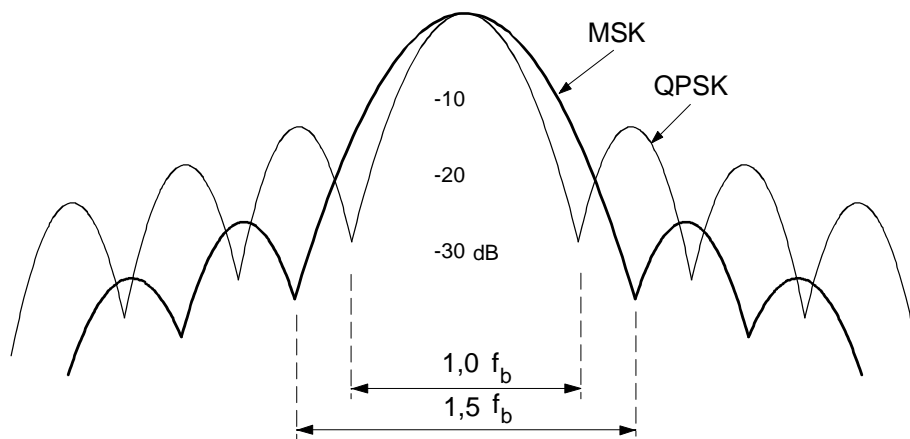
3. MSK

MSK — Minimum Shift Keying
 CPM — Continuous Phase Modulation

I en PSK-signal hoppar fasen mellan de olika faslägena. En fyrkantmodulering ger ett pulsspektra med höga sidlober. Dessa sidlober kommer att betraktas som störningar i kanalerna intill. Om modulationspulsen avrundas blir övertonerna, dvs sidloberna, mindre.



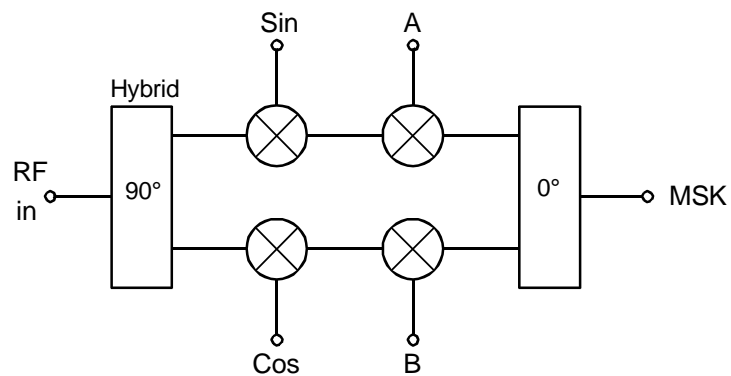
Med en avrundning i form av en halv sinuskurva blir sidloberna avsevärt lägre, och snabbare avtagande. Tyvärr blir det på bekostnad av lite större bredd på huvudloben. Modulationen kallas MSK.



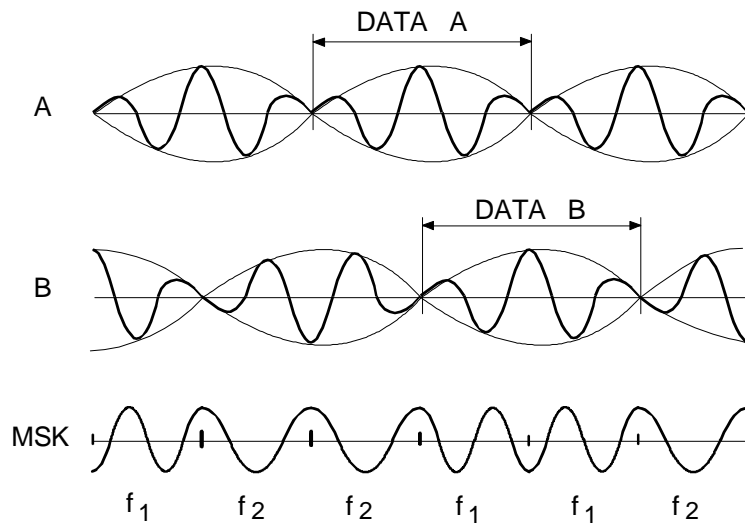
MSK-modulatore är utformad som en OQPSK-modulator. Skillnaden är att RF signalens amplitud varierar på I- respektive Q-kanalen.

50 % bredare spektra ger mer störningar i de närmaste grannkanalerna om kanalerna ligger mycket tätt. Med lite större kanalavstånd blir störningarna mycket mindre. Sidloberna avtar med 6 dB/oktav för QPSK och med 12 dB/oktan för MSK. 99 % av signalens effekt ryms inom bandbredden $0,8 \cdot f_b$ för QPSK och inom $1,2 \cdot f_b$ för MSK.

Amplitudvariation före bifas-modulatore

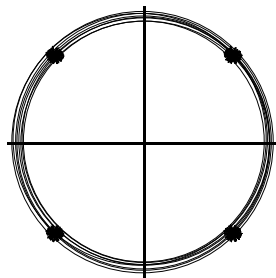


RF amplituden kan varieras med hjälp av en separat amplitud-modulator före själva bifas-modulatore. Varje datapuls kommer då att fasskifta en RF signal som är avrundad enligt en sinusenvelop.



Dataflödena är tidsförskjutna som vid OQPSK. Den filtrerade klockfrekvensen som AM-modulerar bärvågen är också tidsförskjutet. Den ena RF signalen får då en sinus-modulering när den andra har en cosinus-modulering. Fasskiftena sker då amplituden är noll. Transienterna elimineras och övertonerna (sidloberna) blir mycket små.

Eftersom amplituden varierar sinus respektive cosinus så följer vektordiagrammet en cirkel. Fasskiftena sker alltså helt utan AM.



Fasen ökar eller minskar kontinuerligt, dvs utan fassprång. En kontinuerlig fasförskjutning är detsamma som en frekvensändring. Frekvensen ökar eller minskar beroende på åt vilket håll fasen vrids.

Slutresultatet är att en MSK signal är en faskontinuerlig FSK.

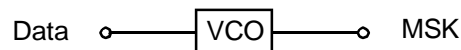
CPFSK — Continuous Phase FSK

Skillnaden mellan de två frekvenserna, som representerar 0 och 1, är halva bitfrekvensen.

$$\frac{f_2 - f_1}{f_b} = 0,5$$

MSK är den specialvariant av CPFSK där modulationsindex är 0,5. Den har också kallats FFSK (Fast Frequency Shift Keying).

VCO Spänningsstyrd oscillator



Man kan få en MSK signal direkt från en VCO om modulationens amplitud avpassas så att modulationsindex blir 0,5

Den enkla kretsen är tyvärr ganska instabil. Om styramplituden ändras så är det inte MSK längre. Dessutom är oscillatorn inte frekvensstabil. Den har inte heller tillräcklig linjäritet för att ge låg distorsion.

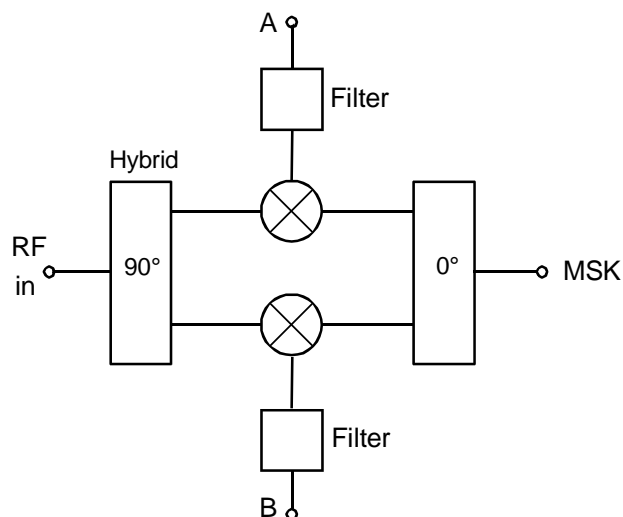
NCO Numeriskt styrd oscillator



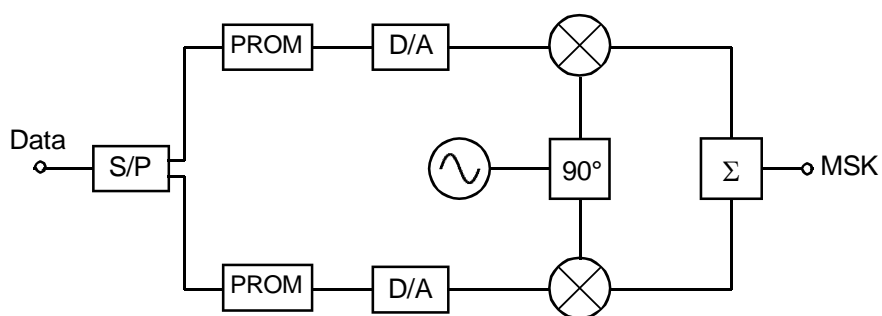
I en numeriskt styrd oscillator är utsignalen uppbyggd helt digitalt, med sinusregister och D/A omvandlare. Den blir extremt stabil och linjär. Den blir dessutom faskontinuerlig i frekvenshoppen.

Oscillatorn kallas NCO (Numerically Controlled Oscillator) eller DDS (Direct Digital Synthesizer) och fungerar både som generator och modulator. Det blir en mycket liten krets, utan kritiska RF-komponenter.

Amplitudvariation med formad datapuls



En dubbelbalanserad blandare, eller en balanserad bifas-modulator med transistor som switch, kan också användas som variabel dämpningsattenuator. Amplituden justeras då med en likspänning samtidigt som den fasskiftas med polariteten. Datapulsens ska då vara avrundad som en sinuskurva. Med en blandare som variabel dämpningsattenuator kan man dessutom behöva en krets för linjärisering.

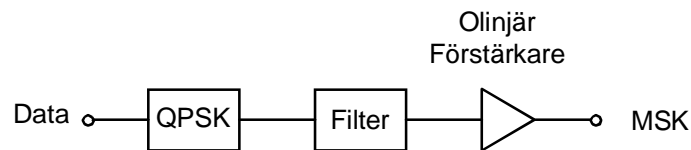


Avrundningen av datapulsens kan läggas i en PROM-tabell. För varje datapuls klockas tabellen igenom så att utsignalens amplitud blir sinusformad.

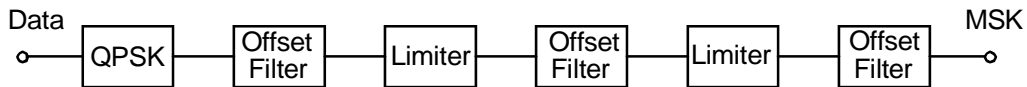
PROM-tabellen kan samtidigt innehålla en linjärisering av amplitud-modulationen.

MSK-formning efter modulatore

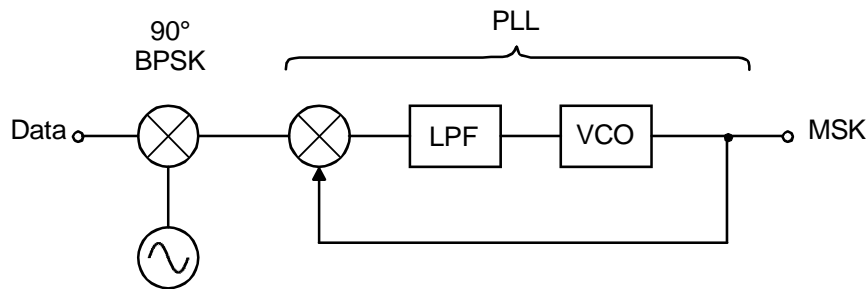
Med PROM och D/A omvandlare kan man CPM-modulera upp till ca 100 Mbit/s. Behöver man mycket hög datahastighet (Gbit/s) kan man istället filtrera efter QPSK modulatore. Ett fasskiftande nät ger mjuk övergång mellan faslägena. Det ger lägre sidlobor än MSK och en nästan konstant amplitud. Den kan alltså förstärkas med en olinjär förstärkare.



Amplitudvariationerna beror på filtrets bandbredd och hur mycket centerfrekvensen är sidoförskjuten (offset). Med en limiter minskas amplitudriplet ytterligare.

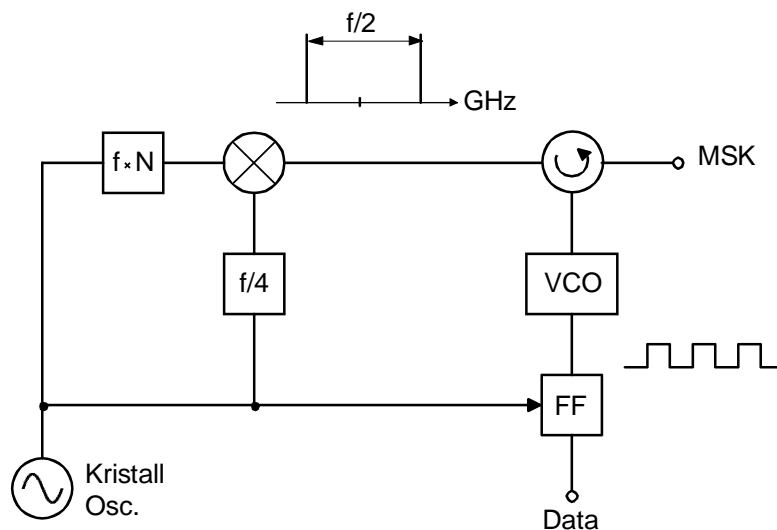


Två filtersteg med efterföljande limiter kan ge en god approximation av en "raised cosine" övergång. Kurvformen sträcker sig över ca 3 databitar, dvs 3RC.



Filtreringen kan alternativt ske med hjälp av en PLL. Modulatore ger $\pm 90^\circ$ fashopp. PLL slingans filtrering ger mjukare fasövergångar. Samtidigt kan slingfiltret forma spektrat till låga sidlobor.

Injektionslåst MSK



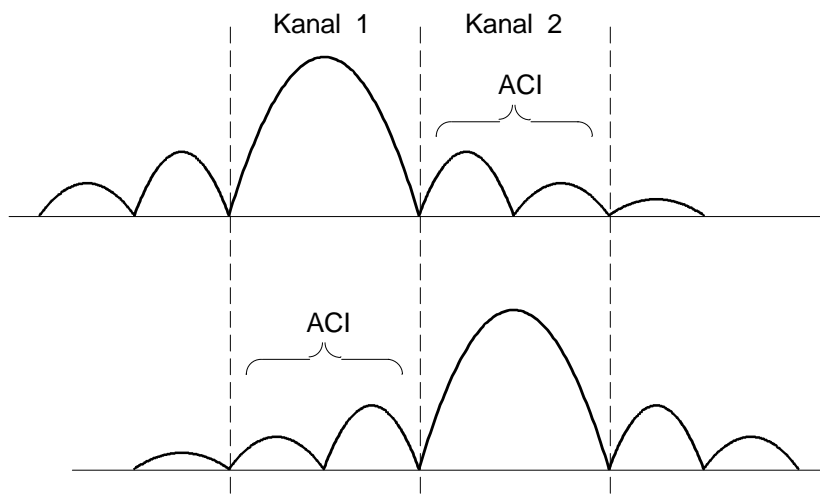
En kristalloscillator multipliceras upp till mikrovåg, eller mm-våg. Där blandas den med en lämplig frekvens (som också härrör från kristalloscillatorn), så att sidbanden blir de önskade frekvenserna f_1 respektive f_2

Frekvensvalet sker med en injektionslåst VCO. Den ställs först in mellan f_1 och f_2 . Dataflödet kommer sedan att öka respektive minska frekvensen, så att oscilatorn hamnar i närheten av den önskade frekvensen. Oscilatorn kommer då att injektionslåsa till den närmaste frekvensen, f_2 respektive f_1

Eftersom klockfrekvensen och mikrovågsfrekvensen härrör från samma kristalloscillator får man faskontinuitet på utsignalen då den switchas.

En fördel med kretsen är att MSK alstras direkt på utgången av högeffektsoscilatorn. Det behövs alltså ingen efterföljande förstärkare. Det är speciellt intressant då man ska arbeta på mm-våg.

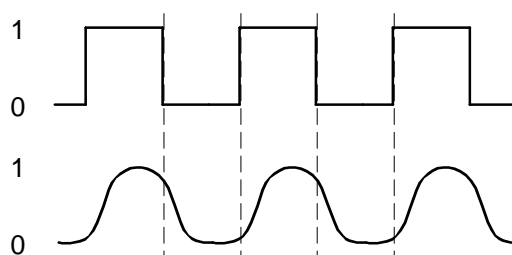
ACI Adjacent Channel Interferens



En fyrkantig modulationspuls ger ett spektra som har kraftiga sidlobber. Effekten i sidlobberna kommer att störa intilliggande kanaler. Denna störning i grannkanalerna kallas ACI (Adjacent Channel Interferens).

MSK har lägre sidlobber än QPSK, men tyvärr är huvudloben 50 % bredare. Genom att filtrera datapulserna får man mjukt avrundade pulser som ger ännu mindre sidlobber i spektrat.

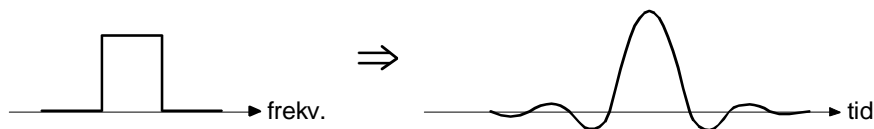
ISI Inter Symbol Interference



Kraftig filtrering för att minska spektrats sidlobber för tyvärr med sig att datapulserna sprids ut i tiden istället. Denna pulsbreddning (dispersion) medför att pulserna lämnar rester i efterföljande databit. Det ger en störning som kan orsaka feltolkning, dvs interferens mellan symbolerna (ISI).

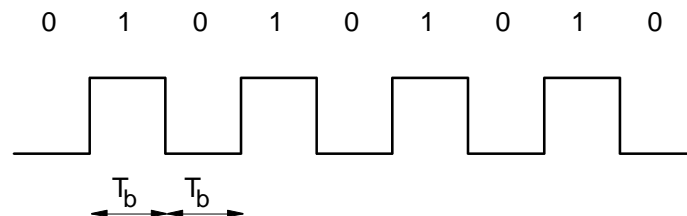
4. Filtrering

En fyrkantig filterkaraktäristik kan ta bort sidloberna helt, och släppa igenom huvudloben utan påverkan. Den filtrerade datapulsen får då ringning i början och slutet.

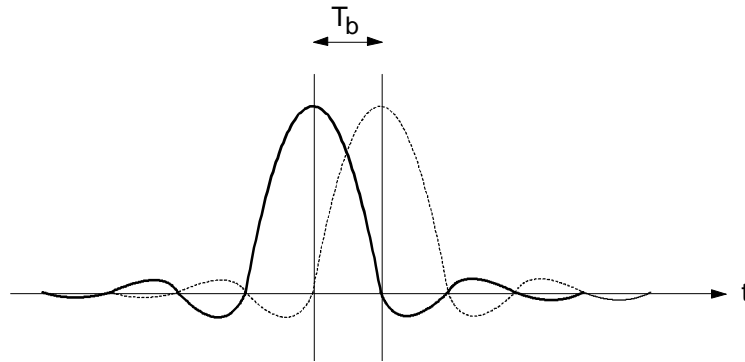


"Nykvist" filter

Filtret ska släppa igenom datasekvensen. Snabbaste variationerna får vi om varannan bit är 0 respektive 1.



Maximala frekvensen för fyrkantvågen är alltså $1/2T_b$. En filtrering med minsta möjliga bandbredd (B) kallas för "Nykvist" filtrering. Filtret har då $B \times T_b = 0,5$ dvs bandbredden är hälften så stor som datahastigheten.

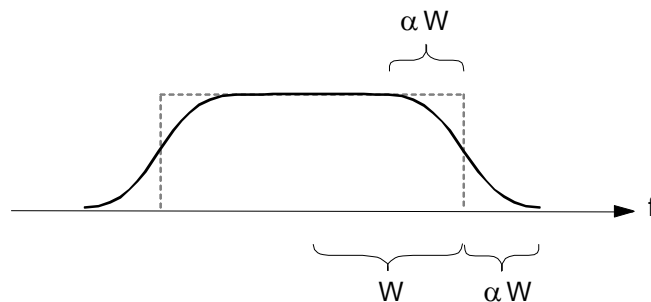


I mottagaren samplas (mäts) pulsens amplitud på toppen. Med Nykvist-filtrering sker samplingen då intelligande pulser svänger genom noll. Pulserna påverkar alltså inte varandra.

Om samplingen inte sker vid nollgenomgångarna kommer amplituden att påverkas av intelligande pulser, det blir då interferens (ISI).

"Raised Cosine" filter

I praktiken har filtret vissa filterflanker.



Lutningen på filtrets flanker (roll-off) anges med α . Den varierar mellan 0 och 1. Den totala bandbredden blir alltså större.

Om α är litet blir det kraftig ringning på pulsen. Det kan ge interferens i intilliggande datapulser (ISI). Ju mindre α är desto större blir amplitudens fluktuationer på utgången. Dessutom blir det allt svårare att tillverka filtret i praktiken.

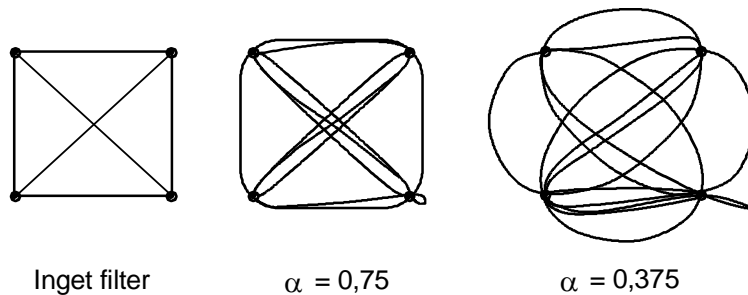
Större α ger mindre ringning på pulsen. Det blir då inte lika kritiskt med samplingstiderna i mottagaren. Men större α ger också större bandbredd på filtret. Det betyder att en större del av pulsens spektra kommer fram till sändarens utgång. Det stör grannkanalerna (ACI).

Med $\alpha = 0,5$ kan kanalavståndet vara 1,5 gånger bithastigheten utan risk för ACI.

Om α görs större än 0,6 förbättras sidloberna långt bort, men huvudloben och de närmaste sidloberna försämras.

Den önskade utsignalen har alltså spektra som beror på kombinationen av insignalens spektra och filtrets karakteristik.

Variationer i amplitud



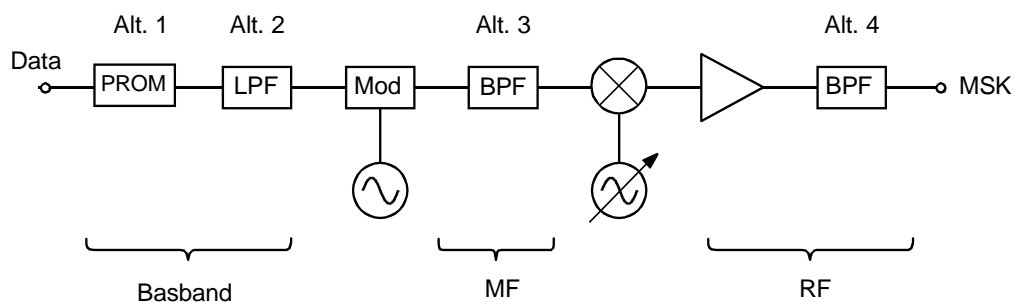
Utan filtrering hoppar utsignalen tvärt mellan de olika tillstånden. De snabba hoppen innebär oändlig bandbredd. När signalen filtreras blir inte hoppen så tvära längre, övergångarna rundas av. Vid mycket hård filtrering blir det kraftiga överslängar på pulserna.

Filtreringen påverkar också signalens maxeffekt. I övergångarna mellan tillstånden är uteffekten högre än i själva samplingspunkterna. Ju smalare bandbredd desto större översläng, dvs högre toppeffekt.

QPSK som Nykvistfiltreras med $\alpha = 0,2$ behöver ca 5 dB extra toppeffekt. Däremot påverkas inte FSK och MSK, dvs de modulationstyper som har konstant nivå ut.

Filtrets placering

Filtreringen av spektrat kan ske på HF, MF eller på basbandet.



På basbandet kan man använda digitala filter (Alt-2). Ett annat alternativ är att lagra filtrets impulsrespons i ett PROM (Alt-1). Korrigeringen med PROM ger en kurvform som motsvarande filter skulle ha gett. En förutsättning för filtrering på basbandet är att den efterföljande modulatorens linjäritet är tillräcklig.

Filtreringen på MF-nivå kan ske med SAW-filer (Alt-3). Det blir ett mycket litet och stabilt filter med önskad karakteristik. En förutsättning är att oscillatoren och filtret är tillräckligt stabila.

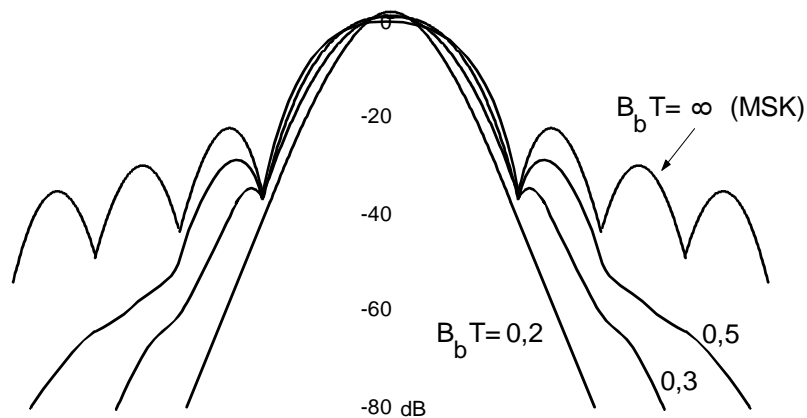
På RF-nivå (Alt-4) sker normalt inte någon spektralformning. Det filtret är främst till för att ta bort oönskade blandprodukter från modulatorens, blandarens och effektförstärkarens utgångar.

Naturligtvis sker det en filtrering i mottagaren också. Genom att filtrera bort brus och störningar får mottagaren högre känslighet, dvs kan detektera svagare signaler. Med linjär transmissionskanal får man störst signal/brus förhållande då sändar- och mottagarfiltren har samma amplitudkarakteristik.

Om den totala filtreringen ska vara "rised cosine" behöver alltså de båda filtren ha karakteristiken "kvadratroten av rised cosine". Används olinjära förstärkare får man välja en annan fördelning av totala filtreringen.

Gaussisk MSK GMSK

GMSK använder ett gaussiskt format lågpasfilter för att ta bort sidloberna i MSK spektrat. En fördel med Gaussiskt filter är att det inte ger upphov till ringning i tidsdomänen. Denna mjuka impulsrespons ger mycket liten ISI.



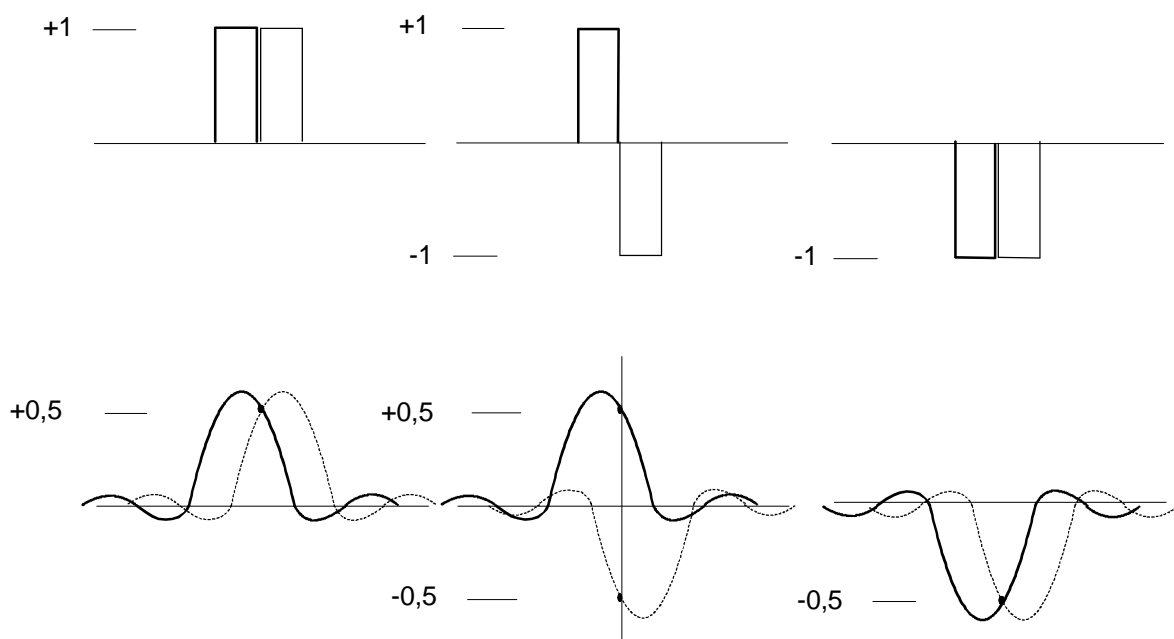
Ju mindre filtrets bandbredd är (i förhållande till datahastigheten), desto lägre nivå blir det i grannkanalerna. En hård filtrering ger upphov till ISI. Ju mindre bandbredd desto fler bitfel (BER). Men med $B \times T = 0,25$ har inte prestanda försämrats mer än 1 dB.

GMSK med $B \times T = 0,3$ används i mobiltelefonsystemet GSM.

Sladdlösa telefoner enligt DECT använder GMSK med $B \times T = 0,5$.

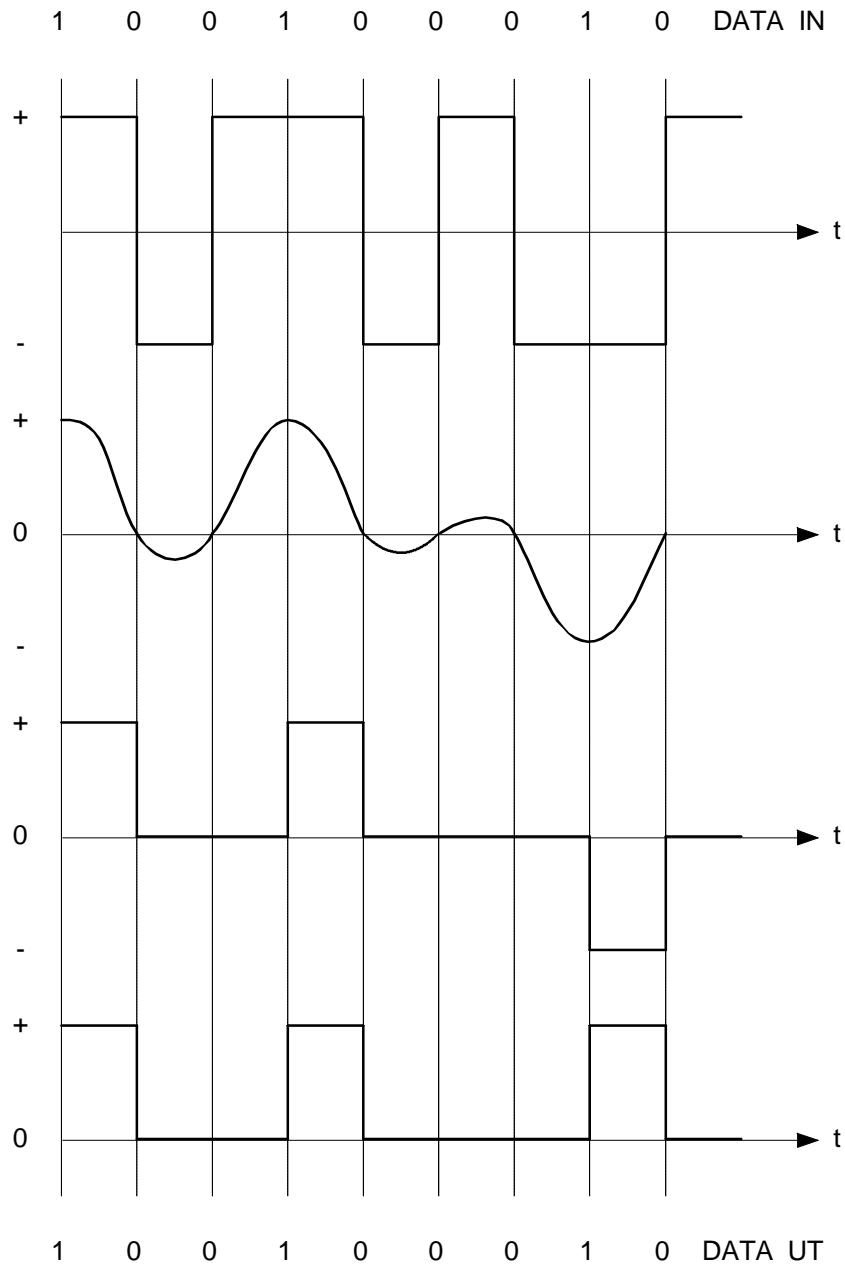
Partiell Respons

Partiell respons innebär att man överfiltrerar dataflödet för att kraftigt minska bandbredden. Basbandspulsen blir då bredare än en bit. Det ger större ISI, men genom att ta tillvara 3 amplitudnivåer, så kan databitarna sorteras upp i mottagaren.



Varje puls är så kraftigt filtrerad att den sprids ut över tre tidsintervall. Varje puls ger halva spänningen i två samplingspunkter. Två efterföljande positiva pulser ger tillsammans full spänning. Om efterföljande puls är av motsatt polaritet blir summan noll. Två negativa pulser ger full negativ spänning.

För att få en enkel detektor börjar man med att koda insignalen, så att för logisk-1 har pulsen samma polaritet som föregående puls, och logisk-0 ger motsatt polaritet.



I mottagaren demoduleras först signalen till 3 nivåer, $+V$, 0 respektive $-V$. Sen är det bara att ta bort tecknet för att få tillbaks dataflödet.

Motsvarande kodning kan göras för dataflöde i flera amplitudnivåer. Med t.ex. 4 nivåer in får man 7 nivåer ut.

Vid en given bandbredd kan man med partiell respons få plats med större mängd information. Informationstätheten blir för QPSK 2,0 - 2,2 bit/s/Hz istället för det normala 1,4 - 1,5

Nackdelen är att signalen blir uppdelad i flera amplitudnivåer. Det krävs alltså en linjär effektförstärkare och högre uteffekt. Det blir också en mer komplex kretskoppling och synkronisering.

Fördelen med partiell respons är att spektrat får en smal huvudlob. Dessutom får man snabbt avklingande sidlobber.

Partiell respons kallas det när basbandspulsen är längre än en bit. En sampling motsvarar då bara en del av datapulsen. Sträcker sig basbandspulsen bara över en bit, kallas den istället "full respons".

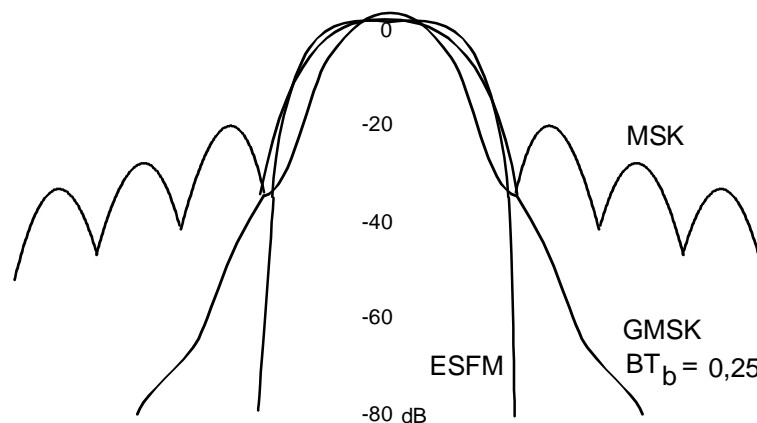
Andra namn är korrelativ kodning eller duo-binär kodning eftersom amplitudnivån bestäms av två efterföljande bitar. Förkortningen QPRS betyder Quadrature Partial Response Signalling.

5. Andra pulsformer

Nästan konstant amplitud

ESFM — Envelope Shaped Frequency Modulation

Konstant amplitud har den fördelen att man kan använda olinjära klass-C förstärkare. Det är bra om man behöver hög verkningsgrad för att spara på strömförbrukningen. Nackdelen är att spektrat får ganska höga sidlobor som stör grannkanalerna (ACI). Man kan få ett bättre spektra, med lägre sidlobor, om man istället kan tolerera lite amplitudvariation.



Om systemet arbetar på kort räckvidd med låg uteffekt, kan man använda en linjär förstärkare utan att påfresta strömförsörjningen. Behöver man mer effekt kan man linjärisera systemet genom att återkoppla effektförstärkaren tillbaka till modulatorens. Eftersom det är ganska små amplitudvariationer är linjäriteten inte speciellt kritisk.

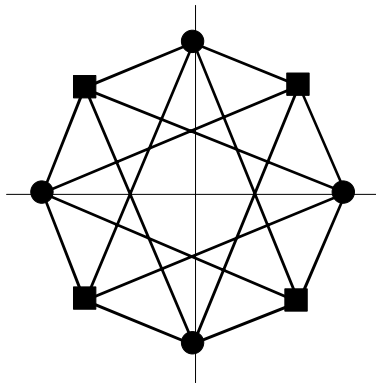
$\pi/4$ QPSK

QPSK innehåller fashoppen $\pm 90^\circ$ och $\pm 180^\circ$. Det största problemet är att 180° hoppet ger 100 % AM.

$\pi/4$ QPSK använder istället fashoppen $\pm 45^\circ$ och $\pm 135^\circ$. Det ger mycket mindre amplitudvariation.

OQPSK är begränsat till $\pm 90^\circ$ fashopp. Det ger också mycket litet amplitudripping. Med pulsformning kan man få konstant amplitud och små sidlobor i spektrat. Nackdelen är att man behöver en koherent detektor i mottagaren.

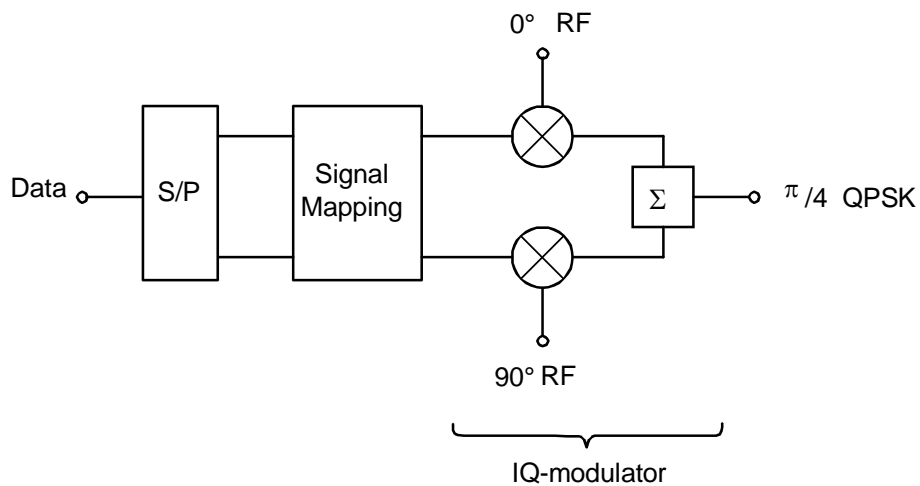
$\pi/4$ QPSK har ingen offset mellan de två dataflödena. Det gör att man kan använda en enklare limiter-diskriminator eller en differentiell detektor.



Konstellationen ser ut som två QPSK signaler som är fasvridna 45° ($\pi/4$ radianer). Den ena QPSK gruppen ritat med fyrkantiga tillstånd, och den andra ritat med runda tillstånd. Hoppet sker alltid från runda till fyrkantiga, respektive från fyrkantiga till runda.

Symbol	Fashopp
00	45°
01	135°
11	-135°
10	-45°

Varje symbol ger ett fashopp, även om dataflödet är detsamma.



$\pi/4$ QPSK använder serie/parallell uppdelning till en IQ-modulator. Till skillnad från OQPSK-modulatorerna är de parallella databitarna *inte* offset-förskjutna.

"Signal mapping" är en krets som ger de två I- och Q-kanalerna de rätta amplituderna för att uppnå ett av de 8 fastillstånden.

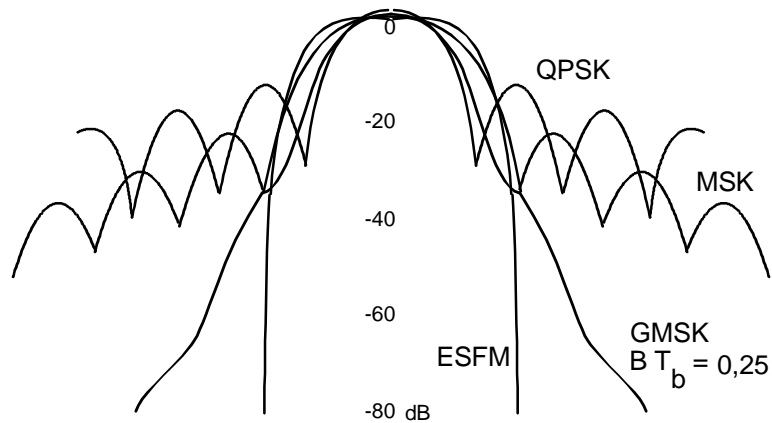
Fashoppen ger ett spektra med höga sidlober. För att minska störningarna i grannkanalerna (ACI) kan man filtrera eller pulsforma före IQ-modulatorn.

$\pi/4$ QPSK är den modulationstyp som har valts till mobiltelefon i USA och Japan.

Sammanställning av olika pulsformer

Om sidloberna behöver undertryckas ytterligare, kan man filtrera dataflödet efter andra kurvformer.

PSK	Fyrkantig modulation
MSK	Halv sinuskurva
SFSK	(Sinusoidal FSK) har avrundning även i början och slutet så att frekvensskiftet sker sinusformat
1 RC	Raised - cosine som sträcker sig över 1 databit (dvs samma som SFSK). Den kan även sträcka sig över flera databitar, 2 RC , 3 RC
TFM	Tamed-FM har en mjuk frekvensändring som sträcker sig över flera bitar. Det ger låga sidlober.
GMSK	Gaussisk MSK , dvs gaussiskt filtrerad datapuls. Med $BT=0,2$ får man en bandbredd ungefär som TFM.
ESFM	(Envelope Shaped Frequency Modulation) har en pulsform med amplitudrippel som ger mycket små sidlober i grannkanalerna.



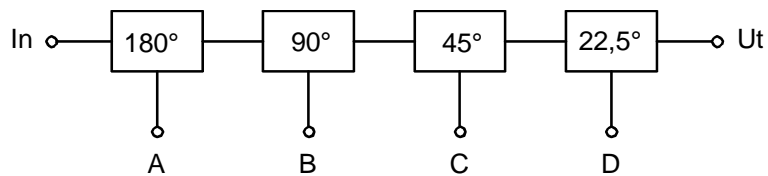
PRS "Partiell Response Signalling" har en filtrering som ger en frekvensändring som sträcker sig över flera databitar (t.ex. 2RC, TFM och GMSK). Det ger ett spektra med låga sidlober, men kräver en mer komplicerad mottagare.

I radiolänk och satellitsystem krävs en undertryckning av sidloberna på 30 - 40 dB. Mobilradio behöver 70 - 80 dB på grund av periodvis starkare störsignaler.

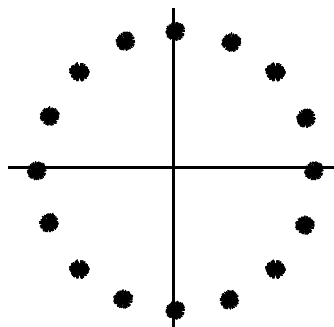
8 PSK och 16 PSK

Genom att utöka antalet faslägen får man plats med mer information.

	Antal tillstånd	Bitar / Symbol
BPSK	2	1
QPSK	4	2
8PSK	8	3
16PSK	16	4
MPSK	2^N	N

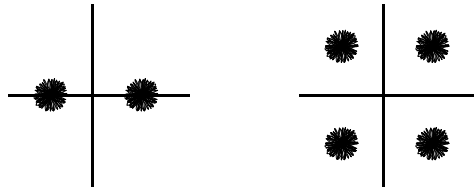


Med en digitalstyrd fasskiftare kan man få valfritt antal fasttillstånd.



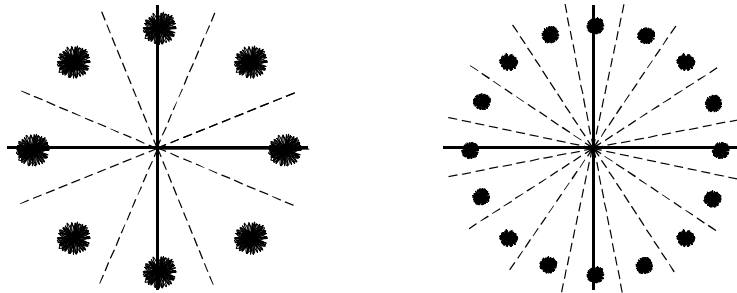
Fastolerans

När signalstyrkan är liten kommer bruset att påverka signalens amplitud och fas.



BPSK signalen tål ganska stora brusvariationer utan att resultera i datafel. Fasen har ett 180° område att variera inom.

QPSK signalen har bara 90° variationsområde innan det blir felindikering. Den behöver alltså större signal/brus förhållande.



Vid 8PSK ska signalen hålla sig inom ett 45° område, och 16PSK kräver ett så litet område som $22,5^\circ$. 16PSK behöver alltså ett ganska stort signal/brus förhållande för att få samma felsannolikhet.

De brusiga tillstånden får inte överlappa varandras områden för då blir det datafel. De ska helst ligga så långt från varandra som möjligt. Ett sätt är att öka signalstyrkan, dvs konstellationens radie. Då blir signal/brus förhållandet större. Men vid små signalstyrkor får man fördela tillstånden på ett lämpligare sätt, så att de brusiga tillstånden kommer längre ifrån varandra.

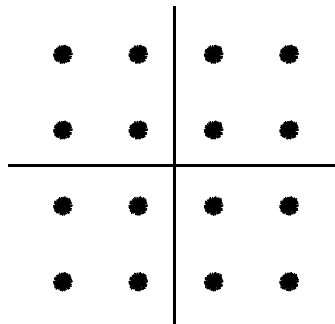
6. QAM

QAM — Quadrature Amplitude Modulation

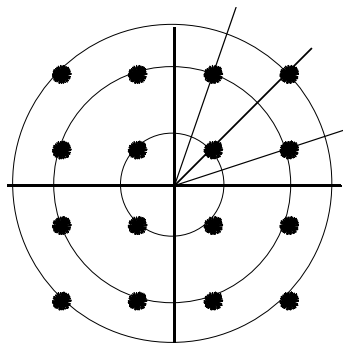
APK — Amplitude Phase Keying

QASK — Quadrature Amplitude Shift Keying

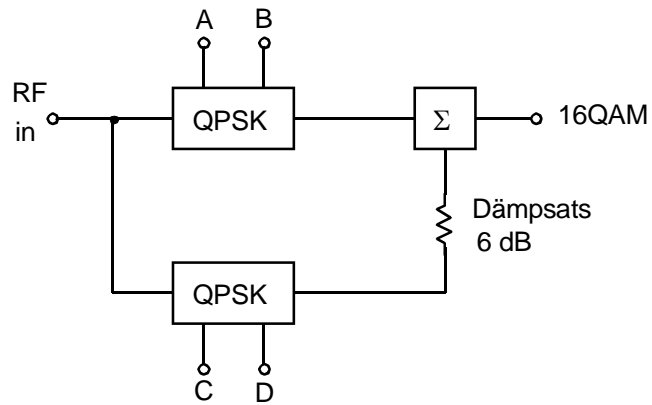
16 QAM



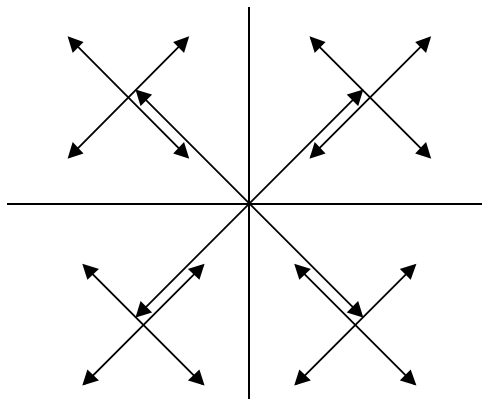
För samma toppamplitud ligger de brusiga tillstånden längre ifrån varandra med 16QAM än med 16PSK. Det betyder att 16QAM kan arbeta på lägre signal/brus förhållande. Dessutom blir medeleffekten mycket mindre.



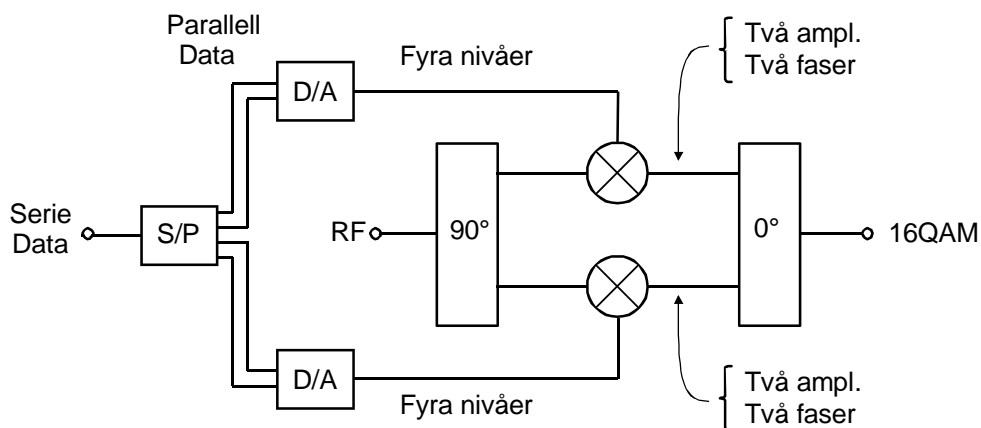
QAM är en kombination av QPSK och amplitudmodulering. 16QAM har 3 nivåer i amplitud och 12 faslägen. På det sättet blir de olika tillstånden jämnt fördelade över vektorplanet.



Modulatern för 16QAM kan bestå av två stycken QPSK-modulatorer. Den ena dämpas 6 dB och därefter adderas vektorerna.

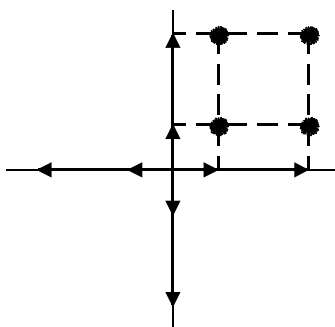


16QAM modulatoren kan alternativt bestå av en vektormodulator, med två amplitudnivåer åt varje håll.

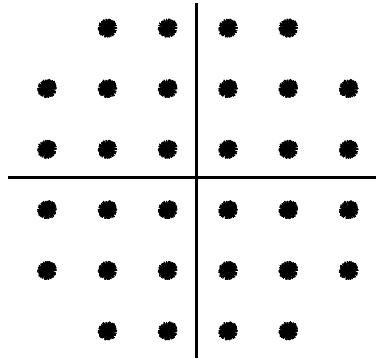


Serie/parallell omvandlaren ger 4 parallella bitar med en fjärdedels bithastighet. D/A omvandlaren ger 4 nivåer, två positiva och två negativa. Bifas-modulatoren ger två faslägen, 0° och 180° , med respektive två amplituder.

En summering av vektorerna ger 16 olika tillstånd.



32 QAM

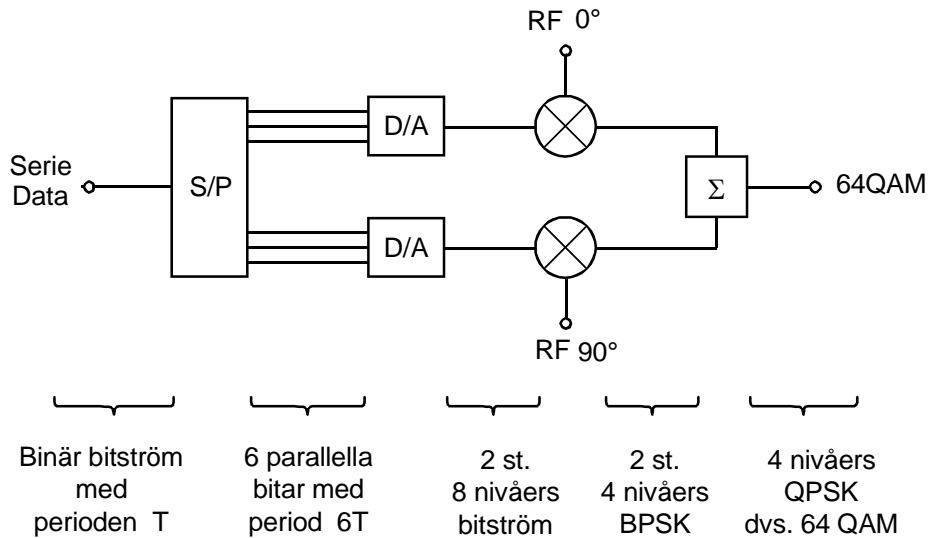


Vid 16 QAM definierades I- respektive Q-kanalen med två olika amplituder. Med tre olika nivåer blir det totalt 36 tillstånd. Men det blir för många tillstånd för binär delning. De fyra tillstånden i hörnen (med högsta amplituden) tas bort. Återstående 32 tillstånd kan definieras med 5 bitar.

Med 5 bitar per symbol blir datahastigheten bara en femtedel. Det motsvarar en smalare bandbredd.

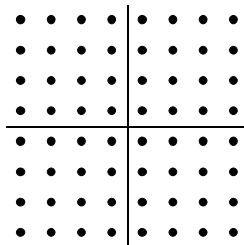
Analoga modem måste klara att överföra data på telefonförbindelsens 4 kHz bandbredd. V.32 modem tar 4 bitar rådata och adderar en femte bit för felkorrigering. Dessa 5 bitar modulerar sedan 32 QAM. Eftersom en symbol innehåller 4 bitar rådata, har bandbredden delats med fyra.

64 QAM

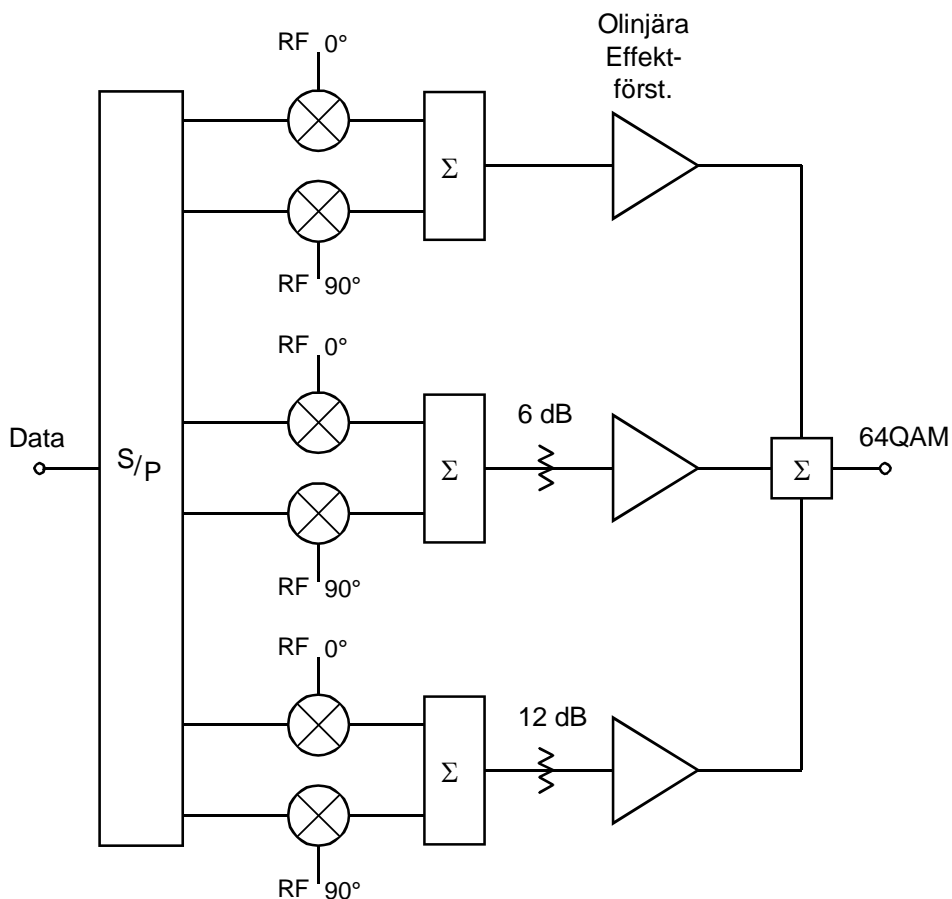


Bitströmmen delas upp med serie/parallell omvandlaren till 6 parallella trådar. De parallella bitarna delas upp i två paket som styr varsin D/A omvandlare med 3 bitar. Där omvandlas de till varsin 8 nivåers signal som styr bifas-modulatorerna med 4 nivåer positivt och 4 nivåer negativt. Det ger 4 nivåer 0° RF och 4 nivåer 180° RF från ena modulatorens. Den andra modulatorens ger 4 nivåer 90° RF och 4 nivåer 270° RF.

Slutresultatet efter summering är en QAM med 64 tillstånd i vektorplanet.



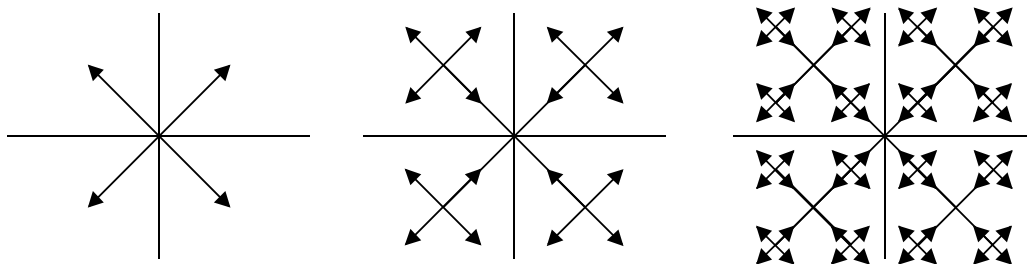
Genom att dela upp de tre amplitudnivåerna på tre olika förstärkare så kan förstärkarna arbeta på sin limiterade maximala effekt. Eftersom amplituden är konstant så ger den olinjära förstärkaren ingen AM/AM eller AM/PM distorsion.



Efter modulatorn och mättade förstärkare adderas de tre vektorerna med de rätta amplituderna. Dämpningarna ska alltså vara 0 dB, 6dB respektive 12 dB.

Dämpsatserna behöver kanske justeras för att kompensera förstärkarnas olika gain. De är ju drivna in i limitering i olika grad. Alternativt kan dämpsatserna placeras efter förstärkarna så att man får tre lika förstärkare. Fördelen med att dämpa före är att man kan använda förstärkare med lägre uteffekt. Det blir alltså tre Klass C förstärkare med hög verkningsgrad.

Genom att addera de tre signalerna får man tillsammans en uteffekt som är ca 5 dB högre än den starkaste förstärkaren. Nackdelen är att det behövs två extra förstärkare.



Jämförelse

64QAM är jämförbar med FM-radio både vad det gäller kanaltäthet och signal/brus förhållande. Vid 19 dB signal/brus förhållande blir felfrekvensen 10^{-6}

På mikrovåg används modulation av allt högre komplexitet. MHz-området har däremot utbredningsfenomen som begränsar modulationen till 2 eller 4 tillstånd, åtminstone max 8.

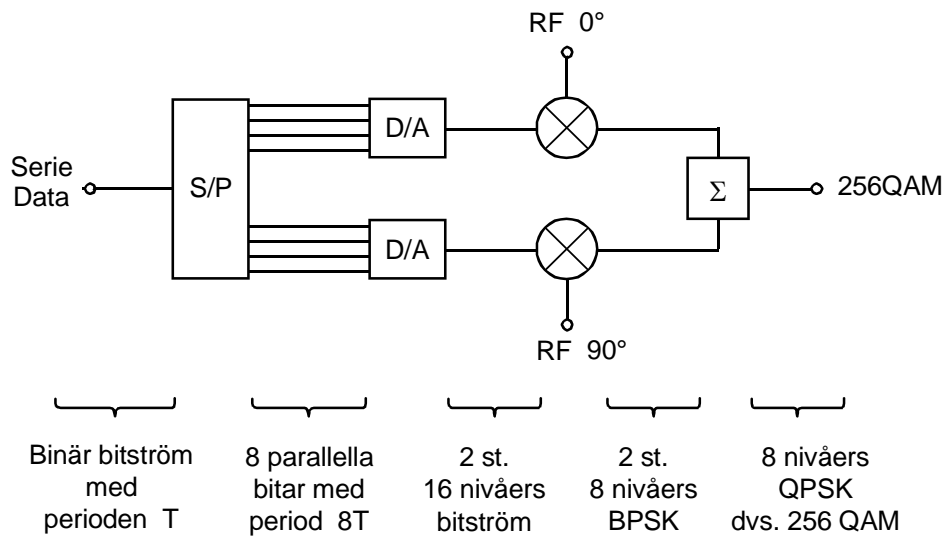
Liksom för QPSK får QAM höga sidlobber i spektrat. På motsvarande sätt som för MSK kan man forma modulationspulserna så att övergångarna blir mjuka. En MSK med flera amplitudnivåer kallas ofta MAMSK.

Man kan också ge pulserna sådan form att spektrat efter limitering har extremt små sidlobber. Den kallas SQAM (Superposed QAM). Eftersom signalen redan är limiterad kan man använda en olinjär mättad förstärkare.

Då kanalerna ligger tätt, eller då man annars behöver smalt spektra, ger SQAM färre fel än MAMSK. Det gäller speciellt då kanalen har fading.

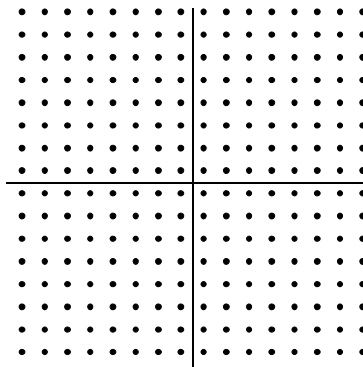
256 QAM

Det går att utöka antalet nivåer på vektormodulatore så att det blir 256 olika tillstånd i vektorplanet.



Med 256QAM får man extremt hög informationstäthet.

Nackdelen är att det krävs mycket stort signal/brus förhållande eftersom de olika tillstånden ligger så nära varandra.

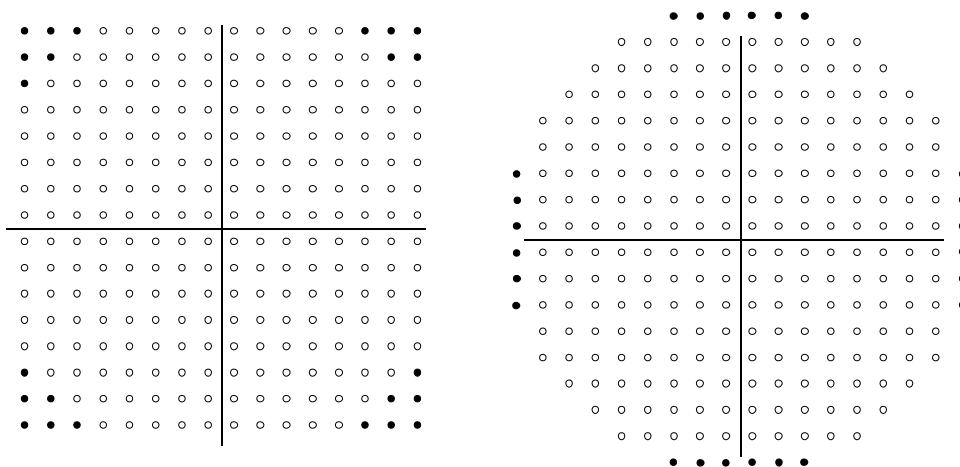


En annan nackdel är att sändarens effektförstärkare behöver ha högre linjäritet. Man får alltså dra ner på uteffekten ytterligare (back-off). Övergången från 16QAM till 64QAM innebär ca 9 dB större krav på dynamikområdet. Att gå över till 256QAM ger ytterligare ca 8 dB försämring när det gäller effektförstärkaren.

256QAM används då mycket stor informationsmängd ska överföras långa sträckor. Det sker då antingen med en fast radiolänk eller med en koaxialkabel. Förutsättningen är att man har en god kontroll på kanalen mellan stationerna.

256 SSQAM

256 Stepped Square QAM



Genom att flytta 24 av tillstånden från hörnen till sidorna, får man en lägre toppeffekt i förhållande till medeleffekten. Totalt vinner man 1,7 dB på den omgrupperingen.

Fördelningen kallas också Modified-QAM eller MQAM.

Triangulär fördelning

Triangular Shaped Signal Set , TSSS

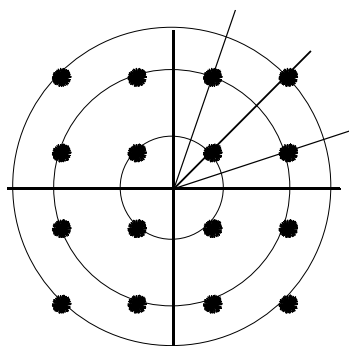
En fyrkantig (rätvinklig) fördelning av tillstånden innebär att bruspunkterna ligger olika långt ifrån varandra.



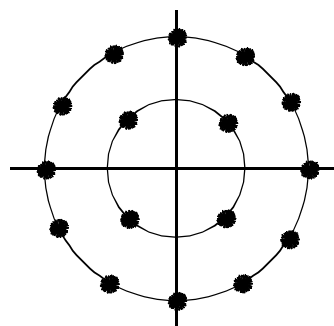
En triangulär fördelning ger lika avstånd mellan alla punkter. Det ger bättre utnyttjande av amplituden i konstellationen.

Med 256 tillstånd får man 2 dB bättre känslighet än med QAM. Det är en markant förbättring, men det är bara 0,3 dB bättre än SSQAM. Vanligtvis används rätvinklig fördelning eftersom det ger enklare kretskopplingar.

Cirkulär fördelning



Rektangulär
fördelning



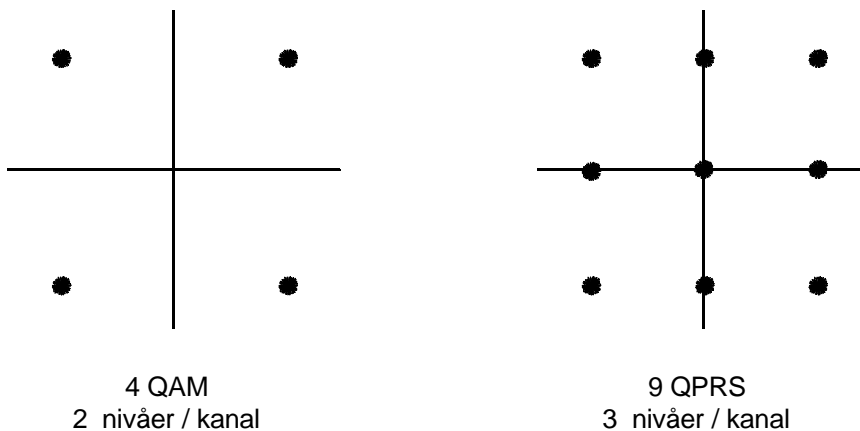
Cirkulär
fördelning

Genom att förlägga tillstånden efter ett cirkulärt mönster, blir variationerna i amplitud mindre. Det gör att den olinjära distorsionen blir mindre, dvs mindre AM-AM och AM-PM överföring. En nackdel är att tillstånden hamnar något närmare varandra. Det ger 0,76 dB sämre känslighet. Det är alltså en kompromiss mellan 16PSK och 16QAM.

QPRS

Quadrature Partial Response Signaling

QPRS är en QAM signal som har överfilterats för att ge "partiell respons".



4QAM (dvs QPSK) har två nivåer i vardera kanalen. Efter filtrering blir det 3 nivåer i varje kanal. Det ger totalt 9 tillstånd, därför kallas den 9QPRS.

16QAM har 4 nivåer i vardera kanalen. Det ger 7 nivåer per kanal efter filtrering. Med sammanlagt 49 tillstånd kallas den 49QPRS, eller ibland 16QPR.

Fördelen med QPRS är att bandbredden blir mindre, i praktiken ca 17 % mindre.

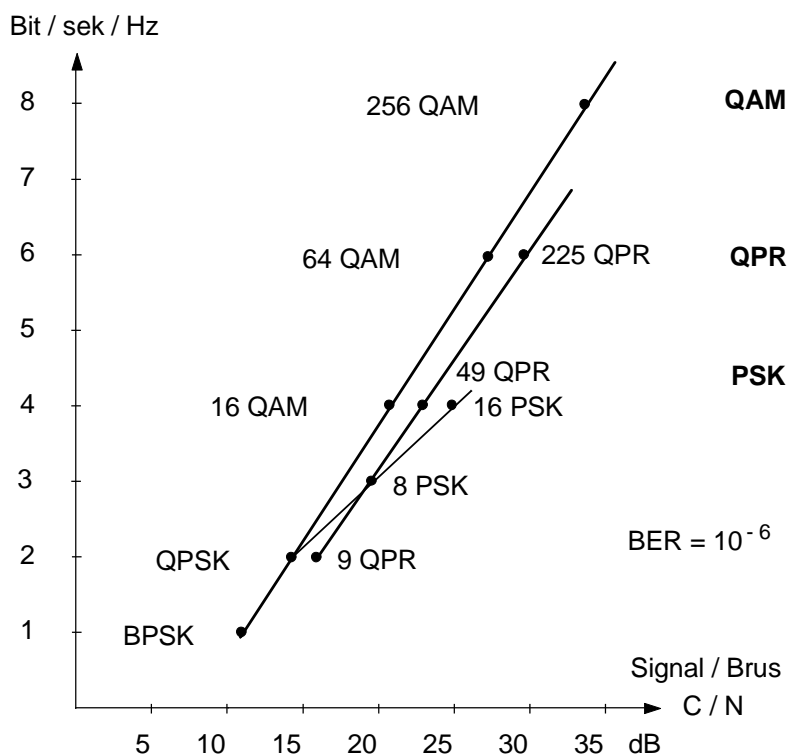
Nackdelen är sämre känslighet. Avståndet mellan tillstånden har ju halverats. Det blir inte så illa som 6 dB eftersom brusbandbredden har minskats. I praktiken blir QPRS ca 4 dB sämre än QAM.

Bandbredd - effekt indelning

Digitala kommunikationssystem kan indelas i två huvudgrupper beroende på om det är bandbredden eller effekten som är viktigast.

Spectral efficiency

Används då stor informationsmängd ska överföras där frekvensområdet är begränsat. Med komplex modulation får man plats med 2 - 7 bit/s/Hz (bitar per sekund per Hz RF-bandbredd). Det kräver också att signal/brus förhållandet är stort.



Figuren visar hur stort signal/brus förhållande som behövs för att få så liten felfrekvens (BER = Bit Error Rate) som 10^{-6}

Vid datatrafik krävs ofta ett signal/brus förhållande som ger felfrekvensen 10^{-6} eller 10^{-7} . Taltrafik kan fungera på så stort BER som 10^{-3} , men helst 10^{-4} . BER på 10^{-4} får man vid lägre signal/brus förhållande. Kurvorna blir då förskjutna ca 2 dB åt vänster. BER på 10^{-8} får man om man förskjuter kurvorna ca 1,3 dB mot högre signal/brus förhållande.

Vanligen är man bara intresserad av BER ner till 10^{-6} eftersom det är lätt att därifrån förbättra BER till 10^{-12} med felrättande koder och equalizer.

Man kan se i figuren att det får plats ytterligare en databit för varje fördubbling av antalet tillstånd. I praktiken blir dataflödet lite mindre.

Modulation	bit/s/Hz
QPSK	1,2 - 2
9 QPRS	2,0 - 2,8
8 PSK	2,5 - 3
16 QAM	2,5 - 3,5
64 QAM	4,5 - 5
256 QAM	5 - 7
512 QAM	7,5
1024QAM	8,5

Stort signal/brus förhållande kräver hög uteffekt och låga förluster i transmissionen. "Spectral Efficiency" används till mikrovågslänkar och kabelsystem.

	Bithast.	Bandbredd		
	Mb/s	20 MHz	30 MHz	40MHz
Europa	34	4 PSK	4 PSK	4 PSK
	68	16 QAM	8 PSK	4 PSK
	140	256 QAM	64 QAM	16 QAM
	280		1024 QAM	256 QAM
USA	45	(FCC kräver minst 78 Mb/s)		
	90	64 QAM	16 QAM	8 PSK
	135	256 QAM	64 QAM	16 QAM
	180	1024 QAM	256 QAM	64 QAM
	270		1024 QAM	256 QAM

Power Efficiency

För att nå långt med begränsad effekt måste mottagaren kunna arbeta på små signal/brus förhållanden. Det begränsar datamängden till < 2 bit/s/Hz.

Uteffekten bör ligga konstant på förstärkarens maximala mätnadsnivå.

De modulationerna används till satellitsystem och digital mobilradio.

$\pi/4$ QPSK har 0,7 dB sämre känslighet än QPSK.

Signal/brus förhållande

Signal/brus förhållandet specificeras på två sätt.

C / N	$C =$ bärvägens medeleffekt $N =$ brusets medeleffekt	
E_b / N_o	$E_b =$ medelenergin under en bit $N_o =$ bruseffektens spektralitet	$(C \cdot T_b)$ $(B = 1 \text{ Hz})$

$$E_b = C \cdot T_b = C / f_b$$

$$N_o = N / B_n$$

Signal/brus förhållandet E_b/N_o är alltså normerat till bitfrekvensen och brusbandbredden. Den kan användas för att jämföra olika modem. Om C/N ska anges måste samtidigt den totala brusbandbredden specificeras.

För $BER = 10^{-6}$ blir de olika signal/brus förhållandena ca:

	E_b / N_o	C/N	Bandbredd
BPSK	10,5	10,8	B
QPSK	10,5	13,8	B/2
16 QAM	14,5	20,9	B/4
64 QAM	18,8	27,2	B/6
256 QAM	22,5	33,3	B/8
8PSK	14	19,1	B/3
FSK	13,4	13,4	B
9QPR	13,5	16,5	B/2
49QPR	17,5	23,5	B/4

C / N används för "Spectrum Efficient" modem. I det här fallet konkurrerar systemen med datahastighet och bandbredd.

E_b / N_o används för "Power Efficient" modem. När känslighet och räckvidd är det viktigaste, är det bättre att använda en metod att ange känsligheten som ger ett bättre värde.

7. Sammanfattning

Hög känslighet

100% AM	Konstant amplitud	Nästan konstant amplitud
BPSK	MSK	ESFM
QPSK	GMSK QPRS	$\pi/4$ QPSK

Hög känslighet ger lång räckvidd

1. Satellitsystem
2. Mobiltelefon

Stor informationsmängd

PSK QAM QPR

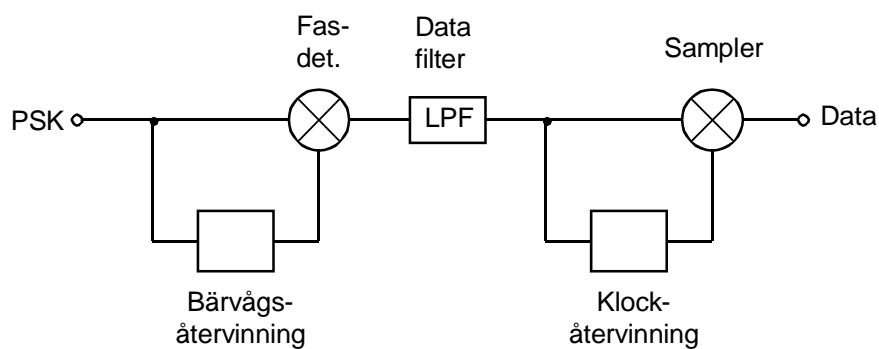
Hög modulationsgrad kräver stort dynamikområde

1. Mikrovågslänkar
2. Koaxialburna system

PSK & QAM mottagare

1. Inledning

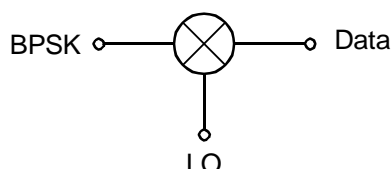
PSK demodulering



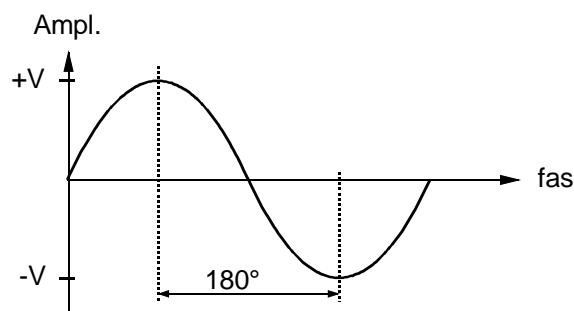
Demodulering av fashoppen sker med en fasdetektor. Den undertryckta bärvågen måste återskapas för att användas som fasreferens. Dessutom måste klockfrekvensen återskapas för att data ska mätas vid rätt tidpunkt. Sen tillkommer ett datafilter och eventuellt en equalizer som kompenserar fasdistorsionen i vågutbredningen.

Differentiell fasdemodulering ger enklare kretskoppling eftersom den fördröjda insignalen kan användas som referens.

PSK demodulering med fasdetektor



Den dubbelbalanserade mixern, som användes som modulator, kan också användas som demodulator. Den interna referensen (LO) ställs in till samma frekvens som sändaren. Kretskopplingen fungerar då som en fasdetektor. Kretsen kan också kallas synkron-detektor.



Referensens fas ställs in till max amplitud ut. När sedan inkommande signal hoppar 180° i fas, dvs BPSK, så hoppar utsignalen mellan $+V$ och $-V$. Om referensen hade legat 90° fel i fas så hade utsignalen hoppat mellan $0V$ och $0V$, det blir alltså ingen demodulering.

Problemet med demodulatoren är att hålla LO på rätt frekvens och med rätt fas. Sändaren driver i frekvens, och vågutbredningen ger ett dopplerskift. LO behöver därför låsa till den inkommande bärvågen. Men moduleringen har skett med undertryckt bärvåg, eftersom dataflödet normalt inte har någon DC-komponent. Det gäller alltså att på något sätt återgenerera bärvågen från inkommande signal.

2. Regenerering av bärvåg med dubblare

BPSK

När man dubblar frekvensen på en signal så dubblas också fasen.

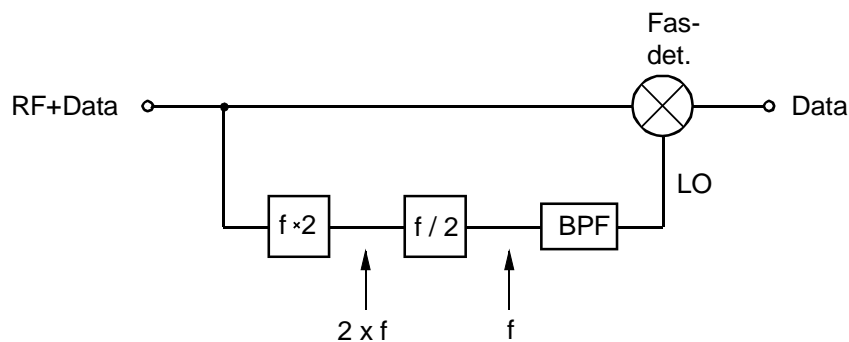
$$\sin 2(\omega t + \Phi) = \sin (2\omega t + 2\Phi)$$

Om BPSK signalens frekvens dubblas får man faslägena 0° och 360°

f	0°	180°	Hoppar i fas	BPSK
$2 \cdot f$	0°	$360^\circ = 0^\circ$	Samma fasläge	Bärvåg

Den dubbla frekvensen har alltså konstant fas. Man har blivit av med moduleringen och fått en kontinuerlig bärvåg.

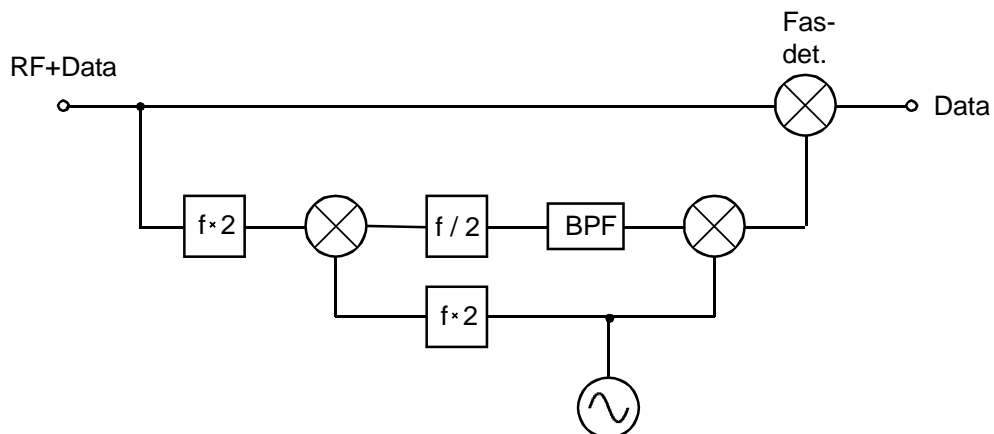
Tyvärr ligger den på dubbla frekvensen. Med en frekvensdelare kommer man till rätt frekvens, så att man kan demodulera signalen.



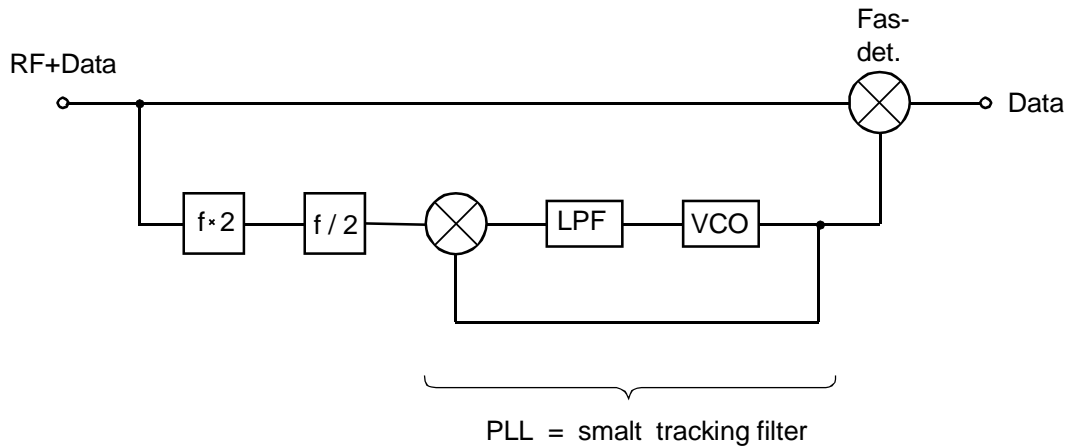
Den inkommande signalen är ofta svag och brusrik. Det kan till och med finnas andra störande signaler. Med ett smalt bandpassfilter får man en renare och stabilare referens. Filtret minskar jittret så att man får mindre ISI (Inter Symbol Interferens)

Frekvensdubblingen är en kvadratisk olinjäritet. Den fungerar alltså som en kvadratisk detektor. Med ett lågpasfilter kan man filtrera fram DC-termen. Den används som ett mått på signalstyrkan eller till AGC.

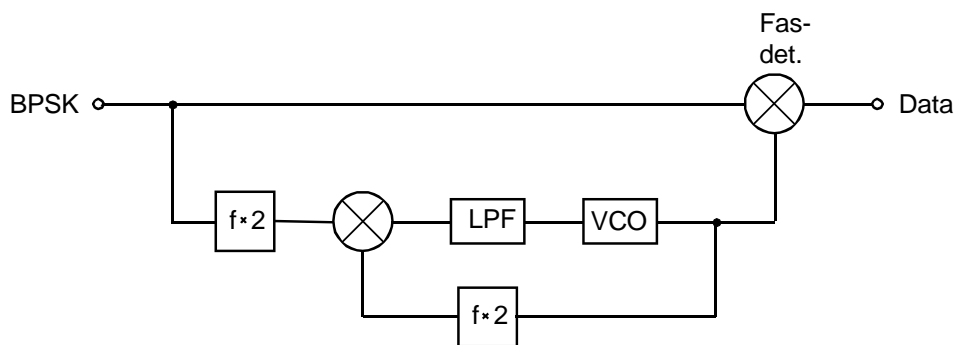
Frekvensdubbling får man lätt i alla olinjära kretsar. Det är svårare att få en frekvensdelare att fungera på de höga mikrovågsfrekvenserna.



Med en hjälposcillator kan man blanda ner sig till lämpligt frekvensområde, där det finns digitala frekvensdelare.



Istället för ett bandpassfilter kan man använda en faslåst slinga (Phase Locked Loop). Utsignalen kommer från en oscillator som är låst till bärvågen. Om bärvågen ändras så följer oscillatoren efter. En PLL fungerar alltså som ett följande filter (Tracking Filter). Det är lågpasfilteret som bestämmer hur mycket signalen blir filtrerad. Det är lätt att göra ett lågpasfilter med låg gränshäns. Man får då ett mycket smalt trackingfilter, som ger mycket litet jitter. Nackdelen är att det ger längre inställningstid. Det är alltså inget för en mycket snabb burst-kommunikation.

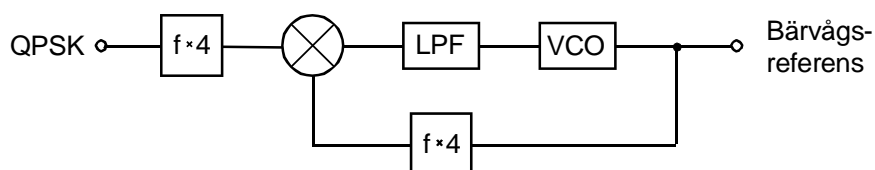


Fasjämförelsen i PLL kan lika gärna ske på dubbla frekvensen. Visserligen måste man använda en frekvensdubblare på oscillatoren också, men man slipper den mycket besvärligare frekvensdelaren.

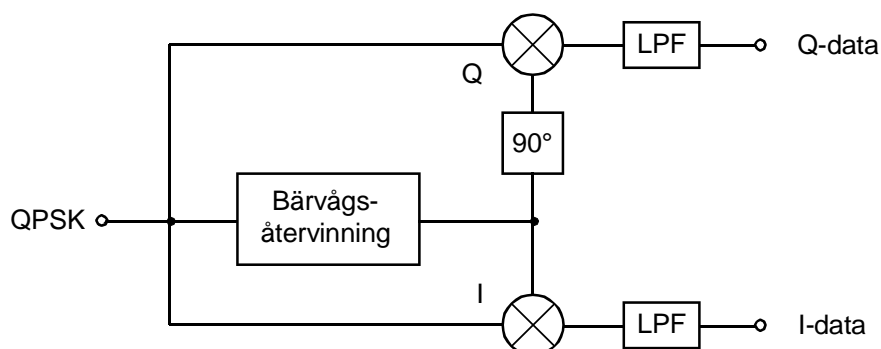
QPSK

f	0°	90°	180°	270°	Hoppar 90°	QPSK
2·f	0°	180°	360° = 0°	540° = 180°	Hoppar 180°	BPSK
4·f	0°	360° = 0°	0°	360° = 0°	Samma fas	Bärvåg

En QPSK signal har fyra faslägen. Efter en dubbling har man fortfarande hopp i fasen. Det krävs ytterligare en dubbling för att bli av med fashoppen.



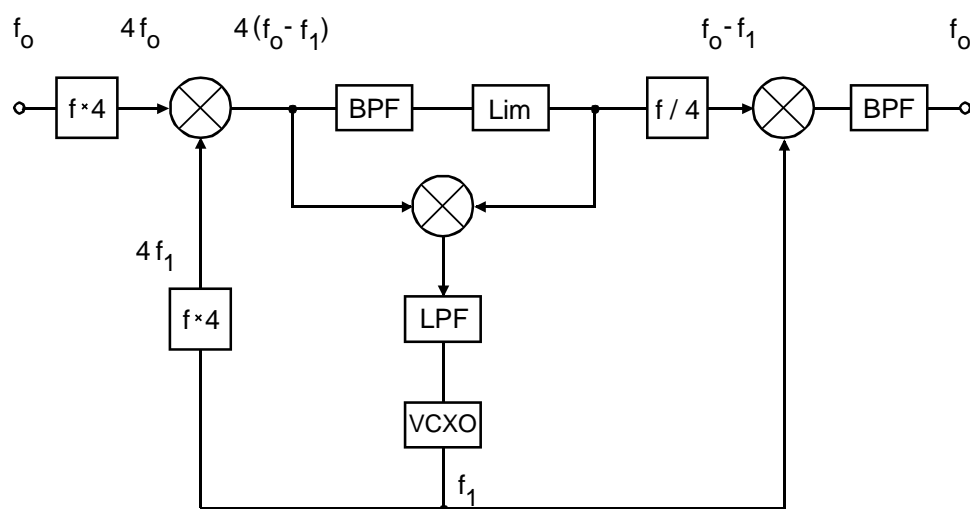
Efter en fyrdubbling av frekvensen har man fått en ren bärvåg, fast på fel frekvens. PLL används både som frekvensdelare ($f/4$) och trackingfilter.



Bärvågsreferensen används till att demodulera dataflödet i både I- och Q-kanalen.

Låsning av frekvensen

Då sändningen sker med mycket korta intervaller (burst), t.ex. vid tidsmultiplex (TDMA), blir PLL för långsam. Man kan då använda ett trackingfilter som är frekvenslåst istället för faslåst.



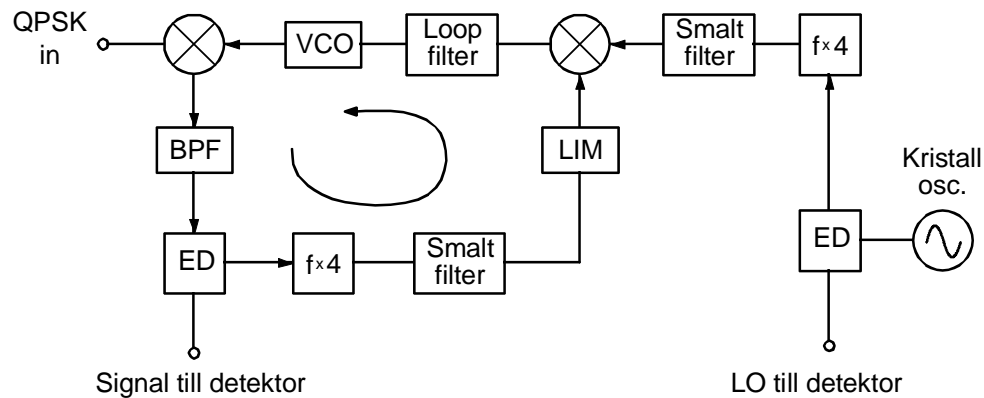
Signalen fyrdubblas för att bli av med fashoppen från QPSK. Därefter blandas bärvågen till en MF. För att komma tillbaka till rätt frekvens igen, behöver frekvensen delas med fyra och sedan blandas med samma LO en gång till.

Ett bandpassfilter har en viss faskång som funktion av frekvensen. En fasedetektor känner av denna fasskillnad mellan filtrets in- och utgång. Kombinationen blir en frekvensdiskriminator.

Diskriminatorns utgång styr sedan en oscillator som korrigerar insignalen så att den centreras mitt i filtrets passband. En PLL är ett filter som följer signalen. Den här kretsen är ett fast filter där istället frekvensen varieras. En PLL är faslåst, den här kretsen är frekvenslåst.

Högre känslighet

Insignalen behöver filtreras med ett så smalt filter som möjligt. Ju mer störningar och brus som kan filtreras bort före demodulatorens, desto högre känslighet får mottagaren.

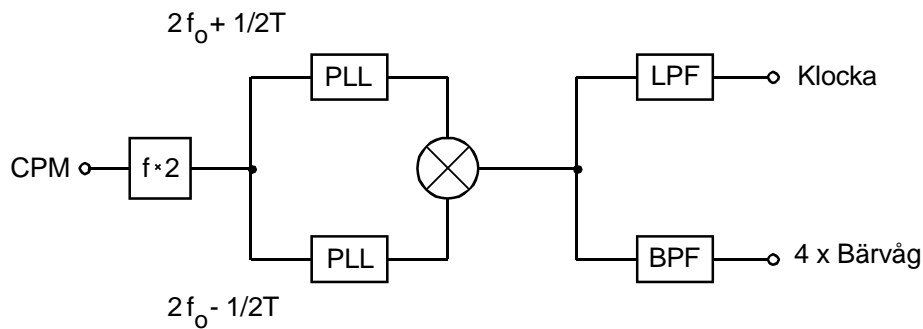


Insignalen blandas till en MF som sen fyrdubblas för att bli av med informationen. Den signalen jämförs sen med en fyrdubblad kristalloscillator i en fasdetektor. Detektorns likspänning styr en VCO så att MF-signalens frekvens låser till kristalloscillatören.

Oavsett insignalens dopplerförskjutning så ligger MF-signalen på samma frekvens som kristalloscillatören. Filtret i MF-kanalen kan alltså väljas så smalt som datahastigheten även om dopplerfrekvensen är mycket stor. Doppler kan ge en förskjutning av frekvensen så stor som 400 kHz vid satellitmottagning.

MSK

BPSK får en kraftig spektrallinje vid dubbla frekvensen som kan användas till återvinning av bärvågen. QPSK, MSK och andra CPM-format får efter dubblingen frekvenserna $2f_0 + 1/2T$ och $2f_0 - 1/2T$. Däremot finns det ingen spektrallinje vid $2f_0$

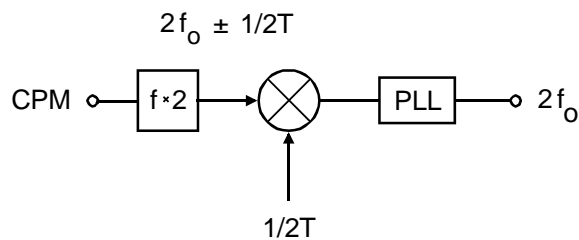


De två frekvenserna filtreras fram med varsin PLL. Mixern ger de två frekvenserna:

$$(2f_0 + 1/2T) + (2f_0 - 1/2T) = 4f_0$$

$$(2f_0 + 1/2T) - (2f_0 - 1/2T) = 1/T$$

De blandprodukterna kan man använda till återvinning av bärvågen respektive regenerering av klockfrekvensen.



Ett annat alternativ är att addera klockfrekvensen $1/2T$ efter dubblaren. Det ger frekvensen $2f_0$ som filtreras fram med PLL.

QPSK och många CPM format kan också fyrdubbla för att få fram bärvågen. Det går tyvärr inte med MSK.

QAM

QAM signaler ger en diskret spektrallinje vid 4:e övertonen, precis som QPSK. Men QAM innehåller också en variation från dataflödet. Denna slumpmässiga variation ger ett kontinuerligt spektra runt $4f_0$.

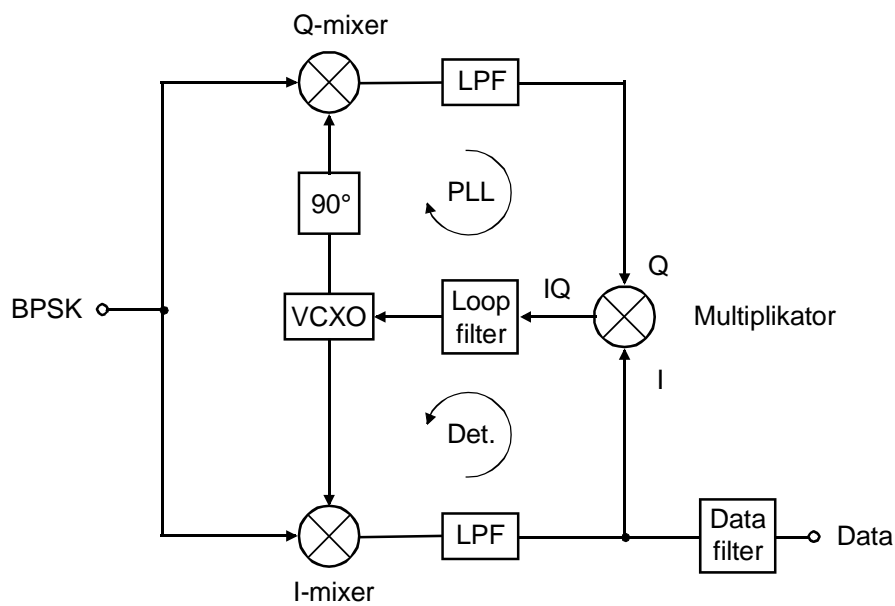
PLL ska följa $4f_0$ men filtrera bort störningarna runt omkring. För att få lågt fasjitter behöver filtret vara extremt smalbandigt.

För 256QAM måste fasfelet vara mindre än $0,5^\circ$ för att förlusterna ska hålla sig inom 0,5 dB. Ett fasfel på $1,5^\circ$ ger hela 3 dB sämre känslighet.

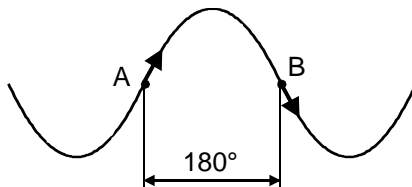
Mottagarna använder därför bärvågsgenerering med beslutsstyrd återkoppling i en "Costas Loop".

3. Regenerering av bärvåg med Costas Loop

Costas Loop för BPSK



En BPSK demodulator med Costas Loop består av tre blandare. En mixer (Q) används som fasdetektor för att hålla LO signalen i fas med insignalen. En annan mixer används till själva demoduleringen av dataflödet. Costas loop ger alltså både bärvågsåtervinning och synkron detektering.



Den faslåsta slingan kan låsa till punkt A eller B. Om den låser till A så ökar fespänningen positivt då fasen ökar. Oscillatorn är då kopplad så att dess fas minskar. Kretsen blir alltså stabiliserad till punkt A.

Dataflödet gör att fasen hoppar 180° . I punkt B blir fespänningen istället negativ och korrigerar oscillatorn åt fel håll, så att den tappar låsningen.

I-kanalen, som ger demodulerad data, hoppar $\pm V_{\max}$. Denna ändring i polariteten används för att vända polariteten på fespänningen i PLL kretsen.

Den tredje mixern är en multiplikator, som används för att kombinera datakanalens fashopp med fespänningen.

Loopfiltret ger en ren och stabil LO till demoduleringen. Ett mycket smalt filter ger mycket litet jitter. Men om den får för lång inställningstid så hinner den inte följa inkommande signalen. Loopfiltret är ett lågpas filter som ska släppa igenom bärvågens variationer, både sändarens instabilitet och en eventuell doppler-förskjutning. Den måste också hinna följa FM variationerna som alstras av snabb fading. Det kan vara allt från några Hz i promenadtakt upp till 100 Hz för snabba bilar (120 km/tim och vid 1 GHz). Loopfiltret ger alltså en kompromiss mellan inställningstid och faszitter, eller mellan statisk respektive snabbt fäddad kanal.

I- och Q-kanalens lågpas filter ska släppa igenom informationsbandet. Genom att ta bort Q-kanalens lågpasfilter kan man få ett större infångningsområde för frekvensen, större än loopfrekvensen. Tyvärr blir det på bekostnad av försämrat jitter.

Med ett smalt filter får man lågt rippel. Demodulatore kan då arbeta på lågt signal/brus förhållande. Dessutom blir det mindre störningar från grannkanalerna (ACI). Men filtret får inte bli för smalt så att signalen distorderas. Den minsta brusbandbredden får man med ett matchat filter. Filtret är då anpassat till vågformen, eller den del av vågformen som är svagast. Det blir ett komplicerat filter som blir känsligt för distorsion på signalen. Passiva enkla standardfilter (Butterworth eller Chebyshev) ger ofta bättre resultat i praktiken.

90° fasskiftaren är till för att Q-kanalen ska arbeta i nollgenomgången, samtidigt som I-kanalen arbetar på max amplitud. Den är kopplad till Q-slingan eller I-slingan beroende på vilken typ av mixer man använder.

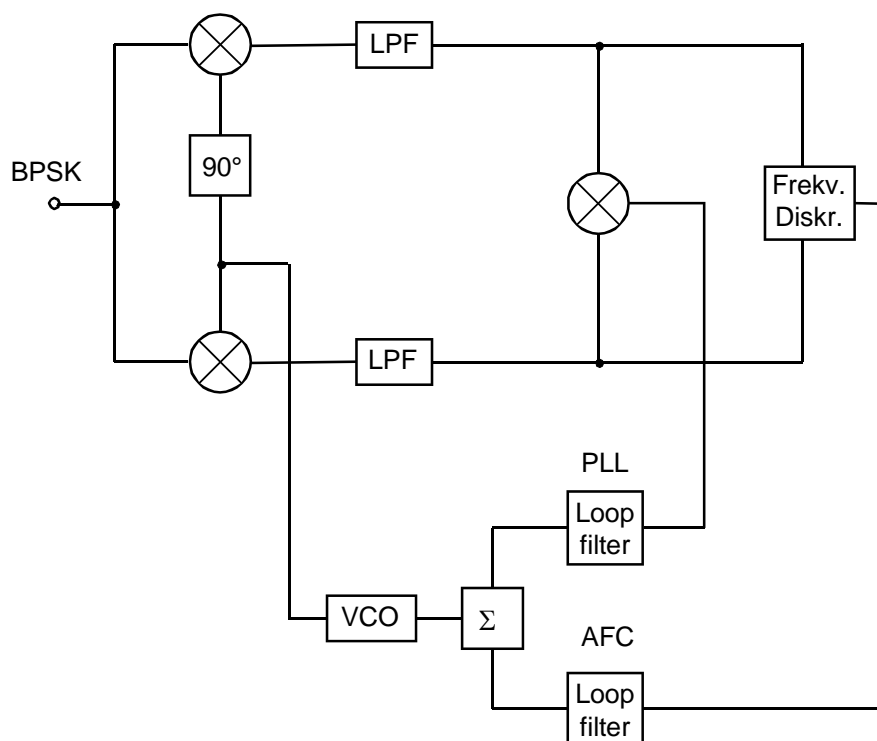
Squaring Loss

Squaring Loss är ett mått på hur mycket signal/brus förhållandet försämras av slingan. Försämringen beror på distorsion från $\text{signal} \cdot \text{brus}$ och $\text{brus} \cdot \text{brus}$.

Ett system som inte är kodat arbetar på ett signal/brus förhållande som är större än 10 dB. I praktiken räcker det då med ett 2-poligt Butterworth-filter i slingan. Squaring Loss blir då ett par dB.

AFC

Loopfiltret i demodulatorns PLL är mycket smalt för att hålla jittret nere. Det ger tyvärr ett ganska litet infångningsområde. För att kunna hitta frekvensen måste demodulatorn ha ett stort infångningsområde. Man behöver alltså både liten och stor bandbredd. Det kan man få genom att switcha olika filter, eller genom att addera en svepspänning till oscillatoren under sökningen.

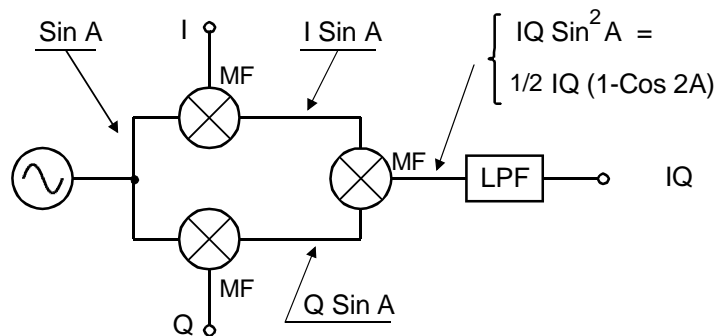


Ett annat sätt är att använda en AFC (automatisk frekvens kontroll) parallellt med PLL. Det går också att modifiera en fasdetektor så att den fungerar som både fas- och frekvensdetektor (PFD).

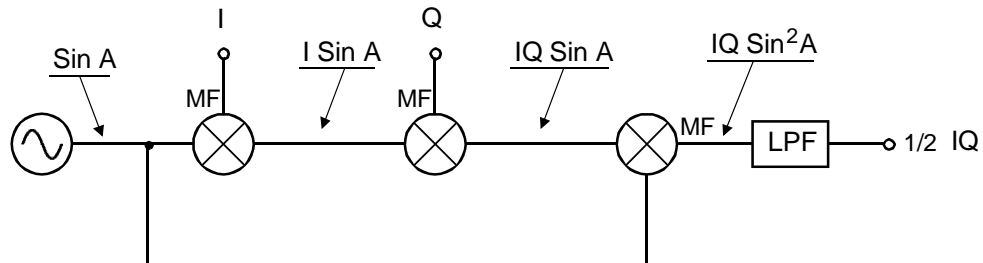
Tri-mixer

Om dataflödet kan innehålla en serie nollor eller ettor under en längre tid, så måste multiplikatorn vara DC-kopplad. Om datahastigheten dessutom ska vara stor så måste multiplikatorn vara mycket bredbandig, kanske flera GHz.

En dubbelbalanserad blandare har en DC-kopplad MF-ingång. Men multiplikatorn i Costas Loop behöver DC-koppling på alla tre ingångarna. En analog multiplikator eller en switchad inverterande OP-förstärkare kan användas. Nackdelen är den mycket begränsade bandbredden, samt stor offset. En tri-mixer är en lite mer komplicerad krets som har mycket stor bandbredd och alla tre portarna DC-kopplade.



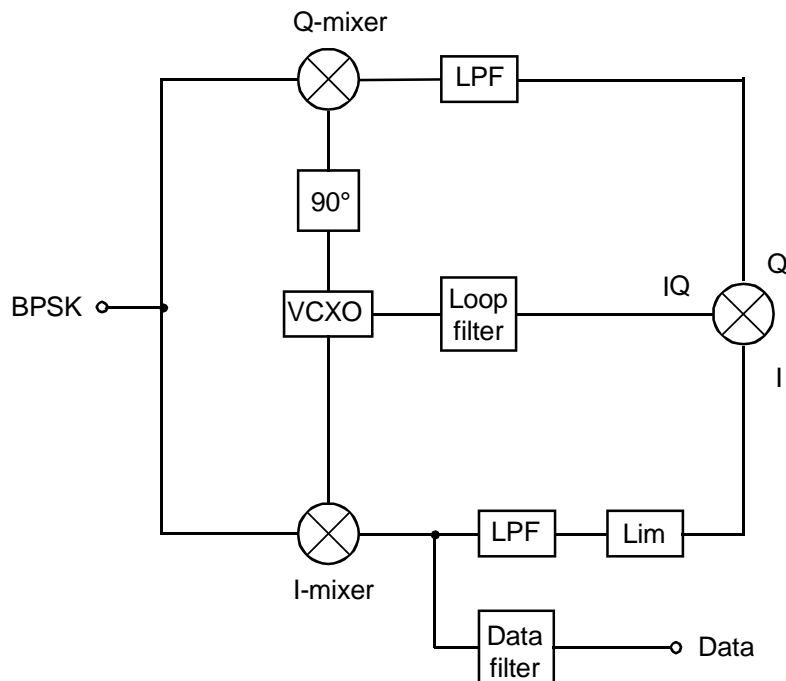
Två dubbelbalanserade blandare används till ingångarna och den tredje till utgången. Varje DBM har ju en DC-kopplad MF-port. Den interna kopplingen sker med hjälp av en extra oscillator. Hjälpfrekvensen bör vara minst dubbelt så stor som I och Q signalerna. Dataflödena moduleras först på hjälpfrekvensen. De två modulerade signalerna multipliceras sen och den önskade signalen IQ filtreras fram.



Ett annat sätt att koppla en tri-mixer är att seriekoppla ingångsblandarna. De kan betraktas som två spänningsstyrda dämpsatser. Blandaren på utgången kan betraktas som en synkron-detektor.

En tri-mixer kan täcka ett frekvensområde från DC till flera GHz. Den kan användas i Costas Loop för demulering av PSK data. Datahastigheten kan då bli flera Gbit/sek.

Polarity Loop

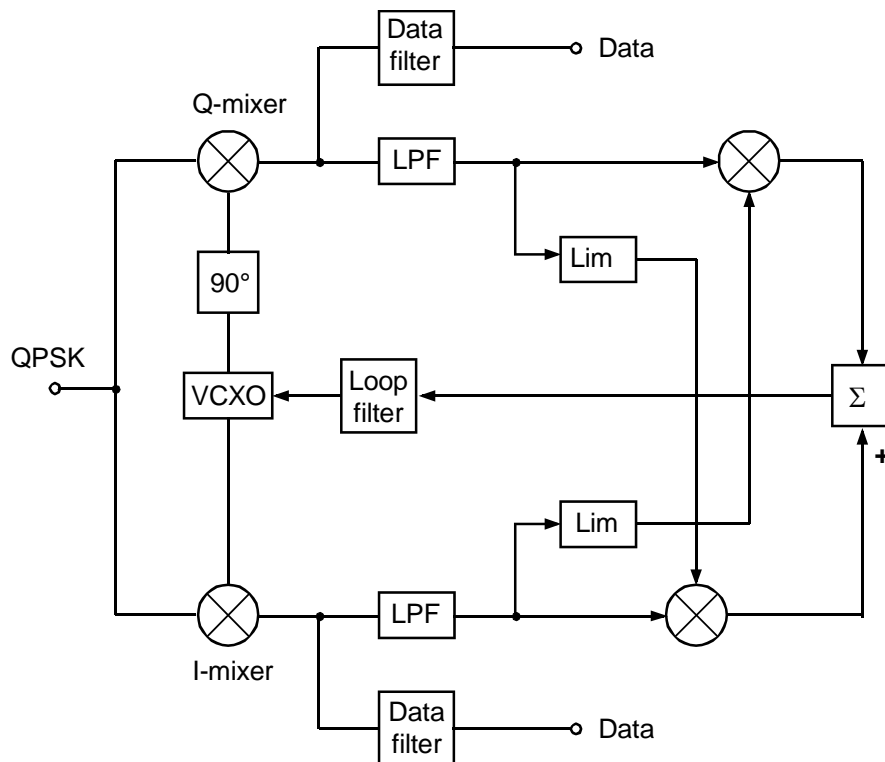


Ett system som inte är kodat, dvs arbetar på ett signal/brus förhållande större än 10 dB, kan ha en hårdlimiterad I-kanal. Utsignalen visar då inte amplituden utan endast polariteten. Denna polaritet ska sen switcha polariteten på felspänningen i PLL-slingan. Man behöver då ingen analog fyrkvadrant multiplikator med dess DC-drift.

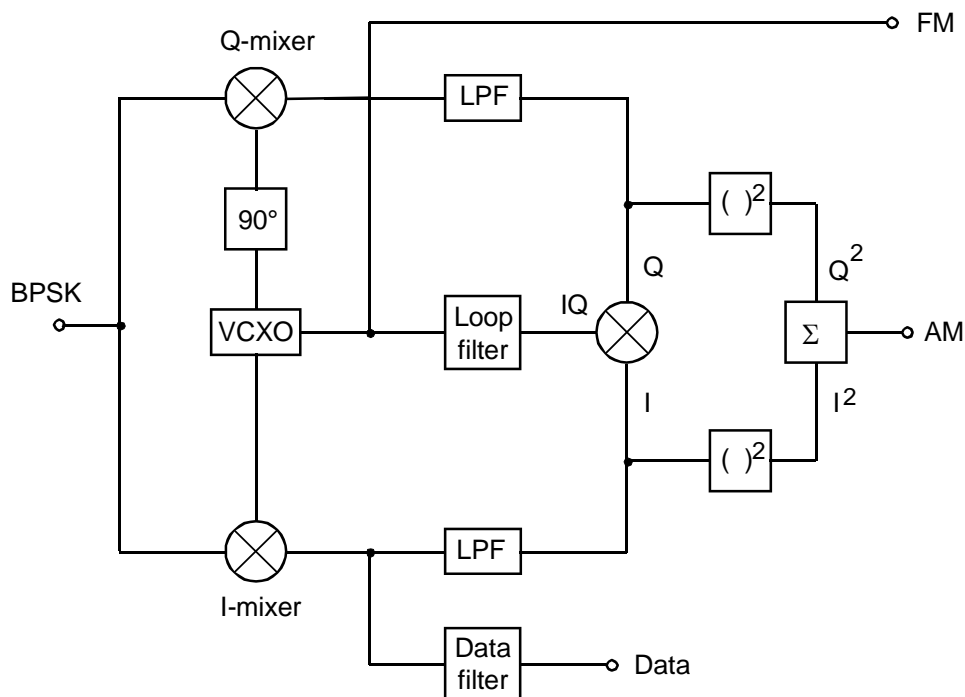
Eftersom signal/brus förhållandet är stort kommer dessutom en limiter att undertrycka de svagare störsignalerna. Squaring Loss kan då förbättras ca 0,5 dB.

Costas Loop för QPSK

Vid QPSK kommer både I- och Q-kanalen att innehålla bifasmodulering. Båda kanalerna behöver därför polaritetsvändas före summeringen.



Costas Loop med information om frekvens och amplitud



Costas Loop innehåller redan en spänning (styrspänningen till VCO) som följer insignalens frekvensvariation.

Amplituden på insignalen får man inte lika lätt. Insignalen är uppdelad i de vinkelräta vektorerna I och Q. Med Pythagoras sats får man insignalens amplitud som summan av kvadraterna.

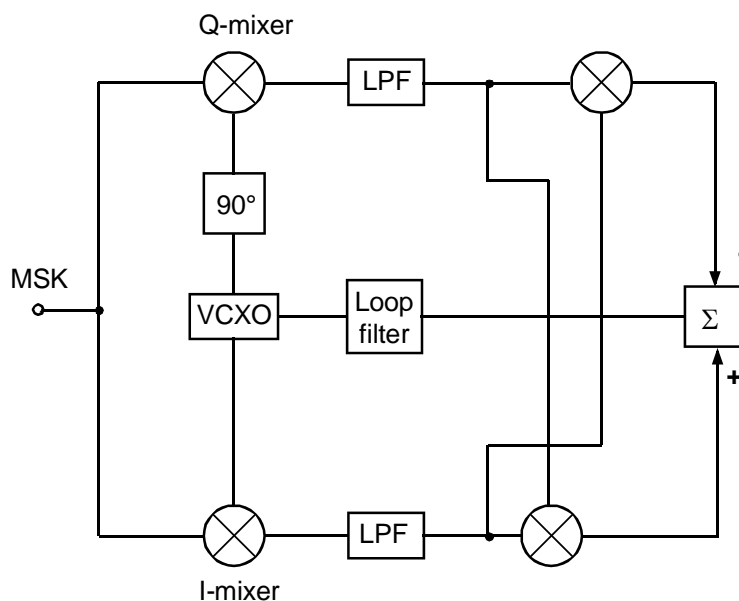
$$I^2 + Q^2 = V^2$$

Spänningen i kvadrat är ett mått på effekten. Den låpassfilterade styrsignalen används till AGC eller effektövervakning.

Costas Loop för MSK

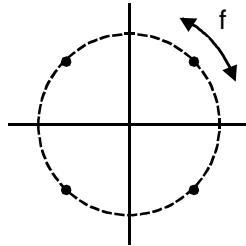
Costas Loop som används till BPSK kan också användas till MSK. Men MSK är en form av FSK. Slingan kommer därför att låsa till en av dess två frekvenser istället för till bärvågen. Bättre prestanda får man om man kan låsa till inkommande centerfrekvens.

Genom att addera frekvensen $1/2T$ hamnar man mitt mellan MSK signalens frekvenser. Det ger en låsning till centerfrekvensen, men det kräver att vi har en klockregenerering i bärvågsåtervinningens slinga.

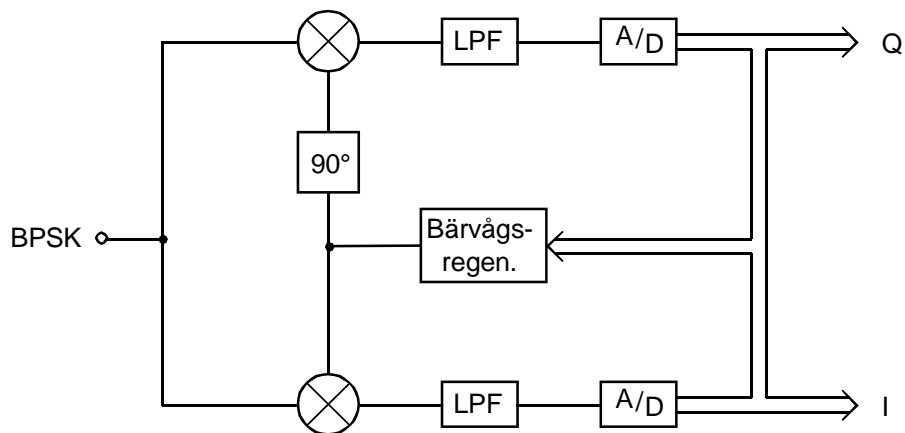


MSK är en filtrerad QPSK. Det går alltså att använda en QPSK Costas Loop för att få rätt bärvåg som referens. Det blir en mer komplicerad demodulator, men man behöver ingen klockgenerator för bärvågsåtervinningen.

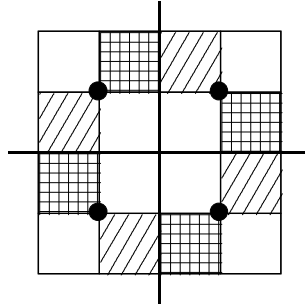
Beslutsstyrd faslåsning



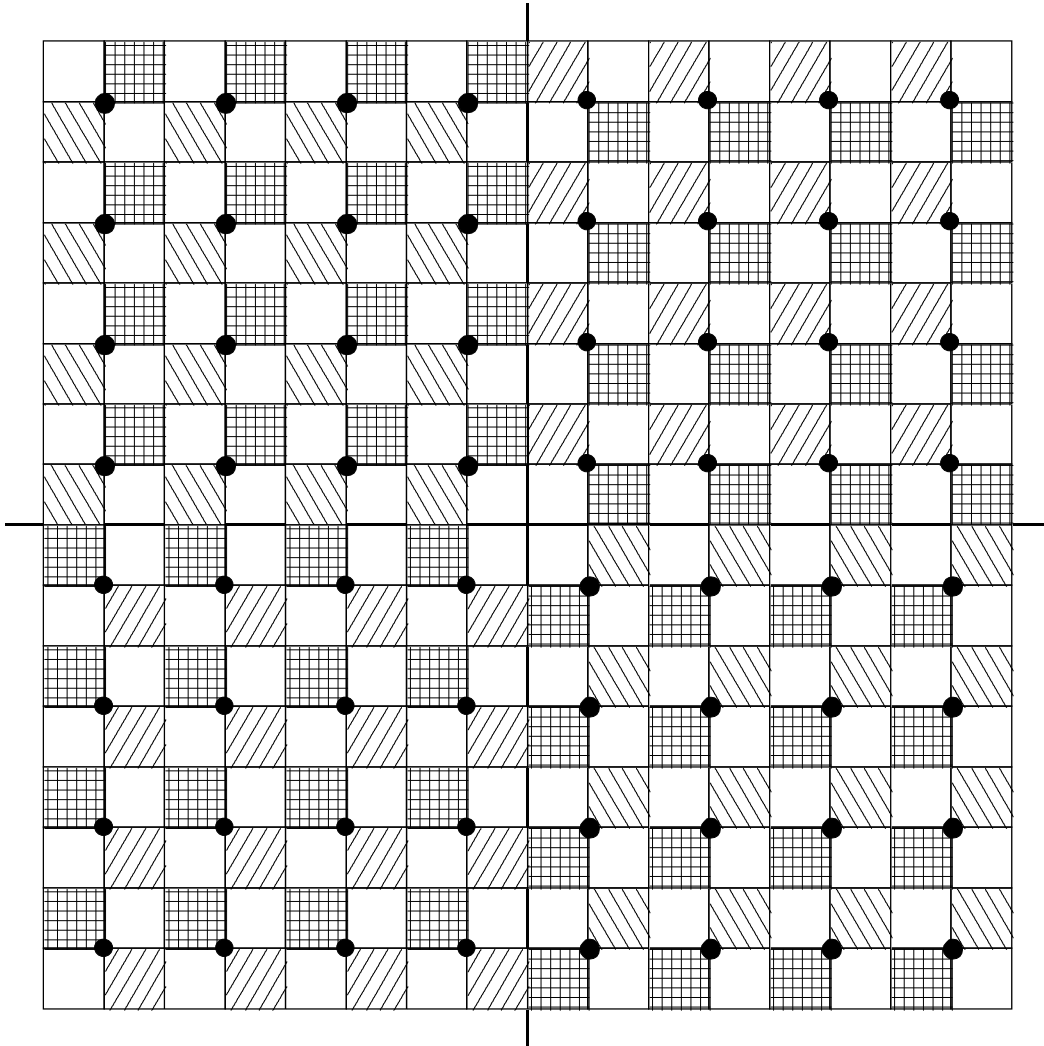
QPSK kan beskrivas med sitt konstellationsdiagram. När fasen mellan insignal och referens ändras så vrids hela konstellationen åt ena eller andra hållet.



I en beslutsstyrd faslåsning är slingorna delvis digitala. Den digitala utsignalen har i det här fallet högre upplösning (flera bitar) än vad som behövs för att beskriva de olika tillstånden i dataflödet.



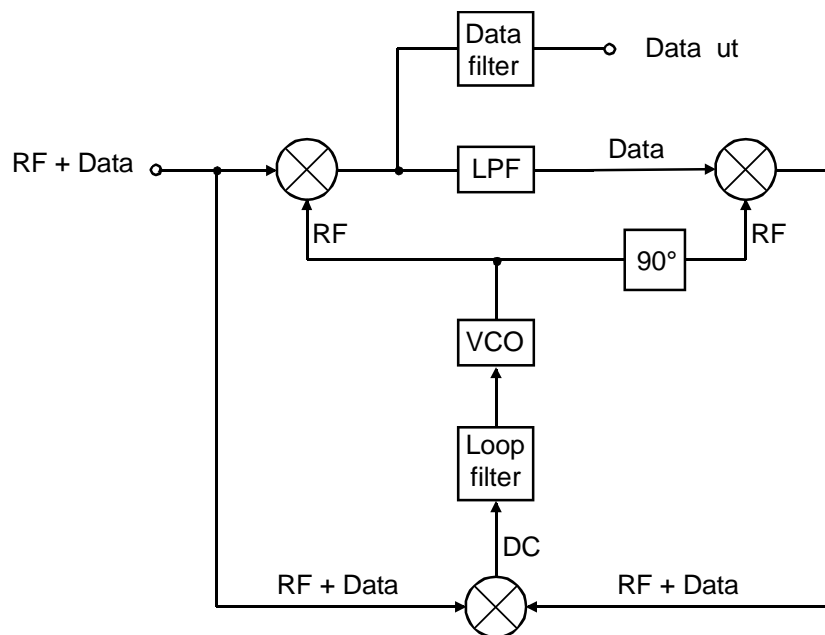
Om signalen hamnar i det streckade området måste fasen på referensen justeras för att få signalen på plats igen. Hamnar signalen inom området som har rutnmönster justeras fasen istället åt andra hållet. Koordinaterna för denna rutindelning finns lagrad i ett minne i bärvågs-regeneratorn. För varje databit bildas alltså en felpuls, positiv eller negativ beroende på fasfelet. Denna pulsserie lågpasfiltreras för att sen styra en VCO. Funktionen motsvarar alltså den i en PLL.



Regenerering av bärvåg med beslutsstyrd faslåsning kan också användas till modulationerna med större informationsmängd, t.ex. 64QAM. Det spelar ingen roll vilket av tillstånden som sänds, antingen vrids konstellationen till ett rutigt eller ett streckat område. Det blir en pulsserie med felspänningar oavsett var de kommer ifrån.

Remodulator

Liksom för Costas Loop blir bärvågen återskapad med en faslåst slinga (PLL). Slingan innehåller här både en modulering och en demodulering

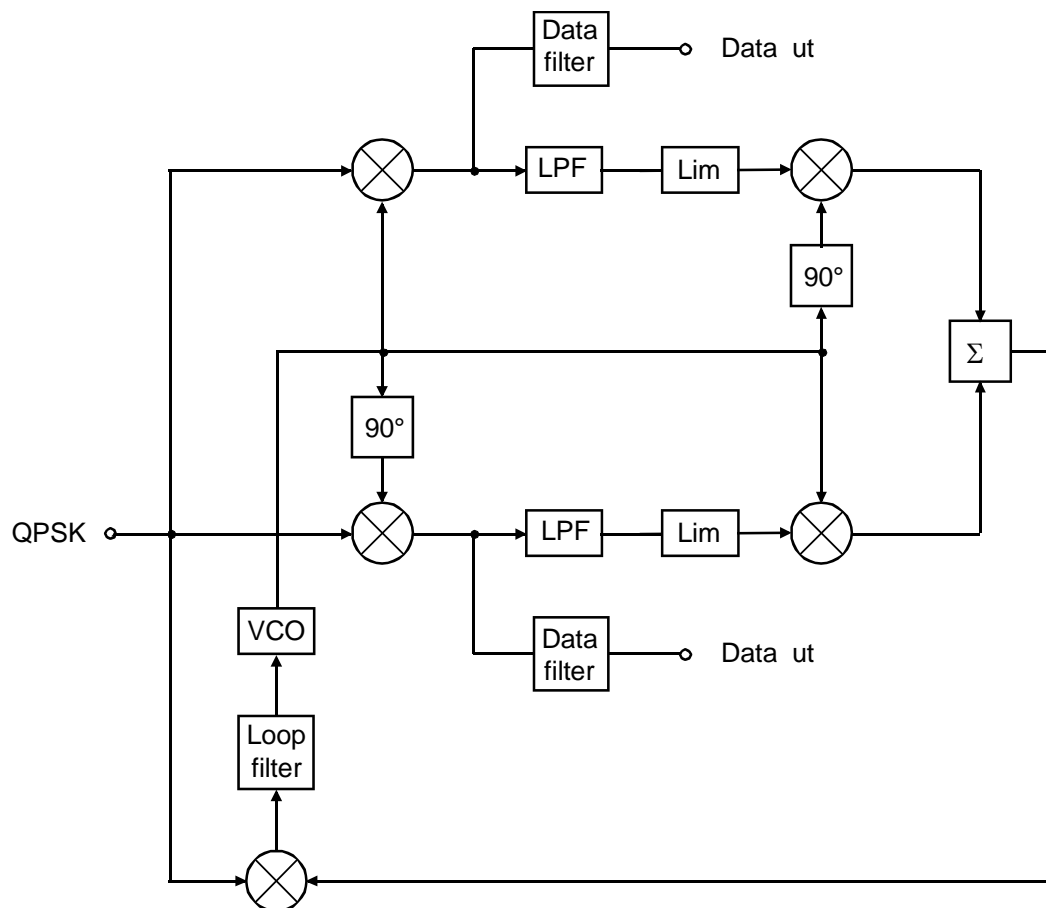


Insignalen demoduleras i första mixern med hjälp av den genererade bärvågen. Därefter modulerar dataflödet en bärvåg som är 90° fasförskjuten. Denna modulerade signal jämförs med den inkommande modulerade signalen i den undre mixern. Två lika signaler blandas och skillnadsfrekvensen blir en DC-spänning. Eftersom den genererade signalen är fasförskjuten 90° hamnar fasdetektorns utsignal på själva nollgenomgången. Om insignalen driver i fas bildas istället en fespänning som justerar oscillatorn (VCO). Bärvågsgeneratorn blir alltså låst till insignalen.

Man kan sätta in en limiter i datakanalen på samma sätt som för en polarity-loop. Ibland görs remoduleringen på mycket låg MF-frekvens. Det blir då billigare med EXOR-gate som mixer och OP-amp som fasskiftare.

Vid stora signal/brus förhållanden blir fasdetektorns fespänning sågtandformigt varierande med fasfelet. Det ger en snabbare övergång mellan de olika låsområdena, jämfört med Costas Loop som har sinusformad felfunktion. Där är det lätt att fastna i obeslutsamhet i de områden där fespänningen är konstant (där sinuskurvan vänder). Remodulatorn får därför en snabbare inställning än Costas Loop. Dessutom slipper man multiplikator på basbandet.

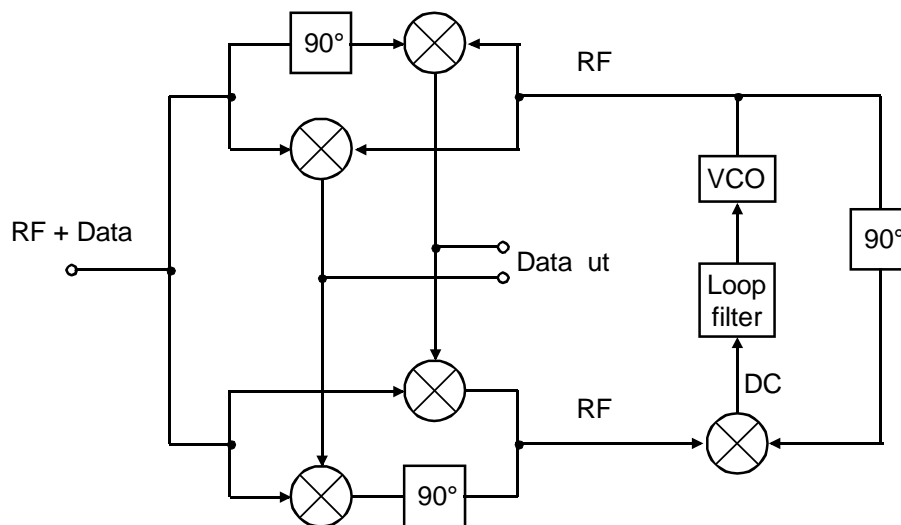
Remodulator för QPSK



QPSK behöver modulera och demodulera båda kanalerna, däremot kan genereringen av bärvågen vara gemensam. Fasjämförelsen sker mellan två lika QPSK-signaler.

Vid moduleringen skiljer sig både I- och Q-kanalen 90° från ingången. Fasdetektorn hamnar alltså på den önskade nollgenomgången.

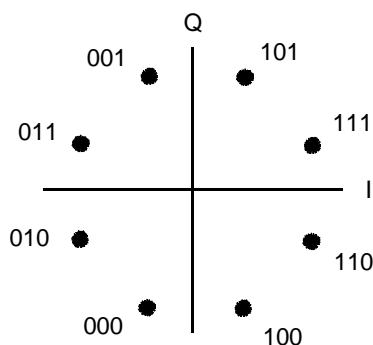
Reverse modulation



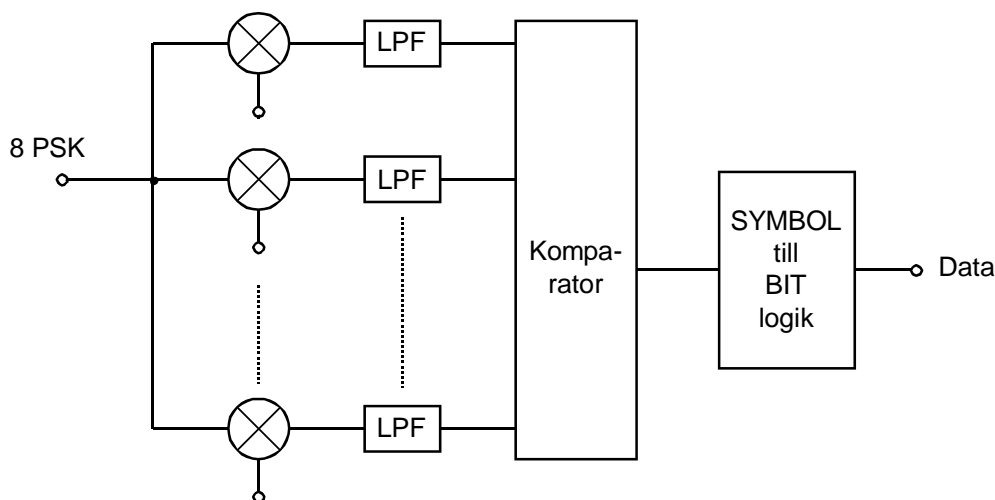
QPSK-signalens två kanaler (I och Q) hoppar 180° i takt med dess datainnehåll. Reverse modulation innebär att man med hjälp av demodulerad data, hoppar med fasen ytterligare en gång. Genom att vända tillbaks fasen, har man fått en kontinuerlig bärvåg. En PLL filtrerar bärvågen, så att den kan användas till demoduleringen.

8 PSK demodulering

8PSK består av 8 tillstånd (symboler) med olika fas, men med konstant amplitud. Varje symbol består av 3 databitar.

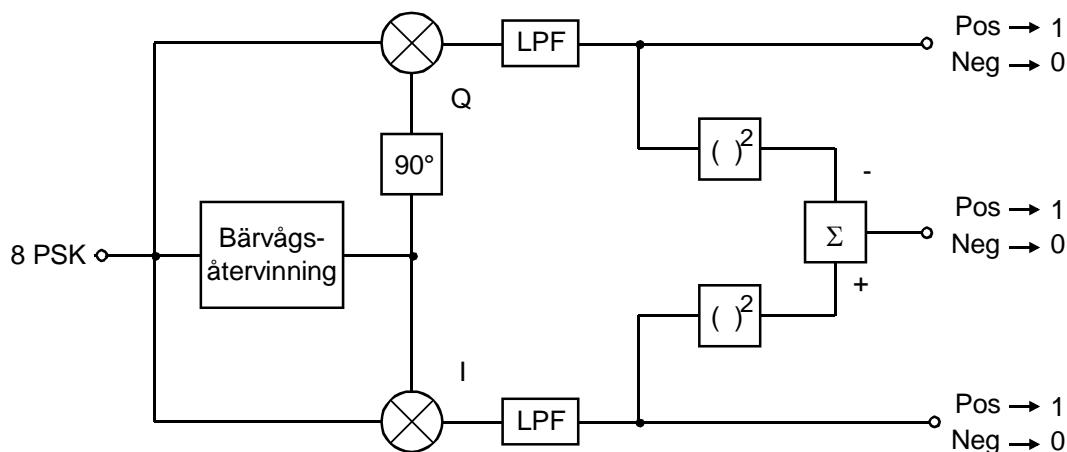


Vid små signal/brus förhållanden kan signalen misstolkas till symbolen som ligger intill. För att minska bitfelet kodas signalen så att intilliggande symboler bara skiljer sig med 1 bit (Gray code).



Demodulatorn kan bestå av 8 koherenta detektorer, för varsitt fasläge. Komparatorn väljer vilken som är starkast. Den symbolen omvandlas sedan till motsvarande bitar i en logikkrets (mapping).

Det blir en ganska komplex mottagare. Betydligt enklare blir det om man delar upp signalen i en I- respektive Q-kanal. 8PSK demoduleringen blir då en utvidgning av 4PSK (dvs QPSK).



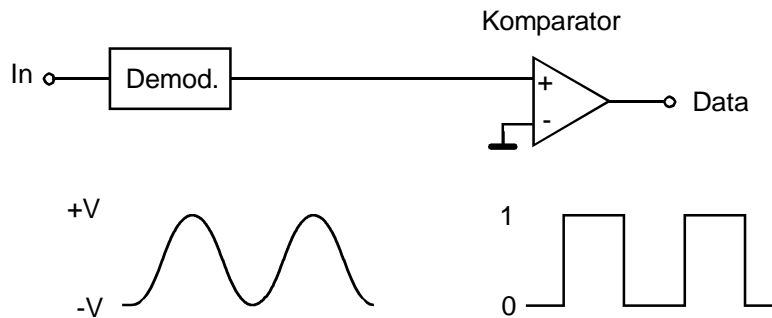
Symbolerna i konstellations-diagrammet består av 3 bitar. De kan betecknas med VB (vänster bit), MB (mellan bit) och HB (höger bit).

Symbolerna med HB=1 ligger på den positiva Y-sidan. Demodulering i Q-kanalen ger alltså positiv utsignal. HB=0 ger på samma sätt negativ utsignal. Symbolerna är också uppdelade så att VB=1 ligger på positiva x-sidan och VB=0 ligger på negativa x-sidan. Det motsvarar positiv respektive negativ signal ut på I-kanalen.

Symboler med MB=1 har större amplitud i I-kanalen än i Q-kanalen. MB=0 har istället större amplitud i Q-kanalen. Kvadreringarna är till för att ta bort tecknet. Samma förhållande gäller ju i alla fyra kvadranterna. Dessutom ger det större skillnad mellan stort och litet värde. När skillnaden mellan kanalerna har positivt värde (>0) är MB=1. Om skillnaden blir negativ (<0) är MB=0.

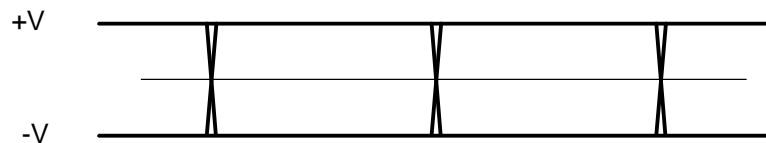
Vid detekteringen av de tre bitarna används endast komparatorer med referensen noll volt. Det ger en tillförlitlig demodulering oberoende av amplitudnivån. Den fungerar alltså även för fädad signal, utan att behöva AGC-kretsar.

4. Data detektering

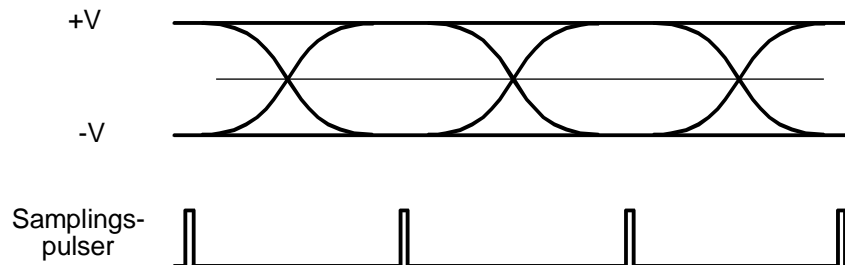


Ut från demodulatorens kommer en filtrerad analog signal, som hoppar i takt med den överförda informationen. BPSK demodulatorens ger spänningarna $-V$ respektive $+V$. En komparator som har tröskelnivån $0V$ ger dataflödets "0" respektive "1". QPSK demodulatorens ger två kanaler (IQ) som detekteras med varsin komparator. MSK demoduleras som QPSK. Det är bara det att pulserna är kraftigt avrundade. Men komparatorn alstrar snygga fyrkantiga datapulser. QAM innehåller flera nivåer i I- respektive Q-kanalen. En komparator för flera nivåer är en A/D omvandlare.

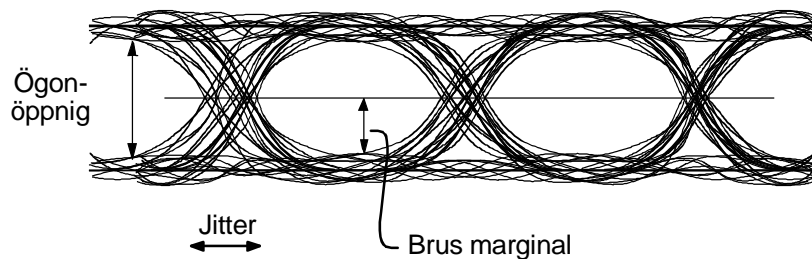
Ögonogram



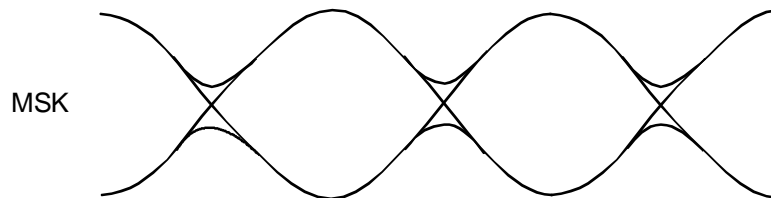
Figuren visar en PSK signal som demodulerats till två nivåer. Olika dataföljder (sekvenser) har överlagrats i samma diagram, på samma sätt som efterlysningen i ett oscilloscope visar flera svep samtidigt.



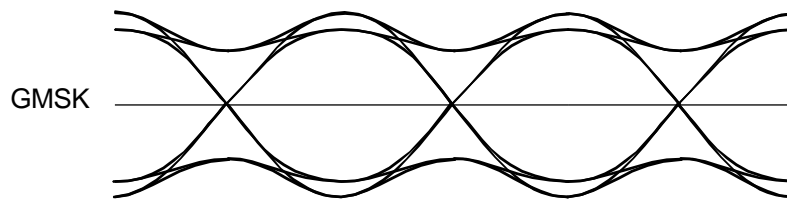
Om kanalen är hårt filtrerad, i förhållande till datahastigheten, blir pulserna kraftigt avrundade. Är signal/brus förhållandet dessutom litet så är det viktigt att mätningen sker där amplituden är som störst.



Ju mer brus desto mindre blir ögonöppningen. En Öppning på 90 % motsvarar 0,9 dB sämre känslighet. Men om öppningen bara är 10 % har känsligheten blivit 20 dB sämre. På motsvarande sätt försämras känsligheten om det finns ett tidsjitter mellan dataflödet och samplingsfrekvensen. Samplingen sker då inte där amplituden är som störst. Tidsjitter kommer från LO-signalens fasbrus samt från fördröjningen i vågutbredningen.



MSK har datapulser som är avrundade till sinusform. Vid två efterföljande lika databitar går först amplituden ner mot noll och sen tillbaka till en likadan halvsinus. Men på grund av filtreringen hinner inte amplituden gå ända ner till noll, innan det är dags att vända tillbaks igen.

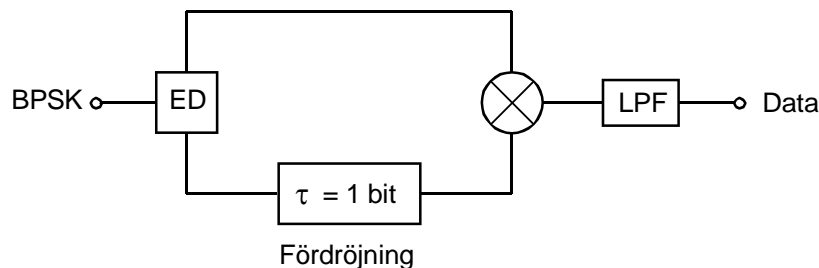


GMSK är filtrerad så att pulsen är längre än en bit. Det ger olika amplitud i samplingspunkterna beroende på intilliggande databitar.

5. Delay detektor

Delay-detektor för BPSK

Om signalen är modulerad med differentiell fas (inte koherent modulering) räcker det att avkänna när signalen byter fas, dvs övergången mellan ettor och nollor. En delay-detektor består av en fördröjningsledning och en fasdetektor.



Fördröjningsledningen används som minne av föregående databit. Den fördröjda signalen används sedan som fasreferens till nästföljande databit. Fasdetektorn känner av om efterföljande bit ligger i fas eller om det skiljer 180° mellan databitarna.

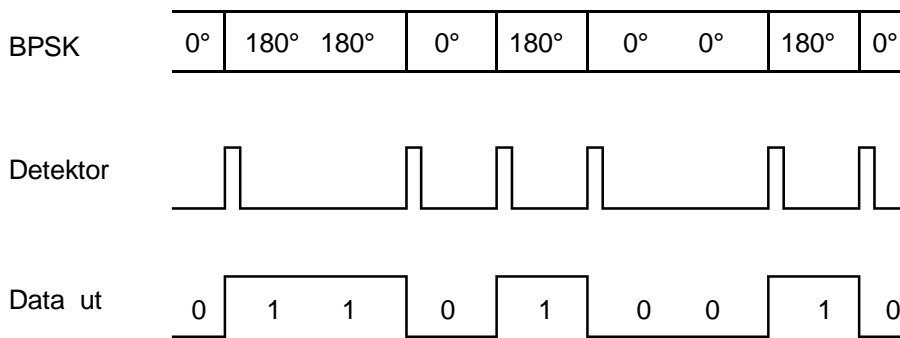
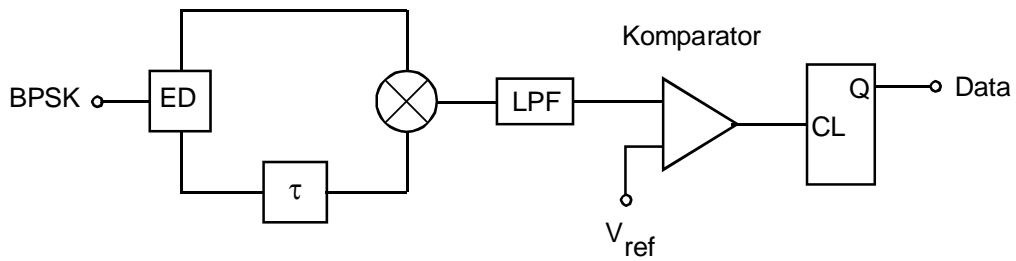
Om demoduleringen sker direkt på RF-nivå kan fördröjningen utformas som ett stycke ledning eller ett filter. Om demoduleringen sker på MF-bandet kan man använda skiftregister som fördröjningsledning. Den kan ge 10 - 150 ms fördröjning. Nackdelen är den stora strömförbrukningen.

Differentiell detektering behöver ingen bärvågsåtervinning. Den ger snabb synkronisering och är alltså lämplig för korta meddelanden (burst) som t.ex. i TDMA-system.

I en kanal med gaussiskt brus och svag signal fungerar koherent detektering bäst. Men den är inte lika tolerant för andra störningar, som snabb fading från multipelreflektioner, skugning, doppler och fasbrus. Den differentiella detekteringen är alltså lämplig vid digital mobilkommunikation och system med starkt fasbrus.

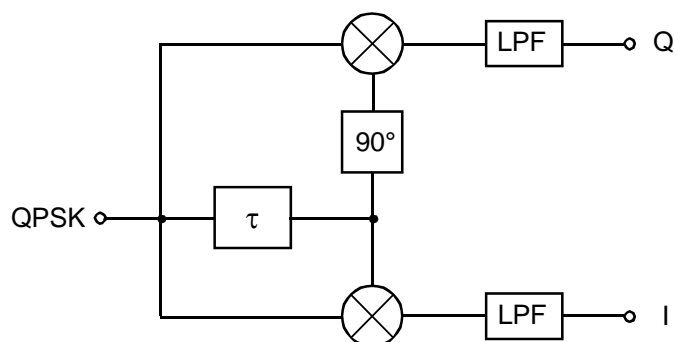
Nackdelen är att den har sämre känslighet än den koherenta demoduleringen. Både signal och referens är ju brusiga.

5. Delay detektor

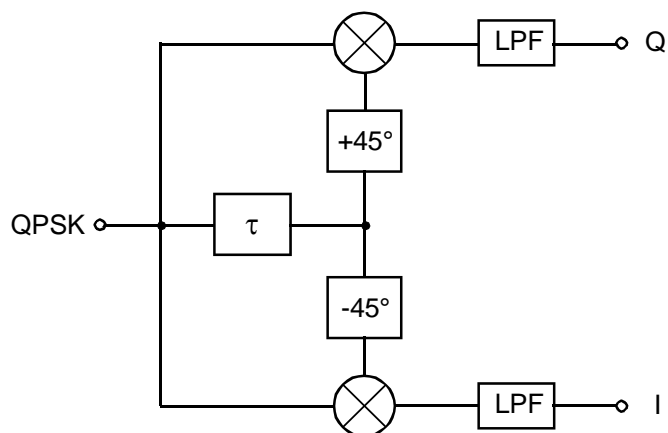


Ut från fasdetektorn kommer det pulser som representerar övergång mellan nolla och etta. Dessa pulser snyggas först till med filter och komparator, därefter klockar de en multivibrator som ger det önskade dataflödet ut.

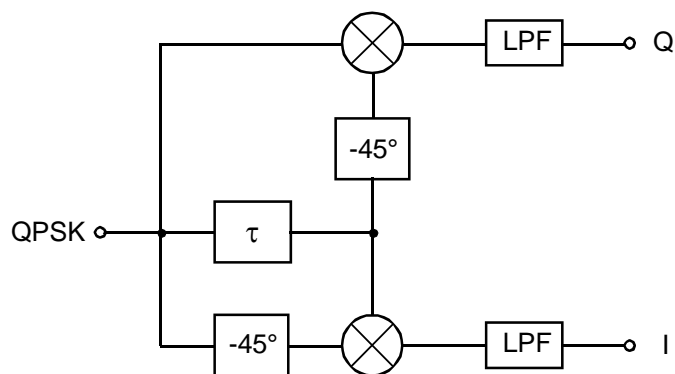
Delay-detektor för QPSK



QPSK demodulatore behöver en fördröjd signal både till I- och till Q-kanalen. Om en fasdetektor ger ut $+V$ respektive $-V$ för 0° respektive 180° , så ger samtidigt den andra fasdetektor ca 0 V . Den andra fasdetektor får sin utsignal ($\pm V$) vid 90° respektive 270° . I det läget har första fasdetektor ca 0 V ut.



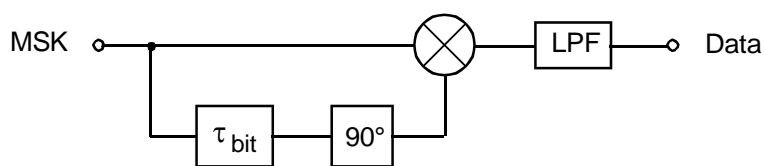
Ett enklare alternativ är att vrida referenserna 45° . Med ena kanalen fasvriden $+45^\circ$ och den andra kanalen -45° blir det 90° skillnad mellan de två kanalerna.



Istället för att fasvrda referensen $+45^\circ$ (dvs -315°) kan man vrda insignalen -45° . Det ger kortare ledningar, dvs större bandbredd.

Delay-detektor för MSK

Vid MSK, och OQPSK, kan fasen bara variera $\pm 90^\circ$ för varje databit. Det räcker alltså med endast en fasdetektor, som ger positiv utsignal vid $+90^\circ$ och negativ utsignal vid -90° .



Den fördröjda signalen har fasvridits 90° . Fasdetektorn känner av om efterföljande databit har fasvridits 90° åt samma håll eller om fasen har vridits 90° åt andra hållet. Antingen ligger signalerna i fas eller också skiljer de sig 180° .

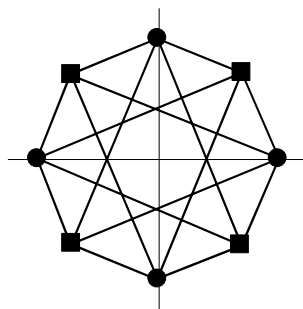
Jämförelse

	Faslägen	Antal fasdet.
DBPSK	0° 180°	1
DQPSK	0° 90° 180° 270°	2
DMSK	+90° -90°	1

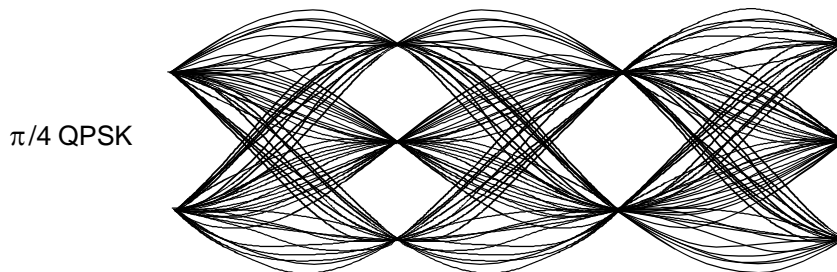
Med en fördröjning så lång som en databit jämförs hela databiten med hela föregående bit. Det ger maximal känslighet i en brusig kanal.

En kanal med frekvensselektiv fading ger tidsjitter. Med kortare fördröjning ($0,1 - 0,2 t_b$) kan man få mindre ISI från flervägsutbredningens tidsvariationer. Med fördröjningen $t=0$ får man en Frekvensdiskriminator. Men den får värre tidsjitter, vid snabb fading, än delay-detektorn med $0,5 t_b$

$\pi/4$ QPSK



Varannan symbol sker till de fyrkantiga tillstånden och varannan symbol går till de runda tillstånden. Tittar man på ena kanalen (I eller Q) ser man varannan gång två nivåer och varannan gång tre nivåer.



$\pi/4$ QPSK är enbart filtrerad till Nyquist och får väl definierade ögonöppningar vid differentiell demodulering. Den fungerar alltså bra vid icke-koherent demodulering.

Figuren visar också datapulsernas överslängar (ringning) på grund av branta filterflanker. Beroende på dataflödet blir det olika signalvägar mellan samplingspunkterna. Resultatet är att ögonöppningen får en mindre bredd. Ju brantare filterflanker desto smalare bredd får ögonöppningen. Det är alltså mycket viktigt att samplingen sker vid rätt tidsögonblick.

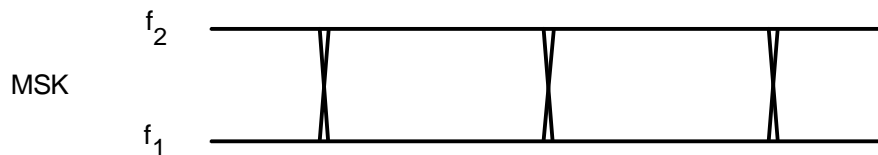
Jämförelse vid Offset-QPSK

QPSK ger 100 % AM, dvs höga sidlobor i spektrat. $\pi/4$ QPSK innehåller mindre fashopp, som ger bättre spektra. Nackdelen är att amplituden fortfarande varierar. Offset-QPSK ger ett bättre spektra genom att undvika de värsta fashoppen. Nackdelen är att de två databitarna i I- och Q kanalen ligger överlappande varandra. Kanalerna är ju tidsförskjutna en halv symbolperiod. Vid koherent demodulering behandlas de två kanalerna var för sig. Det gör då inget att de är överlappande i tiden. Vid differentiell demodulering kommer de tyvärr att påverka varandra. Resultatet är att ögonöppningen blir mindre, dvs känsligheten blir mycket sämre. Samma sak gäller MSK, som ju är en form av OQPSK. Vill man använda den enklare icke-koherenta demodulatorn ändå, så får man använda mer signalprocessing över fler databitar istället, antingen i form av beslutsåterkoppling eller med en MLS-detektor (Viterbi).

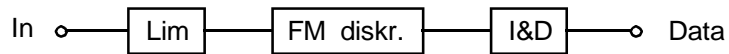
6. Frekvensdiskriminator

Frekvensdiskriminator för MSK

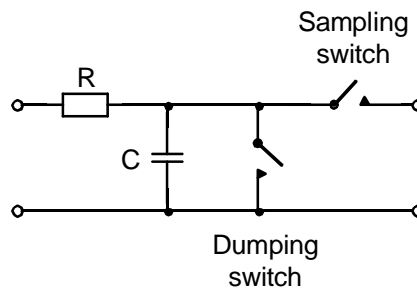
En kontinuerlig fasvridning (CPM) kan betraktas som en smalbandig FM.



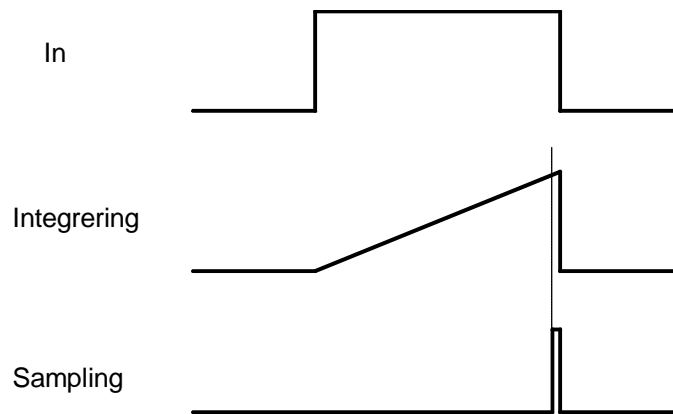
En MSK signal hoppar mellan två frekvenser, beroende på åt vilket håll fasen vrids. De frekvenserna kan demoduleras med en FM-diskriminator.



Före diskriminators sitter en limiter för att ta bort alla AM-variationer. Efter diskriminators följer ett filter, eller ännu hellre en I&D-krets.



I&D (Integrate-and-Dump) är en krets som integrerar insignalen under pulstiden och sedan dumpar innehållet med en kortslutande switch. Strax innan dumpningen samplas innehållet till efterföljande krets.



RC-kretsen har en lång tidskonstant i förhållande till pulsen. Uppladdningen (integreringen) blir därför ganska linjär. Där pulsen tar slut sker sampling och dumpning. Sen är kretsen redo att ta hand om nästa puls. Kretsen är alltså anpassad för en viss pulsbredd. Störst utsignal blir det om insignalen hela tiden ligger på max, dvs är en fyrkantvåg. Snabba variationer, t.ex. brus och transienter, jämnas ut med RC-kretsen. Kretsen är alltså ett lågpasfilter som är matchat till inkommande signal.

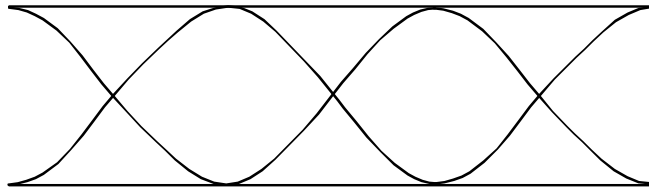
Jämförelse FD och DD

Frekvensdiskriminators är liksom delay-detektorn en icke-koherent detektor. En kanal som begränsas av vitt brus får max känslighet med en koherent detektor. Om kanalen däremot är begränsad av FM-variationerna vid snabb fading, ger frekvensdiskriminators och delay-detektorn bäst känslighet. Det gör att $\pi/4$ QPSK fungerar bättre än OQPSK, som behöver koherent detektor.

Vid modulationsindex $h=0,5$ är Frekvensdiskriminators och delay-detektorn ganska likvärdiga. Vid större modulationsindex fungerar Frekvensdiskriminators bättre än delay-detektorn. Redan vid $h=0,7$ är Frekvensdiskriminators över 2 dB känsligare än delay-detektorn.

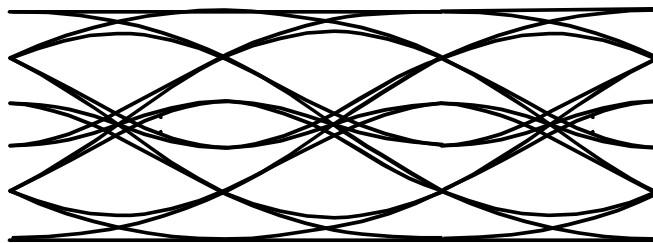
Ögonogram

GMSK
 $B_b T = 0,5$



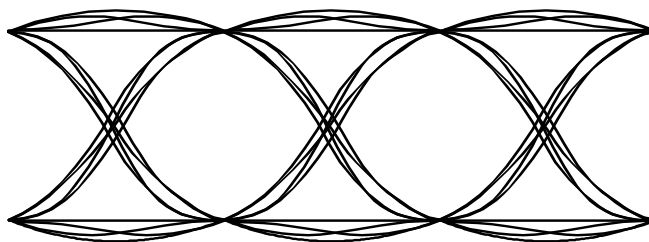
GMSK är filtrerad så att frekvensvariationerna blir mjukare.

GMSK
 $B_b T = 0,25$



Vid hårdare filtrering hinner inte signalen upp till max amplitud på ett bitintervall. Det är alltså en signal med partiell response. Sämst blir det för sekvensen 1-0-1 eller 0-1-0. Amplituden blir då ganska liten. Efterföljande komparator får mycket små marginaler vid lågt signal/brus förhållande. Vid GMSK är det lämpligare att använda en koherent demodulator, som ger större ögonöppning.

ESFM

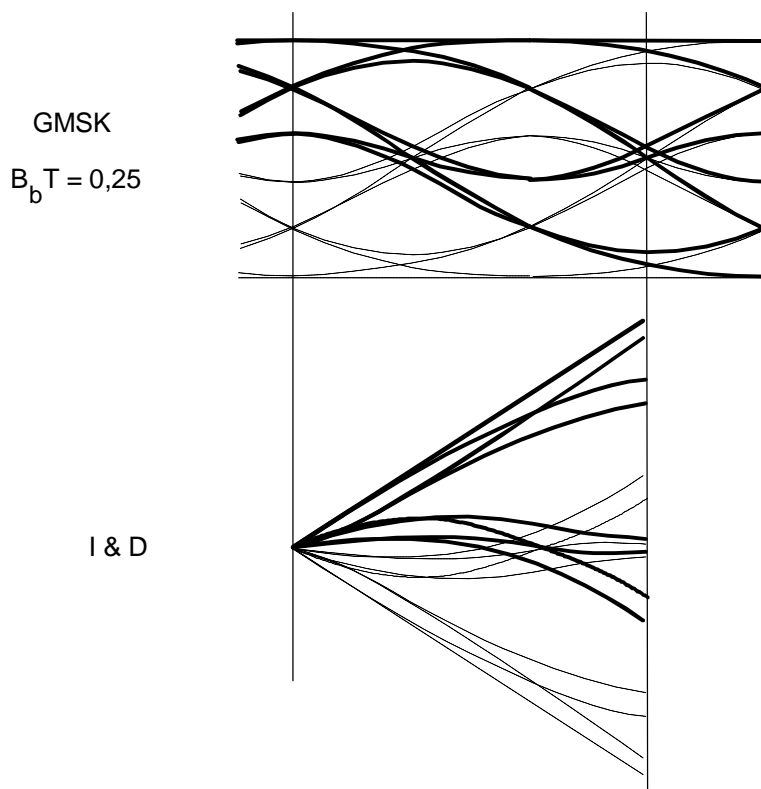


ESFM (Envelope Shaped FM) är liksom MSK en CPM (Constant Phase Modulation). Skillnaden är att man här har frångått kravet att amplituden ska vara konstant. Med lämplig pulsform får man smalt spektra utan hård filtrering (partiell response). Det gör att man slipper ISI och får väl definierad amplitud i samplingspunkterna.

7. Beslutsstyrd demodulering

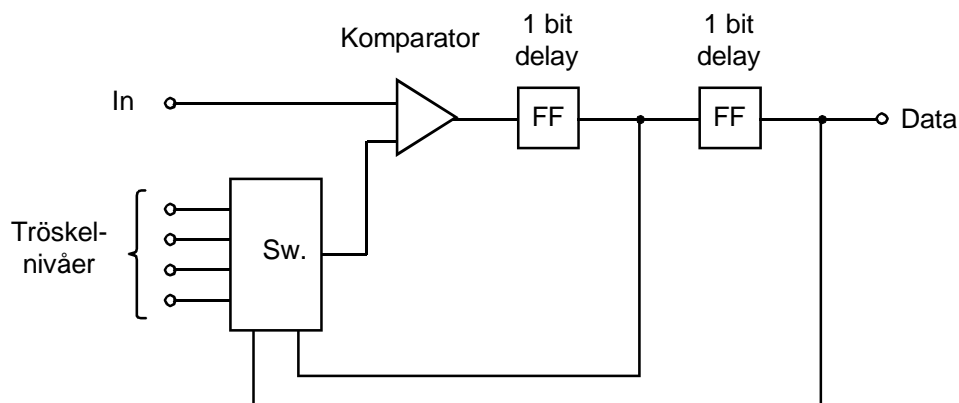
Beslutsåterkoppling

Problemet med GMSK är de olika nivåerna på grund av ISI. De minsta nivåerna ger mycket små brusmarginaler. Nivåerna beror helt på föregående databitar.



De feta linjerna visar signalvariationerna då föregående bit var "1". De tunna linjerna gäller då föregående bit var "0". Eftersom den föregående biten är känd, behöver man inte bry sig om de signalvägar som inte gäller. Tröskelnivån läggs nu mitt mellan de nivåer som motsvarar "0" respektive "1" för aktuell bit. Tröskelnivån förskjuts uppåt eller neråt beroende på föregående bit.

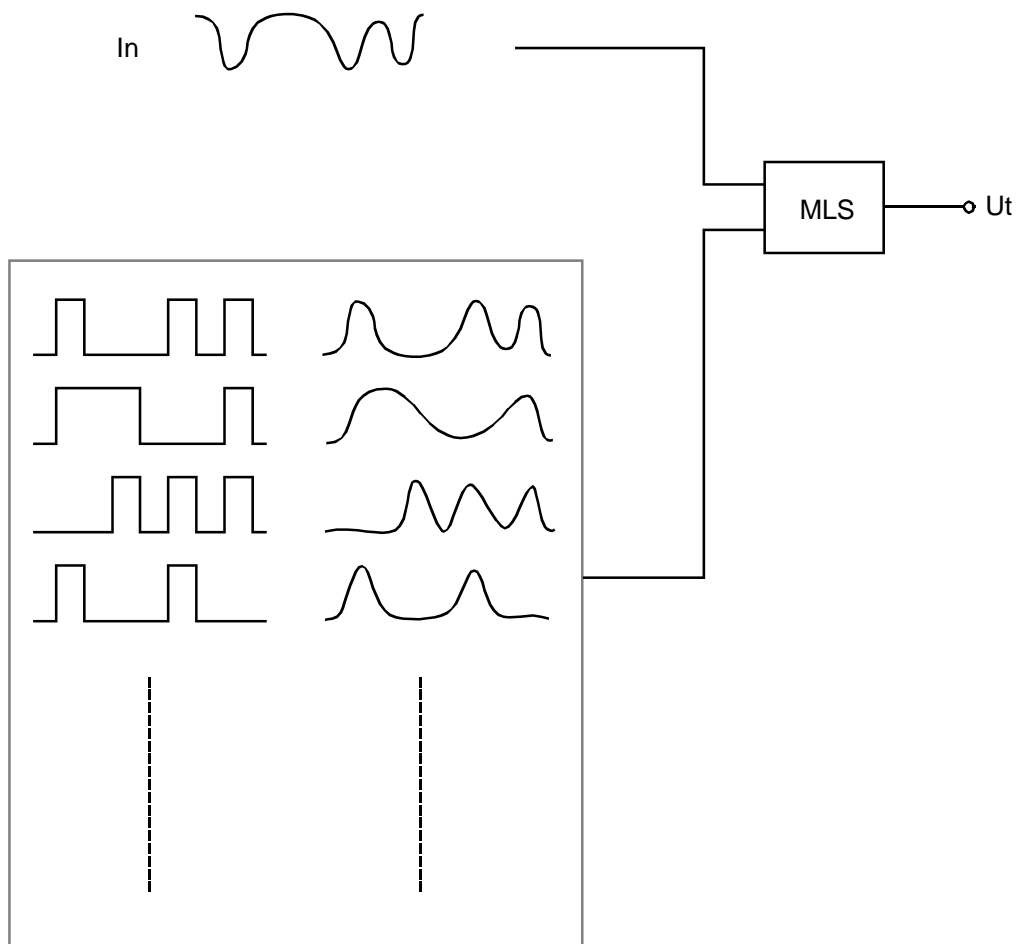
Figuren visar också att den bästa integrationstiden är 1,5 gånger bitlängden. Men fortfarande är kretsen 7 dB sämre än en koherent detektor. Bättre resultat får man om man integrerar över 2 bitar och delar upp signalvägarna till 4 tröskelnivåer.



En av de fyra tröskelnivåerna väljs, beroende på de två föregående bitarna. GMSK med $B_b T = 0,25$ får 10 dB bättre känslighet med 4-nivåers metoden. Men det skiljer bara 1 dB mellan 2- respektive 4-nivåers tröskel, vid $BER=10^{-3}$

Alternativt kan beslutsåterkopplingen styra en fasskiftare i själva delay-detektorn.

Ännu bättre känslighet får man med en kombination av en 2-bitars och en 3-bitars detektor. Det blir en mycket komplex detektor, men den är bara 3 dB sämre än den koherenta. Ytterligare 1 dB förbättring får man om man går över till en MLS-detektor.

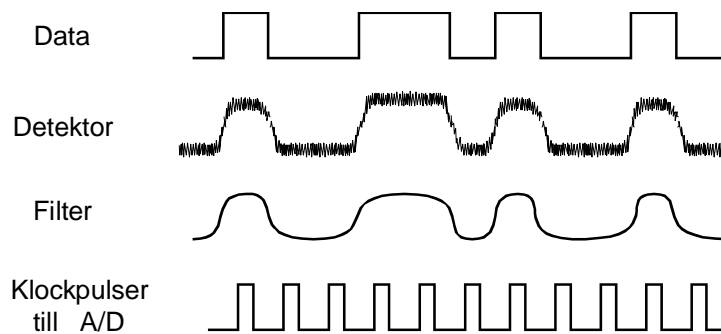
MLS-detektor

I mottagaren finns lagrat alla de sekvenser som kan tänkas förekomma. Sekvensernas vågform är korrigerad för aktuell kanals filtrering (ISI) och olinjäritet. Varje tänkbar sekvens jämförs med den inkommande datasekvensen. Den sekvens som avviker minst från den inkommande är den mest troliga (MLS=Maximum Likelihood Sequence). Metoden för att räkna fram den troligaste sekvensen är en "Viterbi" algoritm.

Processen är ganska komplex, men det förbättrar mottagarens känslighet markant. Känsligheten blir ca 12 dB för GMSK med $B_b T = 0,25$

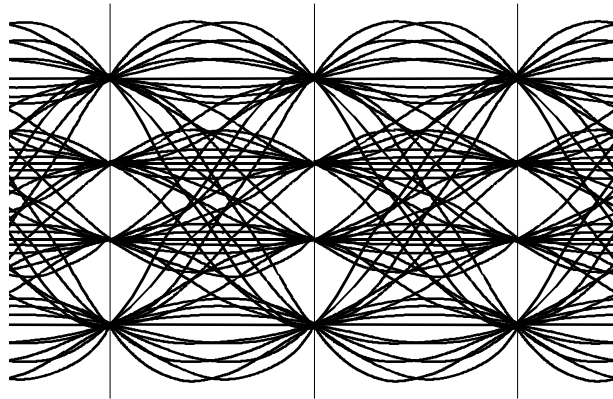
8. Regenerering av klockfrekvens

Inledning



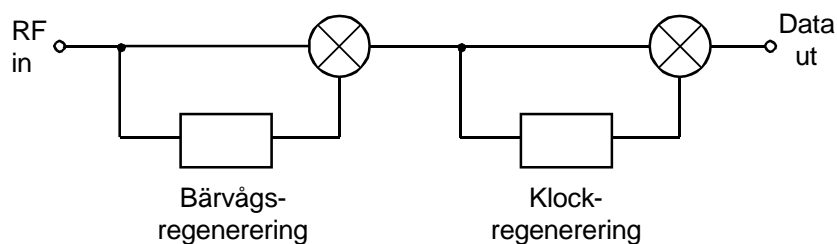
Den detekterade signalen kan vara ganska brusig. Ett filter tar bort en stor del av bruspektrat, så att signalen blir renare. Kvar blir den avrundade pulsen, samt det brus som faller inom bandbredden.

Signalen bör mätas (digitaliseras) mitt i pulserna där amplituden är som störst. QAM kan dessutom ha många olika amplitudnivåer, som utsignalen hoppar mellan i takt med dataflödet. 16QAM har 4 nivåer i Q-kanalen och 4 nivåer i I-kanalen. 64QAM har 8 nivåer och 256QAM har 16 nivåer, i vardera kanalen.

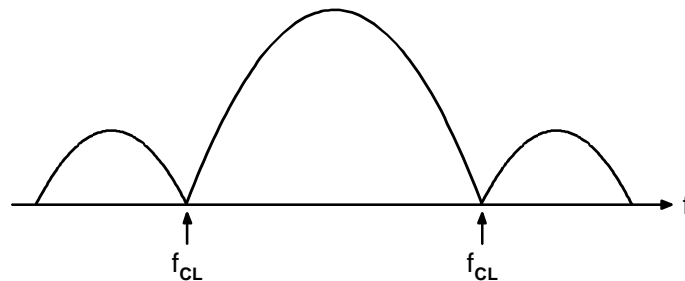


Om signalen har många nivåer är toleranserna mycket små. 1024 QAM har ögonen öppna mindre än 5 % av symboltiden. Här är det ännu viktigare att signalen digitaliseras i rätt tidpunkt där öppningen är som störst. Dessutom finns det AM-brus på signalen. Ju mer brus desto större spridning har amplituden i mätpunkten. Området mellan de olika nivåerna minskar. Det kallas att ögonen sluts (eye closure).

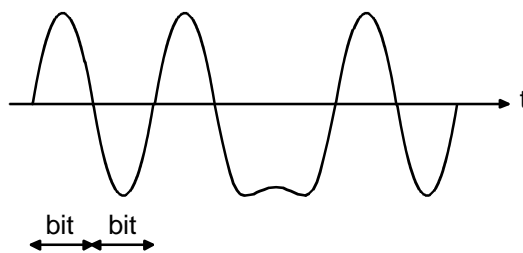
Det krävs alltså en mycket noggrann klockgenerator. Ett system med 256QAM kräver att samplingsjittret hålls inom $0,75^\circ$ rms för att systemet inte ska försämrats mer än 0,5 dB. Klockgeneratoren behöver dessutom följa mottagna signalens tidsvariationer.



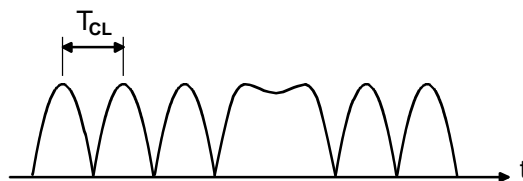
Klockfrekvensen återskapas ur inkommande signal, på liknande sätt som bärvågen återskapades. Om klocka och bärvåg är låsta till varandra (härrör från samma kristall) kan man använda en gemensam krets för regenereringen.



Problemet är att dataflödet inte har några diskreta frekvenser (spektrallinjer) som klockoscillatorn kan synkroniseras till. Ett slumpmässigt dataflöde har ett kontinuerligt spektrum som går ner till noll just vid klockfrekvensen.

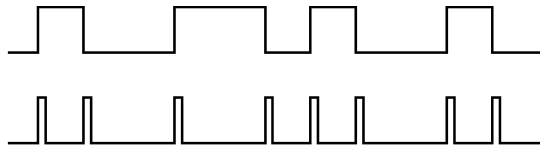


När datahastigheten är hög i förhållande till kanalens bandbredd är datapulserna filtrerade och alltså avrundade. Den snabbaste variationen, dvs högsta frekvensen, får vi då varannan databit är positiv och varannan är negativ. Klockfrekvensen ska sampla varje databit då den är som störst. Datahastigheten är alltså hälften så hög som klockfrekvensen.

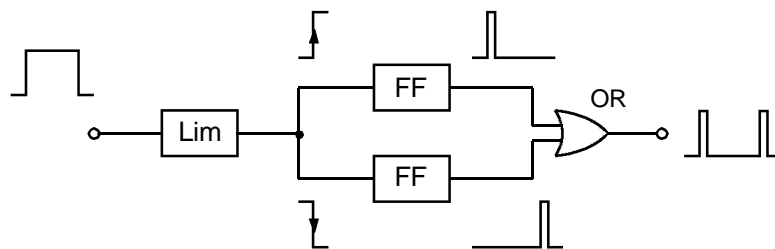


Signalen likriktas så att alla datapulser blir positiva. Det bildas då ett rippel med dubbla datafrekvensen, det vill säga klockfrekvensen. Klockregeneratoren ska alltså innehålla en likriktare eller en kvadratisk olinjäritet samt ett filter för att få en stabil klockfrekvens.

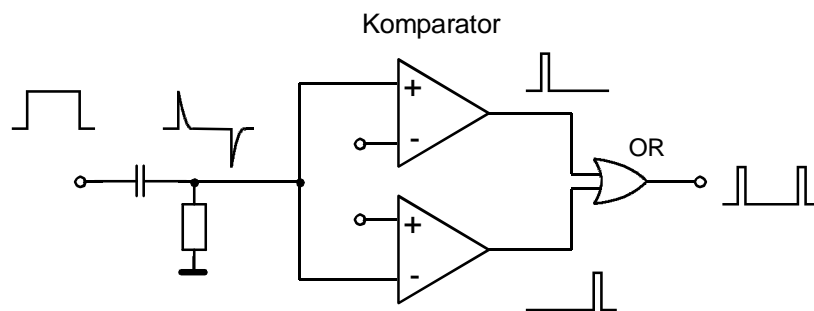
Omslags detektor



En omslagsdetektor (transition detector) alstrar en puls av samma polaritet för varje övergång mellan ettorna och nollorna. Det ger ett pulståg som kan användas till klock-regenereringen.

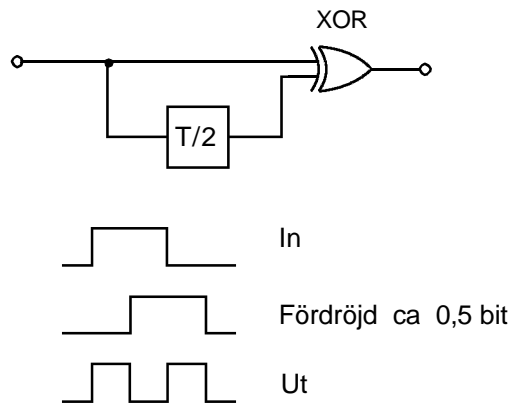


Den här kretsen innehåller två monostabila multivibratorer (flip-flop). Den ena triggar på den positiva flanken och den andra triggar på den negativa flanken. Pulserna summeras i en OR-grind. Det ger en puls ut för varje omslag.



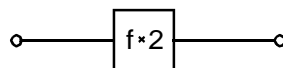
En liknande krets differentierar insignalen med ett RC-nät. Pulserna vänds åt samma håll (likriktas) och sen summeras i utgången.

Delay detektor



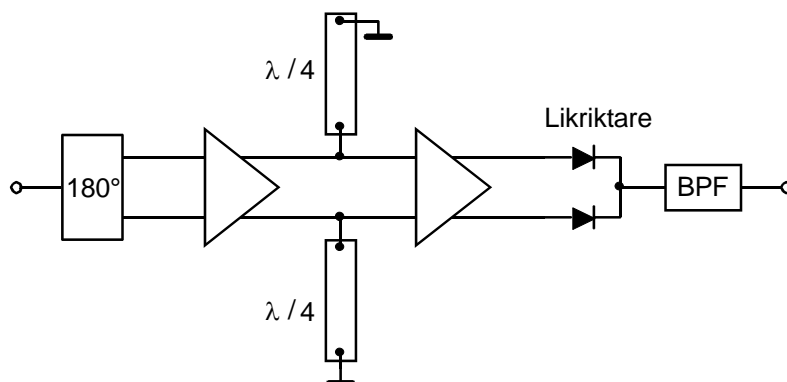
Man kan också få önskat pulståg genom att fördröja en del av insignalen och sedan sammansätta med en XOR-grind. Om det är mycket hög datahastighet kan man använda en analog fördröjningsledning, samt en mixer istället för XOR-grinden.

Frekvens dubblering



En övertonsgenerator alstrar diskreta spektrallinjer som kan användas till klockregenerering. Kretsen är i princip samma som föregående med fördröjningsledning och blandning. Skillnaden är att fördröjningen har valts till noll. Det blir en enklare krets, med lägre jitter. Som olinjäritet kan man välja en FET-transistor som förspänts till olinjärt område.

Differentiering med $\lambda/4$ ledning

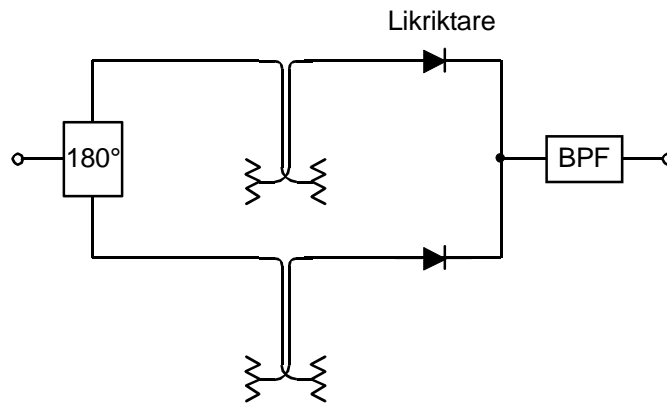


Vid riktigt höga bitfrekvenser (10 Gb/s) kan man använda kvartvågsstubbar för att filtrera fram transienterna i stig- och falltid. En bit ledning har bättre tillverknings toleranser än en RC-krets.

Vid 10 Gb/s får man ut pulser med 200 ps intervall. Pulsbredden på 50 ps motsvarar filtrets passband, dvs ledningslängden $\lambda/4$ på 10 GHz.

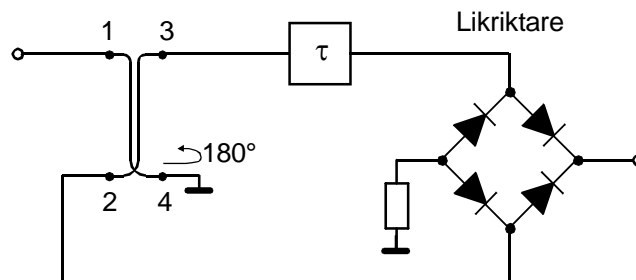
Den här kretsen är dessutom balanserad, för att begränsa inverkan från övertoner. Dubbla frekvensen ger ett fasfel. Om amplituden varierar så varierar övertonerna. Det resulterar i fasjitter.

Differentiering med två hybrider



Hybriderna är dimensionerade för att ge max amplitud på klockfrekvensen. Eftersom de är AC-kopplade fungerar de som diffkretsar, precis som RC-kretsen. Pulserna, som är en halv bit långa, passerar hybriderna. Därefter likriktas de och filtreras på vanligt sätt.

Diffkrets med en hybrid



Signalen i port 3 är differentierad, eftersom den är AC-kopplad i hybriden. I port 4 blir signalen totalreflekterad med 180° fasvridning. Reflektionen kommer ut i port 1 och 2. Port 1 är avslutad mot generatören. Port 2 är AC-kopplad från ingången (differentierad) och har 180° fasvridning. Den ytterligare fasvridningen genom hybriderna kompenseras i port 3 med en yttre fördröjningsledning. Likriktaren matas alltså med pulser som skiljer sig 180° .

Filtrering



För att få en ren och stabil klockfrekvens behöver pulstågen filtreras. Det kan ske med ett passivt smalbandigt filter eller med en faslåst slinga (PLL).

En PLL kan betraktas som ett mycket smalt trackingfilter. Det är bra med ett filter som följer den inkommande signalen om klockfrekvens varierar.

En injektionslåst oscillator kräver mindre strömförbrukning än en PLL. Den har stort låsområde, snabb låsning och lågt fasbrus intill bärvågen.

Ett fast filter med högt Q-värde (mer än 100) ger en ren klockfrekvens, dvs mycket litet fasrippel. Dessutom spelar det ingen roll att det saknas några pulser här och där. Resonatorn ringer till och fyller på eventuella luckor i pulståget. För frekvenser upp till ca 2 GHz kan man använda SAW filter.

En dielektrisk resonator är ett bra filter på mikrovåg. Den är stabil och har högt Q-värde. Tyvärr ger den resonans på oönskade frekvenser också. Det kan vara bra att ha en avstämd förstärkare, för att undertrycka det fasjitter som blir av de högre moder som passerar resonatorn.

Equalizer

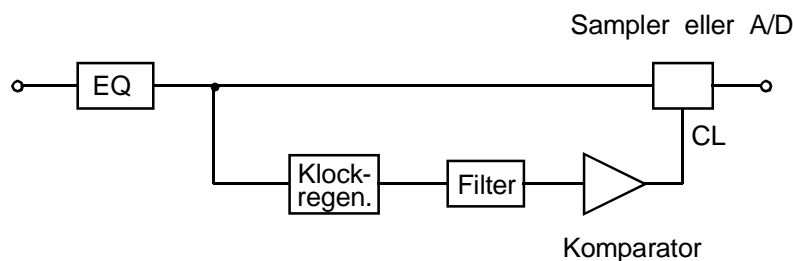
Flervägsutbredning ger distorsion. Om man vill använda hög datahastighet, behöver kanalens distorsion korrigeras. Målsättningen är att jämna ut frekvensgången och linjärisera fasen. Eftersom kanalen hela tiden varierar, behövs en självjusterande filterkrets, dvs en adaptiv equalizer.

Vanligtvis sker utjämning med equalizer i basbandet, men ibland sker det på MF-signalen.

Med en pilotton, eller training sekvens, mäts kanalen upp. Därefter ställs equalizern in. En adaptiv equalizer mäter och korrigerar varje överförd burst.

Vanligtvis används en equalizer med beslutsåterkoppling (DFE - decision feedback equalizer), eller en inställning med MLS (maximum likelihood sequence). MLS är bättre än DFE, men också mer komplex.

Sammanställning



Klockregeneratoren består vanligtvis av en nollgenomgångsdetektor samt filtrering med PLL, SAW eller dielektrisk resonator. Den stabila klockfrekvensen görs sen till fyrkantvåg med en komparator. Hela kretskopplingen förläggs efter en eventuell equalizer för att dra nytta av dess kompensering. De önskade mätpunkterna switchas fram med en sampler. Slutligen digitaliseras nivåerna i A/D omvandlaren.

9. Felrättande koder

Felrättande koder används för att man ska kunna arbeta på svaga signaler, utan att få feltolkningar i dataflödet på grund av bruset. Man kan då arbeta på ännu lägre signal/brus förhållande.

Det motsvarar att systemet fått en viss förstärkning (coding gain). För en viss uteffekt får man längre räckvidd. Eller för en viss räckvidd kan sändaren arbeta på en lägre uteffekt. Eller för en viss uteffekt och räckvidd ger coding gain större C/N som i sin tur ger lägre BER.

Till dataflödet adderas extra bitar som har beräknats ur dataflödet. Det ger en viss redundans (mer bitar från samma information), som i mottagaren kan användas för att detektera och korrigera felen.

Enklare system använder endast ett fåtal extra bitar (10 %). Det räcker för att detektera felen. Ibland kombineras det med en begäran att sända om sekvensen (ARQ = Automatic Repeat Request). Det används i t.ex. DECT.

När felkorrigering krävs, och ARQ är opraktiskt, används felrättande koder (FEC = Forward Error Correction) t.ex. GSM. Det kräver större redundans, dvs fler extra bitar (40 %). Fler överförda bitar på samma tid innebär större bandbredd.

Enkla koder kan ge en "Coding Gain" på ca 3 dB. Med mycket komplicerade koder kan man uppnå 6 dB eller mer.

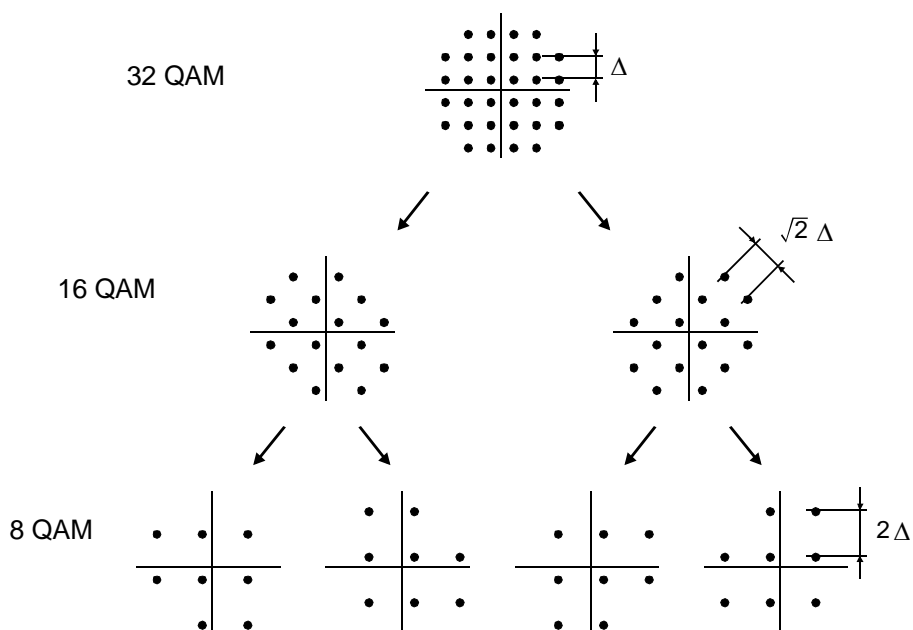
På mottagarsidan används ofta en MLS-decoder (Maximum Likelihood Sequence) med Viterbi algoritm, för att få högsta möjliga "Coding Gain".

Trellis-kodad modulation

Felrättande koder och digital modulation har främst behandlats var för sig. Kodningen har då gett ett större bitflöde, dvs större bandbredd. En högre modulation har istället gett mindre bandbredd.

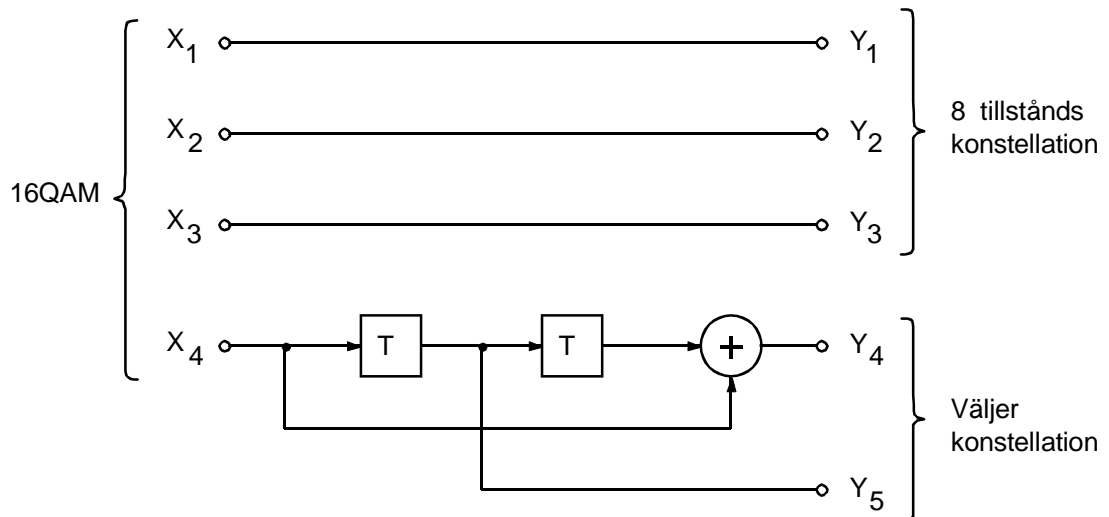
Trellis-kodning är en kombination av felrättande koder och modulation för att bibehålla den ursprungliga bandbredden.

För beskrivningen kan exempelvis 16QAM användas. Den behöver 4 bitar för att definiera en symbol. En encoder räknar fram ytterligare en bit. Med 5 bitar blir det en konstellation med 32 tillstånd, dvs 32QAM.

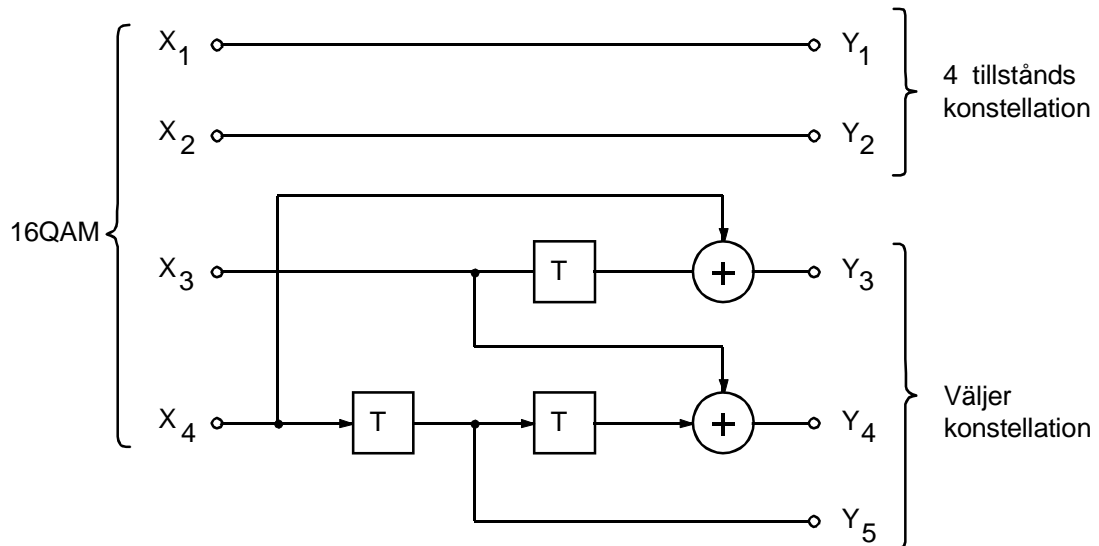


En större konstellation har kortare avstånd mellan tillstånden, dvs högre BER. Men tillstånden delas upp i två separata konstellationer. Då har vi kommit tillbaka till 16 tillstånd. Ytterligare en uppdelning ger fyra olika konstellationer med 8 tillstånd var. Genom att separera de tillstånd som ligger närmast varandra, får de fyra konstellationerna ett stort störavstånd mellan tillstånden.

Med 8 tillstånd istället för de ursprungliga 16 har dess avstånd fördubblats. Det motsvarar 3 dB "coding gain".



De två bitarna från encodern används för att dela upp konstellationen två gånger. Kvar blir en konstellation med 8 tillstånd. De 3 direktkopplade bitarna väljer det aktuella tillståndet för symbolen.



Med ytterligare en bit genom encodern, får man ytterligare en uppdelning av tillstånden. Det ger en "coding gain" på 4 dB. Med överkomlig komplexitet kan man nå upp till 5 dB "coding gain".

Man kan inte få hur stor "coding gain" som helst. Det är inte enbart avståndet mellan tillstånden som bestämmer förstärkningen, utan också hoppen mellan de olika constellationerna.

En encoder är en ganska enkel kretskoppling. Komplexiteten ligger på mottagarsidan. Decodern är en Viterbi-algoritm som väljer ut den troligaste symbolen.

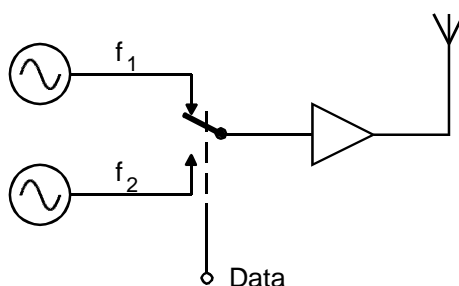
Gaussisk kanal	En kanal som begränsas av Gaussiskt brus får bästa känslighet med koherent detektor.
Fasstörd kanal	Om kanalen störs av snabb fading, skuggning, doppler eller högt fasbrus, blir det bättre känslighet med en icke-koherent detektor.
Snabb burst	Icke-koherent demodulator blir snabbast eftersom det inte behövs någon bärvågsregenerering.
Macro-celler	Vid stora celler, som i GSM, ger flervägsutbredningen frekvensselektiv fading. ISI och distorsion kan korrigeras med en equalizer. Men det kräver en koherent demodulator.
GMSK	GMSK har filtrerats till Partiell Response. Det ger ISI som kraftigt försämrar BER om en icke-koherent demodulator används. Dessutom fungerar den dåligt i frekvensselektiva kanaler. Vid GMSK används alltså främst koherent demodulering.

Micro-celler	Vid små celler (50-200 m) är tidsvariationerna så små att det inte behövs någon equalizer. Den icke-koherenta detektorn ger en mindre och billigare mottagare.
ESFM	har smalt spektra utan Partiell Response. Den har ingen ISI, och är alltså optimerad för icke-koherent detektor.
Modulationsindex	Vid modulationsindex större än 0,5 är frekvensdiskriminators känsligare än delay-detektorn.
QPSK	kan inte använda Frekvensdiskriminator på grund av de snabba fashoppen. Men delay-detektor och koherent detektor fungerar bra.
QAM	kräver koherent demodulering med bärivåregenerering och AGC.
MLS	Med icke-koherent demodulering och MLS detektering (Viterbi) av GMSK, får man endast 2 dB sämre känslighet än den koherenta.
Kodad modulering	Felrättande koder ger högre känslighet, 3 dB eller mer. Nackdelen är större bitflöde, dvs större bandbredd. Kodad modulation ökar känsligheten, med bibehållen bandbredd

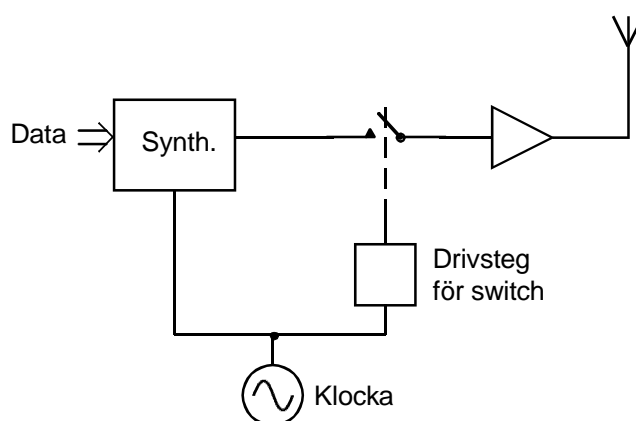
FSK & OFDM

1. FSK modulering

FSK hoppar mellan två olika frekvenser, i takt med dataflödet.



Enklast är att använda två olika oscillatorer som svänger kontinuerligt. Frekvensvalet sker med en elektronisk switch som styrs av dataflödet.



Man kan också styra en synthesizer (eller en VCO) till respektive frekvens. Med en switch på utgången slipper man sända spurious-signaler under själva omställningen.

MFSK

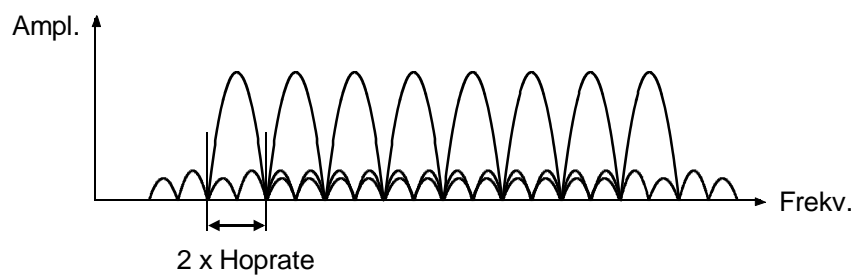
Genom att hoppa mellan mer än två frekvenser kan man överföra mer information per hopp. Ofta kallas ett frekvenshopp för chip. Man får alltså fler bitar per chip.

8	frekvenser ger	3 bit/chip
16		4 bit/chip

Alternativt kan man säga att för samma informationshastighet får man lägre hoppfrekvens. Längre pulser ger lägre interferens mellan symbolerna i mottagaren. Uppdelningen till fler parallella bitar i valet mellan flera frekvenser kan jämföras med QAM konstellationens fler tillstånd.

Spektra

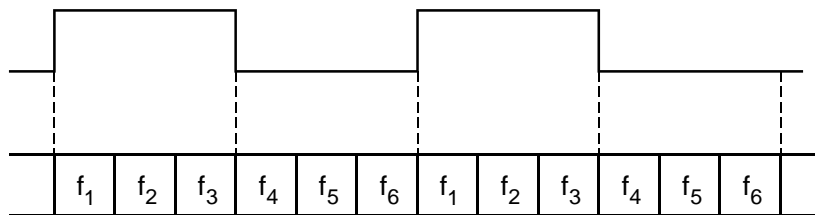
Att hoppa till och sen från en viss frekvens, innebär ett pulsspektra på den frekvensen.



De olika frekvenserna kan alltså inte ligga hur nära varandra som helst. Avståndet bör vara minst 2 gånger klockfrekvensen (hoprate). Däremot behöver inte frekvenstäckningen vara kontinuerlig. Man kan alltså undvika vissa störande områden.

Störningar

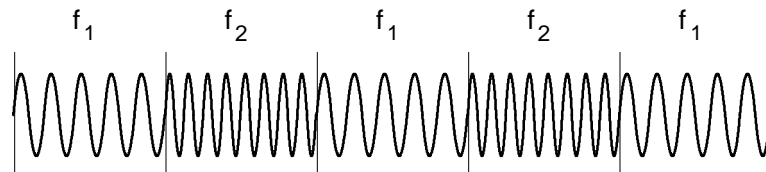
Inverkan av störningar kan minskas genom att sända på 3 eller fler frekvenser per databit.



De tre frekvenserna kan sändas i serie efter varandra, eller samtidigt parallellt. Det resulterar i högre chip-frekvens respektive fler kanaler i mottagaren.

Det handlar inte om att överföra mer information. Det är istället samma information som sänds i flera parallella frekvenser för att få en felfri överföring

Koherent FSK



Med koherent FSK menas att fasläget för de två frekvenserna måste vara väl definierade. Övergångarna ska ske utan fassprång.

Ett koherent system får högre känslighet, men det blir dyrare och det är svårt att få den att fungera i praktiken. Även om sändaren och mottagaren fungerar som de ska, så är det ju meningen att signalen ska gå genom atmosfären också. Olika frekvenser får då olika vågutbredning, dvs fördröjning. Det gör att signalen inte längre är koherent när den kommer fram. RF-bandbredden måste vara mindre än 5 - 10 % för att hålla låg fasdistorsion. En fast förbindelse kan med en filterkrets kompensera fasdistorsionen (delay equalizer).

En koherent FSK undviker språng i kurvformen. Det ger ett smalare spektra. Genom att skifta frekvens då amplituden är som störst (lutningen noll) sker förändringen dessutom så att det inte blir något språng i faslutningen. Det ger ännu smalare spektra.

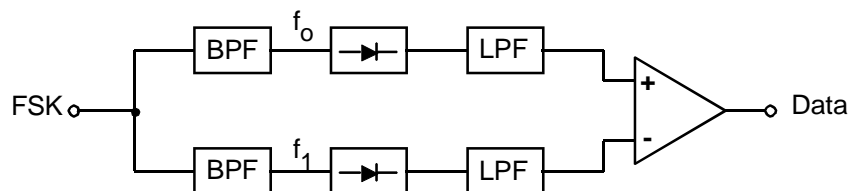
2. FSK demodulator

FSK demodulering

FSK sänder på två eller fler frekvenser. Datainformationen bestämmer vilken av frekvenserna som sänds. Mottagaren detekterar de olika kanalerna och avgör vilken databit insignalen motsvarar.

Om frekvensområdet inte är för stort går det också att göra en koherent detektor med en PLL (faslåst krets).

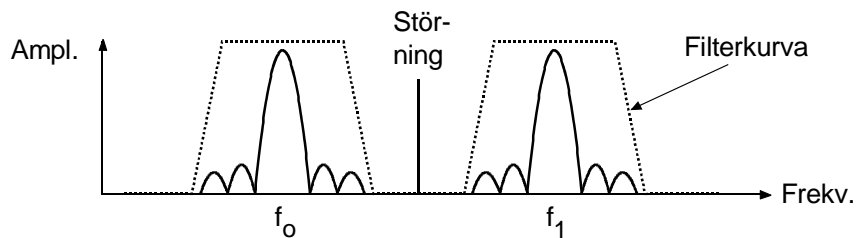
En detektor per frekvens



Bandpassfiltren är avpassade för de två respektive frekvenserna. Detektering av insignalerna sker vanligen med envelop-detektorer, som känner den totala effekten i respektive band. En komparator jämför kanalerna och avgör om det är en etta eller nolla, beroende på vilken kanal som var starkast.

Om frekvenserna ligger långt från varandra används varsin lokaloscillator (synthesizer) till respektive kanal.

Ibland utnyttjar man flera olika frekvenser, t.ex. för att motsvara flera databitar. Man kan också använda flera frekvenser per databit för att undvika störningar och fading. Det kan alltså bli ganska många parallella mottagarkanaler.

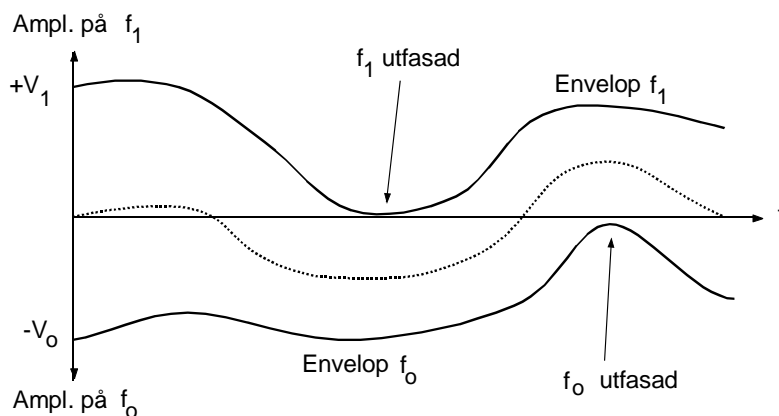


En viktig fördel med att filtrera respektive frekvens är att störningar blir bortfiltrerade så mycket som möjligt. Till och med en störning som ligger mellan de två FSK-frekvenserna kan helt undvikas.

Fädning

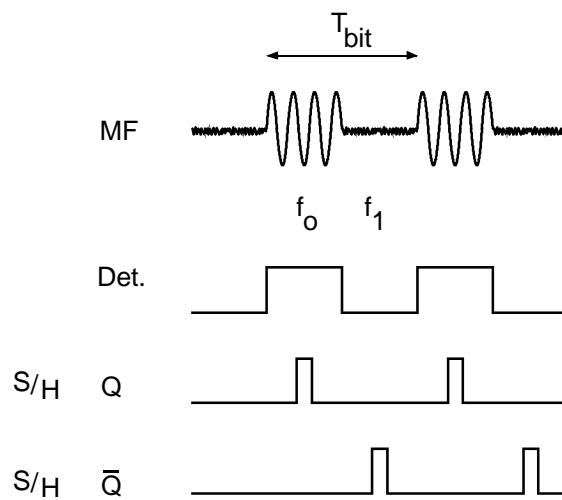
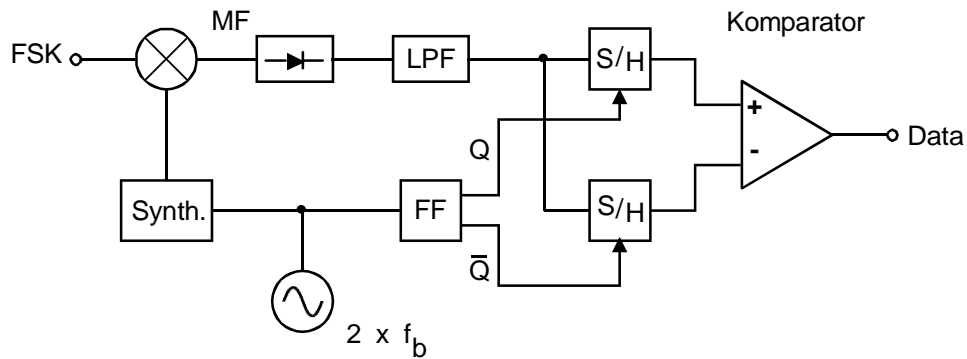
Fädning är en variation i signalstyrkan. Speciellt vid flervägsutbredning har man problem med att signalen kraftigt minskar i styrka, då olika gångvägar sammansätts i motfas.

Om man väljer de två frekvenserna ganska långt från varandra, så kommer de inte att fasas bort samtidigt. Även om den ena är borta så kommer den andra fortfarande att switchas till och från i takt med dataflödet.



Bäst är att använda en komparator med en trignivå som varierar med insignalerna. Ena detektorn ger positiv signal och den andra ger negativ signal. Trignivån är medelvärdet av enveloperna. Summan av insignalerna för tillfället jämförs med detta medelvärde. Är summan större blir det en etta, och är summan mindre blir det en nolla.

Gemensam detektor som hoppar i frekvens



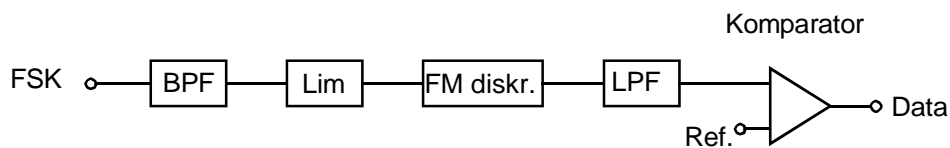
Istället för att detektera de två frekvenserna parallellt kan man detektera dem efter varandra. Syntesgeneratorn ställs först in för att blanda ner och detektera den ena frekvensen. Innan databiten har tagit slut ställs synthesizern in på den andra frekvensen, så att den också blir detekterad.

De två signalerna filtreras och jämförs. Eftersom signalerna ligger efter varandra måste mätvärdena samplas och sparas. Först triggas den ena "sample and hold" kretsen, och en halv bitperiod senare triggas den andra. Komparatorn jämför de båda sparade signalerna, och indikerar vilken frekvens som var starkast.

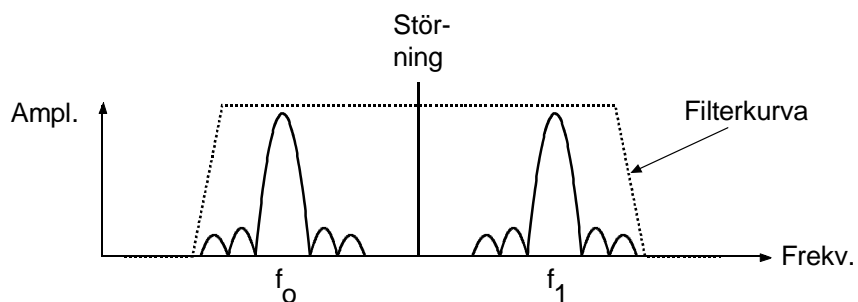
Nackdelen med att detektera i sekvens är att detektorn inte integrerar signalen över hela bitperioden, det ger sämre känslighet. Dessutom blir samplingsfrekvensen mycket hög om det är MFSK eller om man sänder på fler frekvenser (chip) per databit.

Frekvensdiskriminator

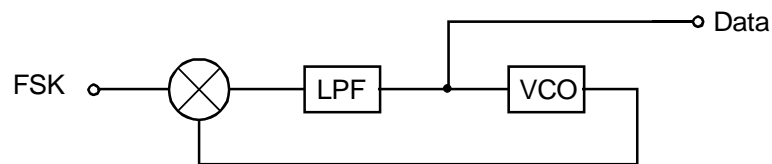
En FSK signal är en FM modulering. Det går alltså att använda någon form av FM diskriminator till demoduleringen.



Bandpass filtret tar bort störningarna som ligger utanför FSK-bandet. Limitern tar bort AM-störningar.



En förutsättning för funktionen är att det inte finns störningar eller andra signaler inom FSK-bandet.



En PLL används ofta som FM demodulator. Den kan alltså användas till FSK också. Kretsen låser till den inkommande signalen. Felspänningen från fasdetektorn styr oscillatorn så att dess frekvens hela tiden följer insignalen. När insignalens frekvens hoppar, så kommer också felspänningen att hoppa. Förutsättningen är att lågpasfiltret har så hög gränshfrekvens att den släpper igenom FM-variationerna (i Costas-loop spärrades sidbanden så att den endast följde bärvågens långsamma variationer).

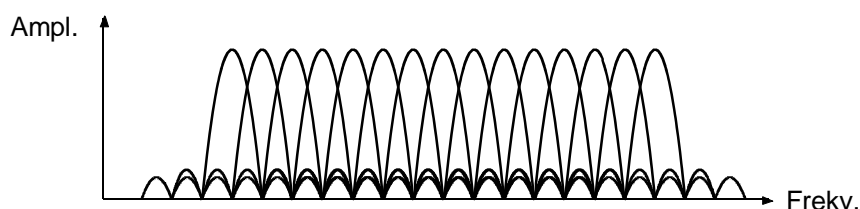
Koherent detektor

En koherent detektor kräver en bärvågsreferens till varje frekvens. De ska dessutom ligga exakt i fas med inkommande signaler. Eftersom insignalerna inte är kontinuerliga är det svårt att faslåsa referenserna. Därför används vanligtvis inte koherent demodulering av FSK.

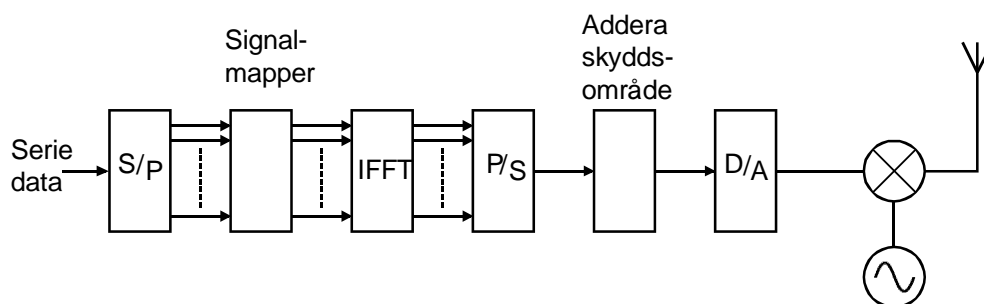
3. OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Modem med FFT

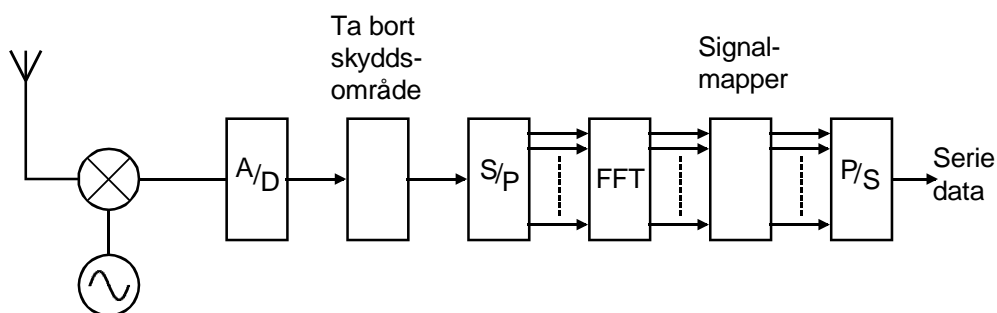


Med OFDM moduleras data på ett antal parallella frekvenser. Kanalerna ligger så tätt som möjligt utan att de påverkar varandra (de är ortogonala). Där en kanal har max signal, har grannkanalerna en amplitud som går genom noll. Med många så tätt packade kanaler, är det opraktiskt att separera med filter. Istället definieras kanalerna med hjälp av Fourier-transformering.



Dataflödet delas först upp i parallella bitar. "Signal mapper" är en digital funktion som definierar upp de olika subkanalernas frekvenser med aktuell amplitud och fas enligt dataflödet. Därefter transformeras paketet med en IFFT (invers FFT) från frekvensdomänen till tidsdomänen.

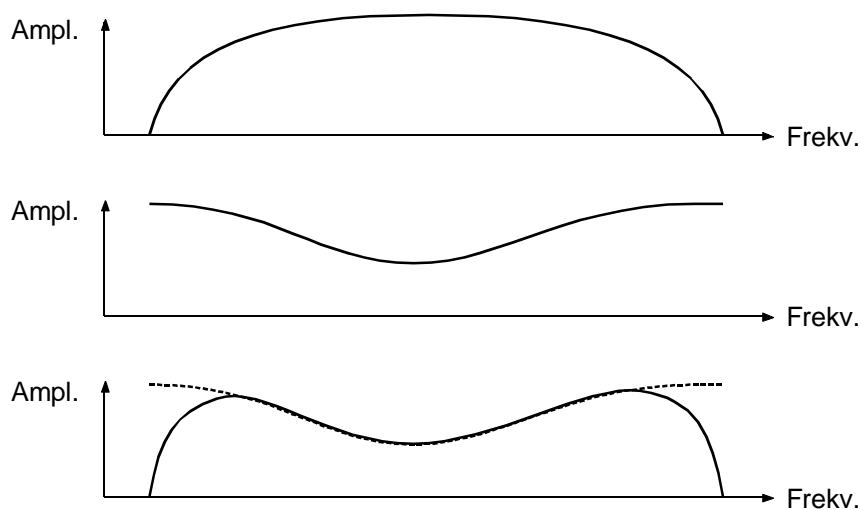
Hela tidssekvensen överförs först till seriedata och sen till en analog vågform. Det är alltså den vågform som bildas av att addera ett stort antal subfrekvenser. Signalen blandas sen upp till önskat frekvensband. Vid transmissionen kan flervägsutbredning ge spridning i tiden (ISI), därför adderas ett litet skyddsområde mellan symbolerna.



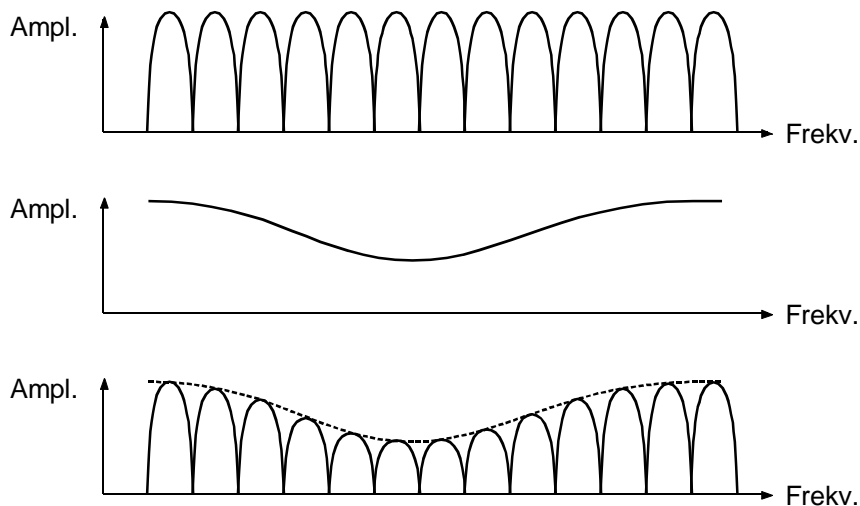
I mottagaren gör man samma sak fast åt andra hållet. Efter nerblandning samplas signalen med en A/D omvandlare. Skyddsområdet tas bort och signalen transformeras tillbaka till frekvensdomänen, dvs serie/parallell – FFT – parallell/serie. ”Signal Mapper” är den funktion som bestämmer vilka databitar som subkanalens amplitud och fas motsvarar.

Frekvensselektiv fädning

Bredbandig modulation



Seriedata behöver klockas med en hög frekvens för att kunna överföra stor information. Korta datapulser har stor bandbredd. Vid flervägsutbredning blir pulserna utsatta för frekvensselektiv fädning om spridningen i fördröjning (delay spread) är större än en symbol. De olika delarna av spektrat får då olika amplitud och fasgång. Distorsionen från utbredningen korrigeras i en equalizer. I mobila sammanhang behöver equalizern dessutom vara adaptiv. När bandbredden ökas behövs en allt mer komplicerad equalizer. Vid mer än 5 MHz bandbredd har den blivit opraktiskt komplicerad.

OFDM

Med OFDM överförs många bitar parallellt. Med låg klockfrekvens blir spektrat smalt. Paketet med de olika kanalerna kommer också att utsättas för frekvensselektiv fading. Men för varje kanal ser det mer ut som flat fading, och det kan kompenseras mycket lättare. Varje subfrekvens korrigeras både i amplitud och i fas. Ibland räcker det med en enkel AGC på respektive subkanal.

Om en kanal fädas bort helt uppstår bitfel. Men med kodning (COFDM) kan enstaka utspridda bitfel korrigeras. Interleaving, i både frekvens och tid, hjälper till att sprida ut bitfelen så att de lättare ska kunna korrigeras.

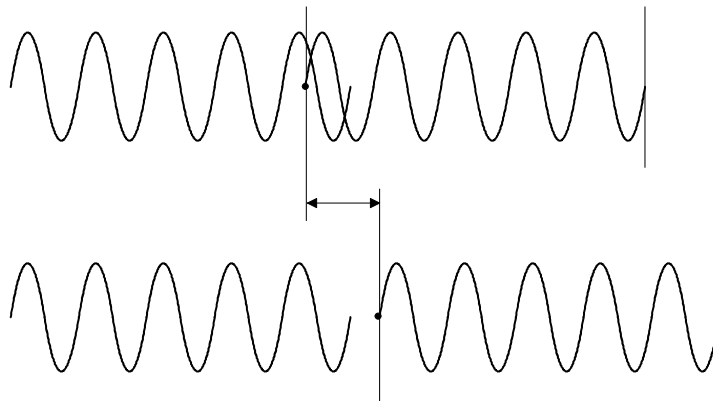
Skyddsområde i tiden



För varje symbol sänds samtliga subkanalers frekvenser i form av en sammanlagd vågform.



När sedan signalen blir utsatt för flervägsutbredning (delay spread) kommer vågformerna att överlappa varandra. Det ger störning i form av interferens mellan symbolerna (ISI). Det behövs alltså ett skyddsområde mellan symbolerna.

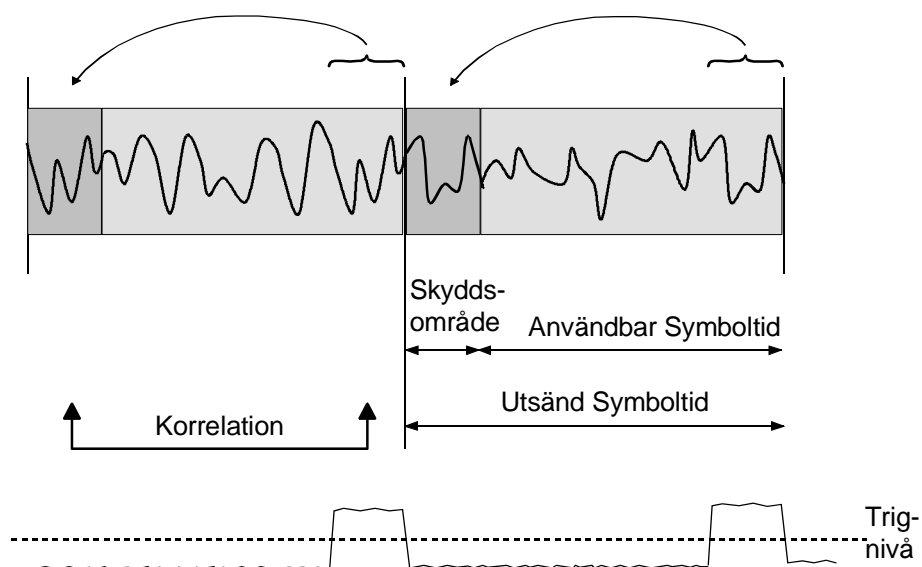


Varje subfrekvens ska demoduleras både i fas och i amplitud. Signalen får inte vara störd i början när fasen ska bestämmas. Skyddsområdet flyttar bort signalen så att den inte störs av tidigare symbol. Alternativet med ett tomt skyddsområde är inte bra eftersom kretsarna fungerar bäst med kontinuerliga signaler. En plötslig förändring i vågformen innehåller höga frekvenser som ger störningar mellan subkanalerna. Att bara förlänga pulsen räcker inte eftersom det är starten som är problematisk. Det bästa är att ta en bit av signalen i slutet och fylla på skyddsområdet i början.

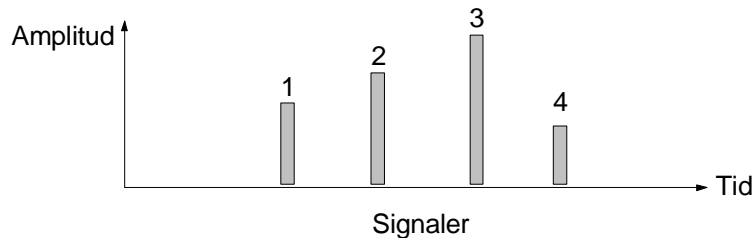
En OFDM signal innehåller många subfrekvenser som behöver skyddsområde. Men eftersom det är en linjär kombination, så räcker det att addera skyddsområdet endast en gång efter IFFT.

I mottagaren tas sedan skyddsområdet bort. Det som blir kvar är en perfekt periodisk signal, som kan transformeras med FFT, för att komma åt databitarna i varje subfrekvens.

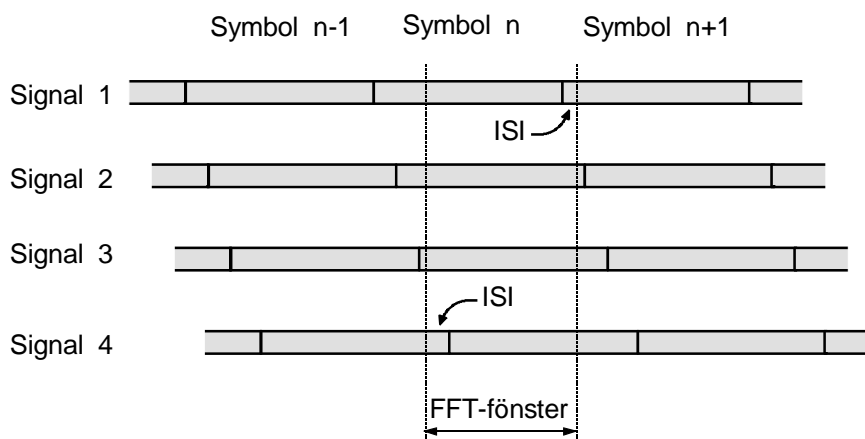
Synkronisering av FFT



Skyddsområdet har fyllts med samma vågform som i slutet av symbolen. När signalen passerar känner en korrelator av det tidsläge då signalen ser ut som för en stund sen. Korrelationstoppen kan användas för att visa när nästa symbol börjar.



Flervägsutbredning ger fördröjda signaler med olika tidpunkter för trigpulserna. Det är inte ens säkert att den första direkta signalen är den starkaste. Det finns olika strategier för att välja lämpligaste start av FFT, men det vanligaste är den tidpunkt då en signal överstiger en viss trignivå.

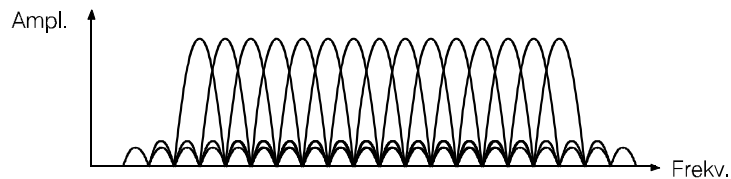


En av signalerna, t.ex. signal 2, startar FFT. Signal 3 befinner sig också inom FFT-fönstret och ger tillskott till nyttsignalen. Signal 1 och 4 innehåller förutom nyttsignal en viss mängd störning från symbolerna intill.

Modulation

Varje delfrekvens kan innehålla en eller flera databitar, beroende på hur dessa frekvenser moduleras. Modulationen kan t.ex. vara QPSK, 16QAM eller 64QAM

Offset av LO-frekvensen



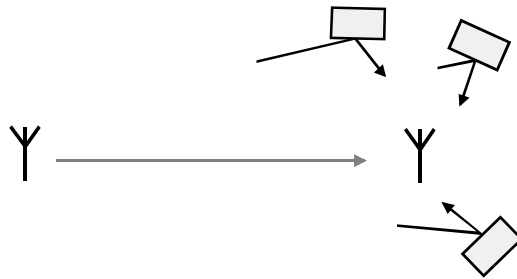
Om LO-frekvensen inte ligger rätt så sker inte samplingen på toppen av spektrat. Amplituden är fortfarande stor, problemet är att samplingen inte sker då de andra subkanalernas spektra går genom noll. Databitarna läcker över mellan subkanalerna, ortogonaliteten har alltså försämrats. Störningen är i form av gaussiskt brus, som försämrar det effektiva S/N förhållandet i systemet. För att få ett S/N på minst 20 dB behöver avvikelsen i frekvens vara mindre än 4 % av subfrekvensernas avstånd.

Fasrotationen kan korrigera LO signalens fasfel, åtminstone små fasfel inom konstellationens respektive områden. Större fasfel justeras i mottagarens "Carrier Tracking Loop".

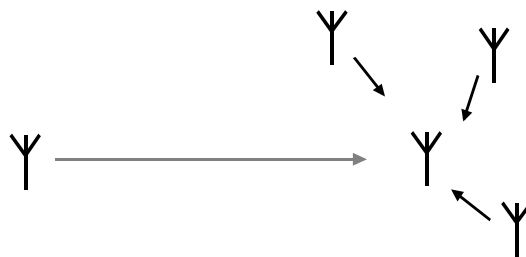
Diversitet

Det är ganska enkelt att med två separat placerade antenner få diversitet. Systemet kan ju hantera samtliga signaler, under förutsättning att avståndet mellan antennerna är mindre än skyddsområdet (Cyclic Prefix). Det behövs alltså ingen elektronik för att välja eller fassammansätta signalerna. Diversiteten tillsammans med förmågan att utnyttja reflektionerna i omgivningen gör att systemet kan fungera trots att det inte finns fri sikt.

SFN – Single Frequency Network



Med OFDM kan signalerna som reflekterats i omgivningen enkelt sammansättas med nyttosignalen. Mottagaren ser att det kommer in flera fördröjda signaler, men det går inte att avgöra varifrån signalerna kommer.



Alternativt kan det lika gärna vara flera sändare som samtidigt sänder samma information på samma frekvens. Det betyder att sändare som ska täcka olika områden inte behöver fördelas till olika frekvenser. En mottagare mellan två områden har bara fördel av att kunna ta emot signal från två håll. Men det gäller bara för de situationer då samma information sänds samtidigt. Sändarna ska alltså vara synkroniserade, från t.ex. GPS.

Fördel

Fördelen med OFDM är att parallelluppdelningen gör att symbolerna ändras mycket långsammare. En multipelreflektion hamnar inom egna symbolen, istället för att ge interferens med nästa symbol. Med skyddsområdena i tiden mellan symbolerna får OFDM ytterligare störtålighet mot multipelreflektioner.

OFDM blir så störtålig att den fungerar trots att ekona är lika starka som den direkta signalen. Mottagning kan alltså ske med mycket enkla antenner.

Impulsbrus kan också hanteras bättre med OFDM än med "single carrier". OFDM-symbolerna är så långa (hundratals μs) att energin från en kort impuls blir försumbar.

Fördelarna med SFN är att det inte behövs någon frekvensplanering. Istället för cluster med olika frekvenser blir det frekvenser lediga. Med möjligheten att utnyttja signalens reflektioner, och på vissa ställen flera sändare, blir det bättre täckning och mindre radioskugga. Ytterligare en fördel är att bandbredden enkelt kan varieras genom att välja antalet subfrekvenser.

Nackdel

En nackdel med OFDM är att det behövs en linjär effektförstärkare i sändaren. Toppeffekten är mer än 10 dB större än medeleffekten.

OFDM är också känslig för variationer i frekvens, både jitter i bärvågen och dopplerförskjutning. Det är också viktigt med tidpunkten då FFT ska starta. Det kan göra det svårt att synkronisera mottagaren.

En annan nackdel är att OFDM behöver en kraftfull signalprocessor. Men om bandbredden är 10 - 20 MHz och man använder MIMO eller adaptiva antenner, så blir OFDM enklare än CDMA.

Applikationer

I Europa har OFDM valts som standard för digital-TV (DTV) och högupplösande digital-TV (HDTV). Spektrat har då delats upp i så många som 6817 delfrekvenser. En 6 MHz TV-kanal kan överföra 24 Mb/s. Det kan användas till en HDTV-kanal (18,7 Mb/s) eller till flera kanalers DTV.

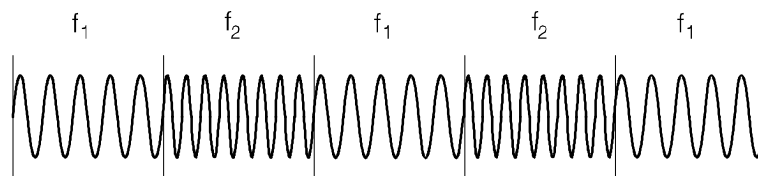
Digital rundradio (DAB = Digital Audio Broadcasting) med CD-kvalitet har också använt OFDM. DAB delade upp spektrat i 1536 delfrekvenser. På samma frekvensutrymme som en analog kanal behöver, får det plats 4 – 6 digitala kanaler.

OFDM används också under benämningen DMT (Discrete Multi Tone) för digital överföring på telefonledning (ADSL). Det kan ge ca 6 Mb/s över befintlig tvinnad parledning.

WLAN använder OFDM till dataöverföring för att få högre datahastighet. Antalet delfrekvenser är här endast 52 stycken, men ändå går det att komma upp i 54 Mb/s om man använder 64QAM på korta avstånd.

4. Sammanfattning

FSK

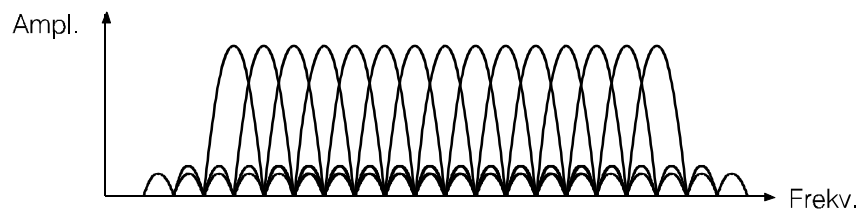


1. HF-kommunikation på långa avstånd
Kraftig flervägsutbredning
2. mm-våg
Fasjitter överväger spektrumekonomin
3. Personsökare
Demodulatorens mycket enkel

FSK demodulatorer

- | | | |
|-------------------|---|---------------------------|
| Parallella filter | ⇒ | kräver dubbla kanaler |
| Filter i sekvens | ⇒ | kräver hög sampelfrekvens |
| Koherent | ⇒ | kräver smalt hoppområde |
| OFDM | ⇒ | använder FFT |

OFDM



Stor datahastighet trots reflektioner i vågutbredningen

- | | |
|----------|-------------------------|
| 1. DVB-T | Digital TV |
| 2. ADSL | Bredband på telefontråd |
| 3. WiMAX | Trådlöst bredband |
| 4. LTE | Mobiltelefon 4G |

Spektrum Spridning

1. Inledning

Spektrumspridning (spread spectrum) innebär att signalen sprids ut över ett större spektra än vad själva informationen skulle ha behövt. Det gör man vanligtvis genom att modulera frekvensen eller fasen.

Frekvenshopp (FH-SS) används inom GSM för att jämna ut problemen från flervägsutbredning och störningar, så att de felrättande koderna fungerar bättre. Systemet dimensioneras efter interferensens medelvärde, istället för det värsta tänkbara fallet. Militär kommunikation på MHz-området använder frekvenshopp för att effektivt undvika avlyssning och störning. Snabbt frekvenshopp (FFH – fast frequency hopping) gör ett eller fler hopp per datasymbol. Långsamt frekvenshopp (SFH – slow frequency hopping) innehåller mer än en symbol per hopp.

Spektrumspridning med fashopp kallas direktsekvens (Direct Sequence Spread Spectrum, DS-SS). Den används inom mobil kommunikation för att få enklare cellplanering och något högre kapacitet. GPS (Global Positioning System) använder direktsekvens för att få hög upplösning i avstånd, dvs position. Dessutom behövs olika koder för att kunna identifiera de olika satelliterna. Mätningar görs till 4 olika satelliter. Tre avståndsmätningar behövs för att ange position, den fjärde behövs för att korrigera felen i användarens klockfrekvens.

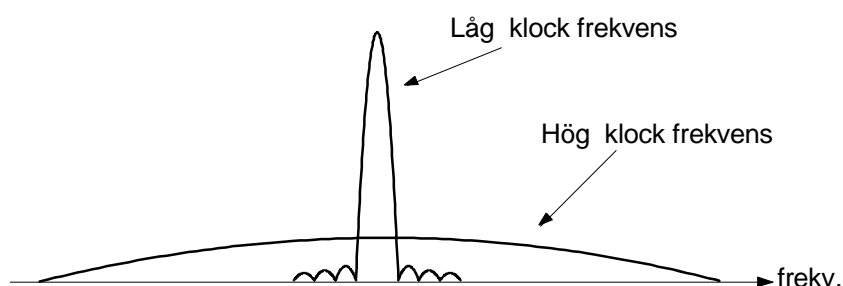
Radar använder frekvenshopp, frekvenssvep (chirp) eller bifas-modulering, för att få spektrumspridning. Målsättningen är här störtålighet, hög upplösning och låg pulseffekt. Det görs också försök med att i tiden switcha extremt korta pulser (impuls radar), som alltså har ett stort frekvensinnehåll.

W-LAN (trådlösa datanät) kan använda antingen frekvenshopp eller direktsekvens. Med DS kan man packa cellerna tätare. Det ger högre kapacitet, och högsta Process Gain. Men med QPSK behövs mer komplicerad linjär effektförstärkare. Med FH går det bra med en olinjär klass-C förstärkare. FH används i Bluetooth för att få ett billigt system. Den långsammare klockningen gör att synkroniseringen blir enklare. DS kräver mycket noggrannare inställning i tiden. DS behöver dessutom kraftfullare signalprocessor i mottagaren.

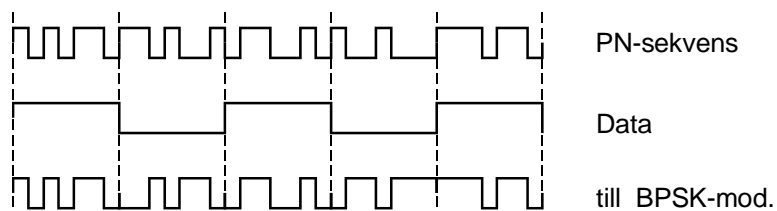
DS undertrycker störningar genom att sprida ut dem med hjälp av Process Gain. FH undviker störningarna genom att hoppa bort från dem.

2. Direkt sekvens

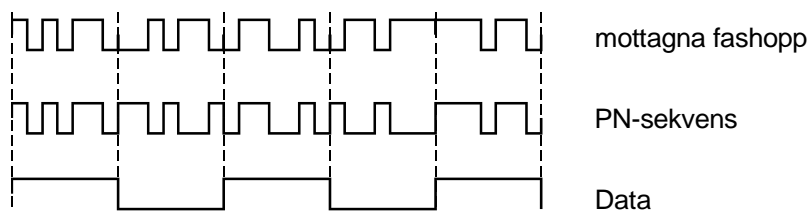
Beskrivning av modem



En bifas-modulerad signal får en spektrumbredd som beror på modulationens frekvens. Högre switchfrekvens ger större spektralbredd.



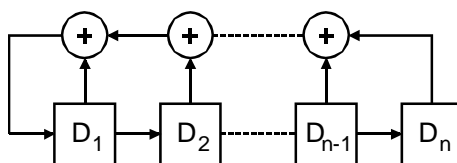
Utöver informationen moduleras bärvågen med en känd sekvens som har extra hög klockfrekvens. Det ger ett spektra med stor bredd, men med låg amplitud. Den befintliga effekten har spridits ut i spektrat.



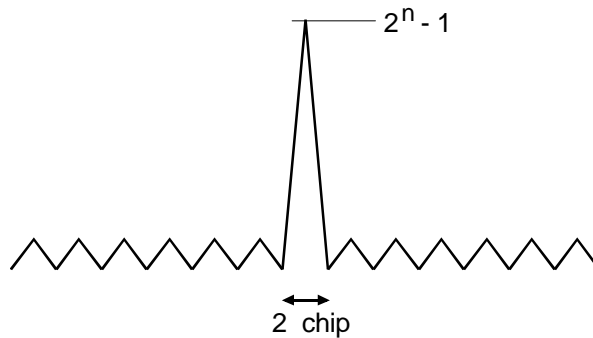
Mottagaren använder sedan samma kända sekvens för att switcha tillbaka fashoppen. Resultatet blir en signal som endast varierar med dataflödet, dvs ett smalt spektra med hög amplitud. Ökningen av amplituden kallas "Process Gain". Men det är bara signalen med den rätta sekvensen som får smalt högt spektra, stör signaler och andra signaler får inget process gain.

Dataflödets tidsintervall kallas databitar. Den höga klockfrekvensen som ska ge bandspridning, har mycket korta tidsintervall, som istället kallas chip.

PN-sekvenser



Ett skiftregister används för att alstra den kända sekvensen. Eftersom skiftregistret är återkopplat efter ett visst mönster, åtgår det många varv för att komma tillbaka till samma läge. Sekvensen blir $(2^n - 1)$ bitar lång. Olika återkopplingsnät ger olika koder. Sekvenserna har en statistisk bruslik fördelning av ettor och nollor. Det ger ett kontinuerligt bruslikt spektra (Pseudo Noise). Därför kallas de PN-sekvenser. De har alltid en mer etta än nollor. Sekvensens repetitionsfrekvens ger linjer i spektrat, och bör därför inte ligga i informationsbandet.



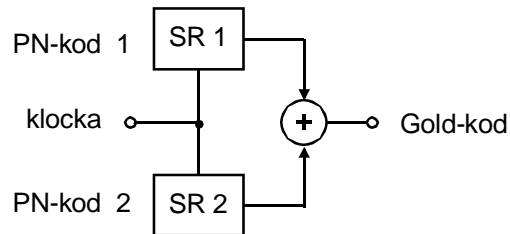
Dessutom har dessa koder en mycket distinkt autokorrelation. När två lika sekvenser ligger i fas blir utsignalen mycket stor, ($2^n - 1$). För andra tidslägen av sekvensen blir utsignalen mycket liten (± 1), dvs sidloberna är mycket små. När korrelationen mellan två signaler ligger runt noll under hela sekvensen, kallas det att de två sekvenserna är ortogonala.

Den distinkta korrelationstoppen används i en del system till att mäta avstånd. GPS använder en kod på 1,023 Mcps för att få 100 m upplösning. Om man korrigerar egna klockans fel (mäter 4 satelliter) och korrigerar vågutbredningens inverkan (differentiell GPS) kan en inmätning till en hundraleds chip ge en noggrannhet på ± 3 meter.

Eftersom sekvensen blir mycket lång, tar det lång tid att klocka igenom koden. Med 1 MHz klockfrekvens (1 μ s klockperiod) blir:

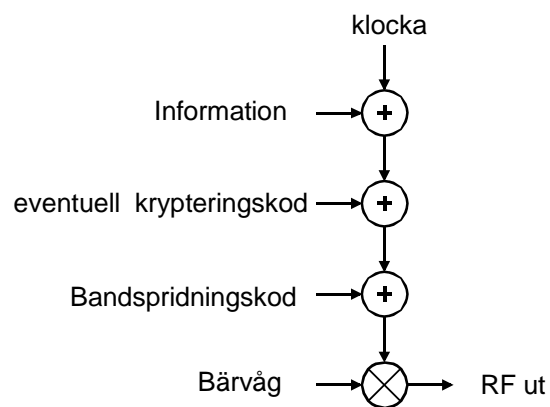
Registrets längd	Sekvensens längd	Sekvensens tid	Antal koder
7	127	127 μ s	18
10	1023	1 ms	60
17	131071	0,1 sek.	7710
31	2147483647	36 min.	69×10^6
43	879609302207	102 dagar	
61	2305843009213693951	73 000 år	32×10^{15}

Gold koder

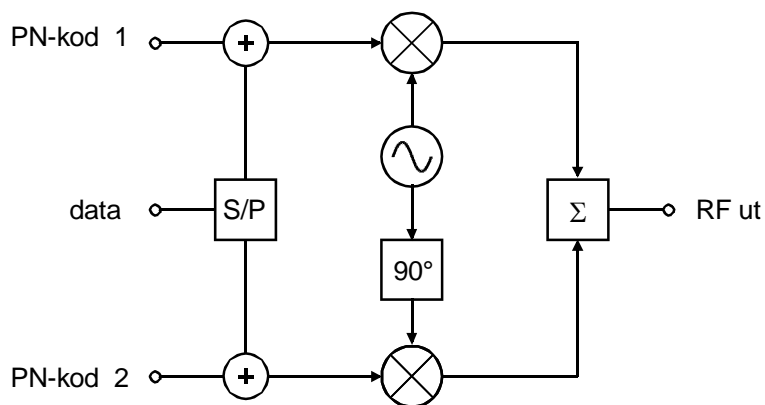


Om antalet koder inte räcker kombineras två PN-sekvenser. Det ger en ny kod för varje fasskillnad mellan de två kodgeneratorerna.

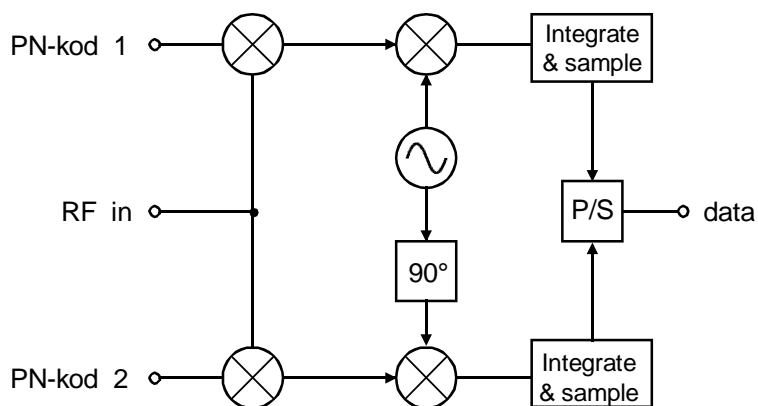
Modulering med data



Till dataströmmen adderas koden för bandspridning och eventuell krypteringskod. Därefter bifasmoduleras RF-signalen.



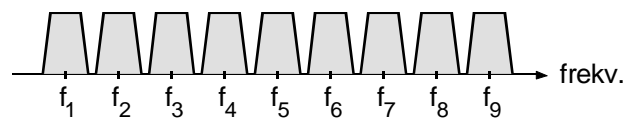
Vid QPSK kan man använda olika koder till I- respektive Q-kanalen. GPS använder en militär kod (P-code) på 10 MHz som är en vecka lång, samt en civil kod (C/A-code) på 1 MHz som är en 1023 chip lång Gold-kod.



I mottagaren måste sedan samma koder användas för respektive I- och Q-kanal. Insignalen består av RF+kod+data. Efter blandning med koderna består signalen av RF+data. Efter blandning med lokaloscillatorn består signalen av enbart data.

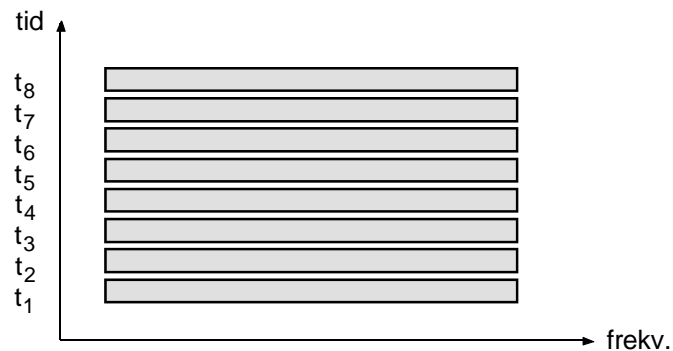
Olika typer av multipel access

FDMA



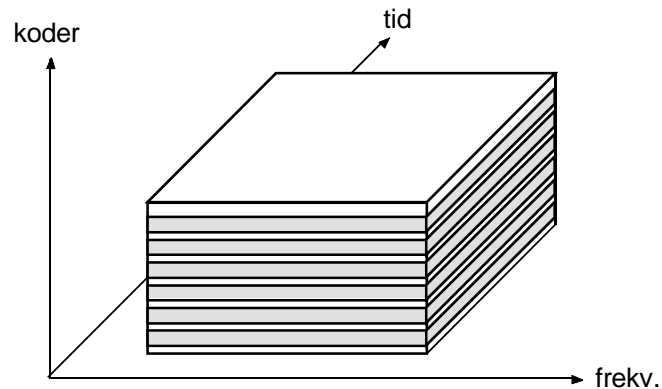
När olika kommunikationskanaler delas upp till olika frekvenser, kallas det FDMA (Frequency Division Multipel Access). FDMA är det traditionella sättet att dela upp radiokanalerna.

TDMA



Om man istället fördelar kanalerna till olika tidsavsnitt, kallas det TDMA (Time Division Multipel Access). Flera samtal sker då på samma frekvens, men inte samtidigt.

CDMA



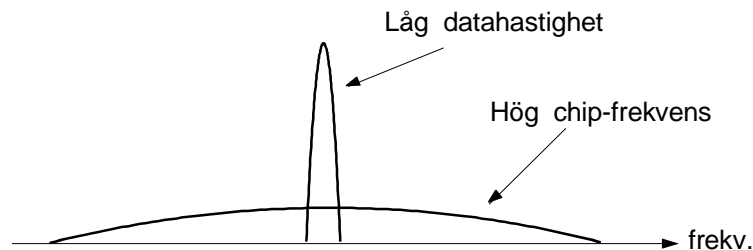
Med CDMA (Code Division Multipel Access) sänder man samtidigt på samtliga frekvenser. De olika samtalen separeras istället med olika koder.

Oavsett *hur* man snittar upp informationen, är det fortfarande samma *mängd* information som ska överföras. I praktiken ger CDMA enklare cellplanering och något högre kapacitet. Istället ställs högre krav på amplitudregleringen.

CDMA kan vara synkron eller asynkron. Synkron innebär att alla användares symboler skiftar samtidigt. De olika koderna kan då vara ortogonala, dvs användarna interfererar inte med varandra. Om de olika sekvenserna klockas oberoende av varandra, kallas de asynkrona. Interferensen mellan koderna minskar då systemets kapacitet till mindre än 10 %. Fördelen är att systemet blir mycket flexiblere.

För att snabbare få synkronisering används en pilot-signal (pilot-kod). Den kan ha lite högre signalstyrka för att få bättre signal/brus förhållande.

Process Gain



En smalbandig signal (låg datahastighet) moduleras med en bredbandig kod (hög chiphastighet). Energin i den smalbandiga signalen har fördelats över ett större spektra. Effektnivån i varje del av spektrat blir då lägre.

När sedan den bredbandiga modulationen tas bort (i korrelatorn), blir effektnivån högre igen. Det kallas "Process Gain". Process gain bestäms helt av förhållandet mellan de två bandbredderna. Eller om det är bekvämare chiphastigheten i förhållande till bithastigheten.

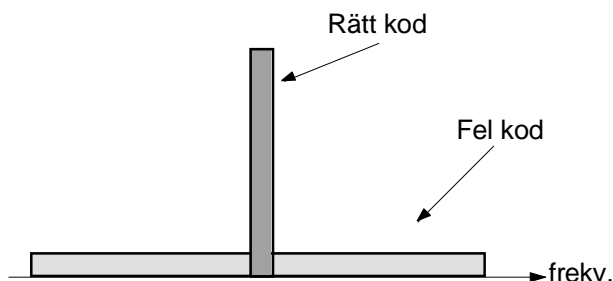
Tillskottet i process gain ger högre C/N, som behövs för att klara av flera samtidiga samtal (kapacitet). För TDMA behövs ett E_b/N_0 på 8,5 - 9 dB. CDMA kan använda kraftfullare felrättande koder. Bandbredden är ju inget problem här. Det resulterar i att man kan arbeta på lägre E_b/N_0 . Vid hög hastighet kan E_b/N_0 vara 8 dB och stillastående 3 dB, eller som ett medelvärde 6 dB.

Spread Spectrum har använts till militär kommunikation, på grund av att process gain ger en extra störtålighet. I CDMA gör störtåligheten att granncellerna kan arbeta på samma frekvens. Det behövs då ingen frekvensplanering.

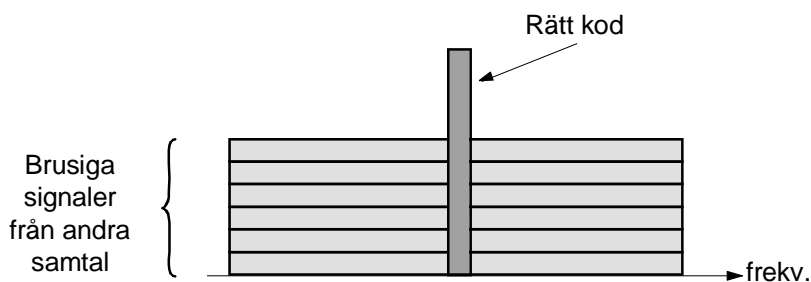
Alternativt kan process gain användas för att få lång räckvidd, eller för att systemet ska tåla många samtidiga användare (hög kapacitet).

De flesta beskrivningar av DS-SS förutsätter att övriga sändare har konventionell modulering (AM, FM och SSB). I ett CDMA-system har samtliga sändare DS-SS modulering. Det ger i praktiken betydande partiell korrelation, som resulterar i lägre process gain.

Kapacitet



Den signal som har rätt kod får en hög korrelationstopp. Fel kod har inte komprimerats, utan är fortfarande bredbandig med låg amplitud. Långa koder har ett bruslikt spektra. Det ger då ett visst signal/brus förhållande.



Fler signaler ger ytterligare brustillskott. Dessutom tillkommer spikar i spektrat från partiell korrelation, speciellt då sekvenserna inte är synkroniserade.

Om alla stationer har samma uteffekt, kommer de närmaste att bli starkare och de längre bort allt svagare. En fjärran station blir då dolt av de andra stationernas sammanlagda brus. För att nå så långt behöver bruset, dvs antalet stationer, minskas. Kapaciteten blir då så låg som för befintliga analoga FM-system. Därför regleras samtliga stationer så att de får samma signalstyrka framme vid basstationen.

Då antalet abonnenter ökar, blir sammanlagda bruset större. De fjärran stationerna kommer då att öka amplituden. Men så småningom uppnår de max uteffekt. Då måste de flyttas närmare för att få tillräckligt signal/brus förhållande vid basstation.

Det betyder att det finns en kompromiss mellan kapacitet och räckvidd. I storstäderna blir cellerna mindre, och på landsbygden blir cellerna större.

Det är inte enbart den egna cellens stationer som brusar. Av det totala bruset kommer 36 % från de kringliggande cellerna.

Kapaciteten blir ca 24 samtal/cell. Det är lägre än vad TDMA skulle ge på motsvarande bandbredd. Finessen är att samma frekvenser kan användas i intilliggande celler. Det ger CDMA högre kapacitet än TDMA.

Om man vill öka kapaciteten måste man alltså minska interferensen. Förutom amplitudkontrollen kan man dela upp sändningen i sektorer, luta antennloben neråt (downtilt) eller välja hand-over som minskar störningarna.

Reglering av amplituden

För att alla mobiler ska ha samma nivå vid basstationen, måste amplituden kontinuerligt regleras. En grov inställning kan göras genom att mobilen mäter upp den mottagna nivån. En stark mottagen signal betyder att sändaren inte behöver ha så hög uteffekt. Reglering med öppen slinga ger tyvärr inte tillräcklig noggrannhet. Felet kan bli flera dB. Dessutom sker sändning och mottagning på olika frekvenser, med olika vågutbredning.

Reglering med slutna slinga bygger på att basstationen mäter E_b/N_0 och sen talar om för mobilen att effekten behöver ökas respektive minskas. Justeringen är 1 dB ökning eller minskning. Överföringen av dessa 800 korrektioner per sekund sker i datakanalen. Dynamikområdet för den slutna slingan är ± 24 dB. Fortfarande behövs den öppna slingans reglering eftersom det totala dynamikområdet är 85 dB.

Den slutna slingan kanske inte hinner med att reglera för den allra snabbaste variationen vid flervägsutbredning, men det är vid snabba variationer som kodning och interleaving är som effektivast.

Soft hand-over

Vid cellens ytterområden är signalerna från två baser ungefär lika starka. Mobilen kopplar då upp till båda baserna samtidigt. För varje frame väljs den som är starkast. Mobilen får då en viss diversitetsvinst, macrodiversitet. Det förbättrar täckningen i dessa områden. Dessutom blir överflyttningen mellan basstationerna mjukare. Den nya länken kopplas in innan den gamla bryts.

De olika basstationerna sänder på samma frekvens. Hand-over sker genom att justera koden till den nya basen. Det är lättare än att byta frekvens. Nackdelen med denna kommunikation i parallell, är att kapaciteten minskar. Macrodiversitet är ett viktigt tillskott till kapaciteten i micro-celler.

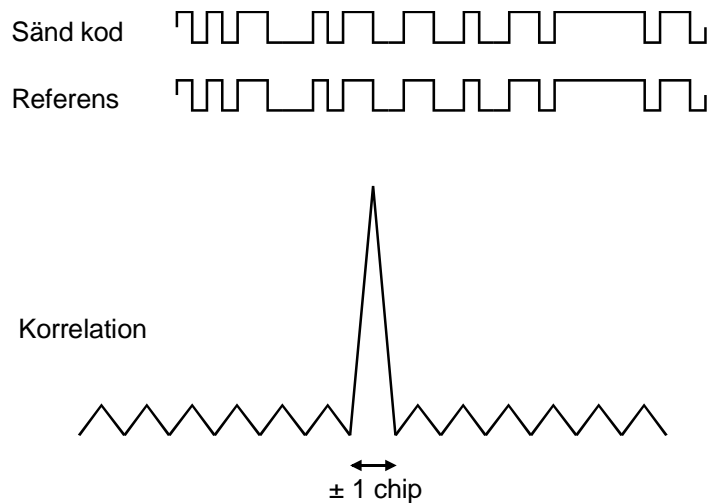
I macro-celler är fördröjningarna från multipelreflektionerna så stora, att de kan adderas i en Rake-mottagare. Det ger så stort signaltillskott att vinsten med macrodiversiteten blir för liten.

En basstation kan vara uppdelad i flera sektorer. När en mobil förflyttas mellan sektorerna gör den en soft hand-over inom samma basstation. Det kallas då softer hand-over.

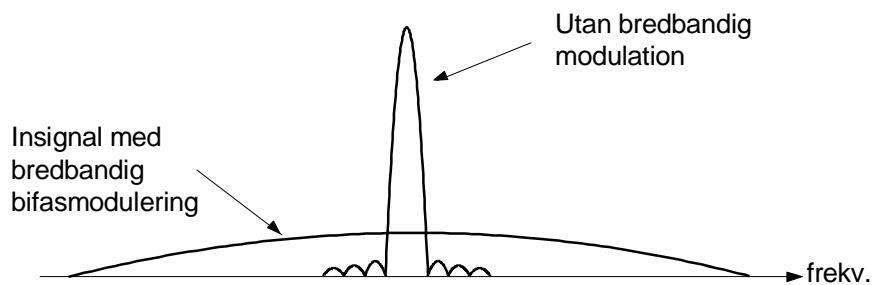
3. DS demodulator

Korrelatorns funktion

En mottagare för Spread Spectrum med direktsekvens (DS-SS), behöver en kodgenerator som alstrar den rätta koden. De två koderna jämförs för att se hur lika de är.

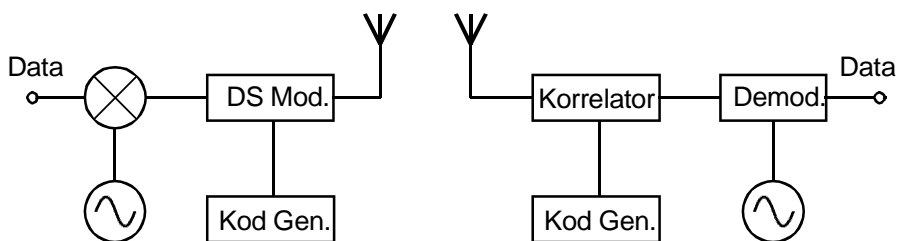


När den lagrade koden är inställd till samma fasläge som den inkommande signalens kod, är signalerna lika under samtliga delar av sekvensen. De många likheterna adderas till en stor signal. Om fasläget är fel, eller om det är fel kod, kommer olika delar att vara motriktade varandra. Lämpliga koder har en distinkt korrelationstopp, och för övrigt låga sidlobar.



En signal som har bifasmodulerats med den höga chipfrekvensen (koden) får ett pulsspektra med bred lob. Effekten har spridits ut över ett stort spektra. Varje del av spektrat har då låg amplitud.

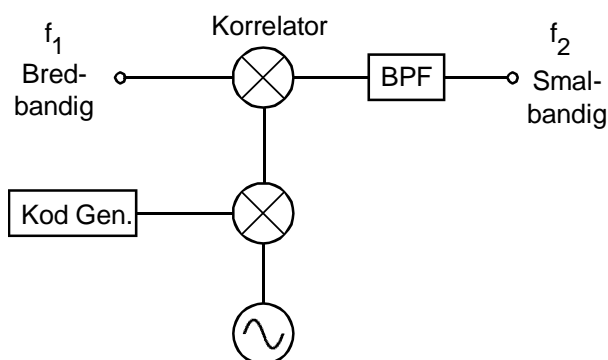
I mottagaren kommer den lagrade koden att vända tillbaks fasen på exakt samma ställen. Resultatet blir en signal utan fashopp. Effekten samlas då inom ett smalt spektra, till en hög amplitud.



Den ursprungliga signalen har först modulerats bredbandig i sändaren, sen har den bredbandiga modulationen tagits bort i mottagaren. Den information som fanns med från början kan nu demoduleras.

Heterodyn korrelator

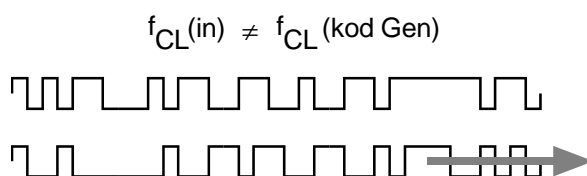
Det som skiljer en korrelerad signal från en störning är process gain. Störningar får inte läcka igenom korrelatorn (mixern). Isolationen måste vara större än process gain.



Om process gain är mycket stort räcker det inte med isolationen i en mixer. Men om man samtidigt blandar sig till en annan frekvens, kan läckaget lätt filtreras bort.

Synkronisering

Den rätta koden är antingen känd från början, eller blir tilldelad av systemet. Problemet är att hitta det rätta fasläget.



Det vanligaste sättet att hitta synkronisering är att ändra klockfrekvensen på referensen. Det för med sig att de två koderna förskjuts i förhållande till varandra (sliding correlator). Referensen glider i fas, tills de två sekvenserna kommer i fas. Det ger en korrelationstopp som återställer klockan till rätt frekvens.

Nackdelen är att det kan ta ganska lång tid att hitta synkronisering, speciellt om det är långa koder. Varje stegning av fasen måste mätas upp under så lång tid som bestäms av efterföljande filter. Och stegningen måste vara mindre än en chip, för att det ska bli en triangelformig korrelationstopp. Resultatet är att det kan ta timmar, eller rent av år, att hitta synkronisering. Sliding correlator kompletteras därför ofta med andra metoder.

Ett sätt att snabba upp förloppet är att först testa rimligheten med en kort integrationstid. Om uppmätningen tydligt pekar mot låg korrelation, behöver inte mätningen fullföljas. Är det möjligt att det kanske finns korrelation, fortsätter integrationen hela tidsperioden (som efterföljande bandbredd kräver).

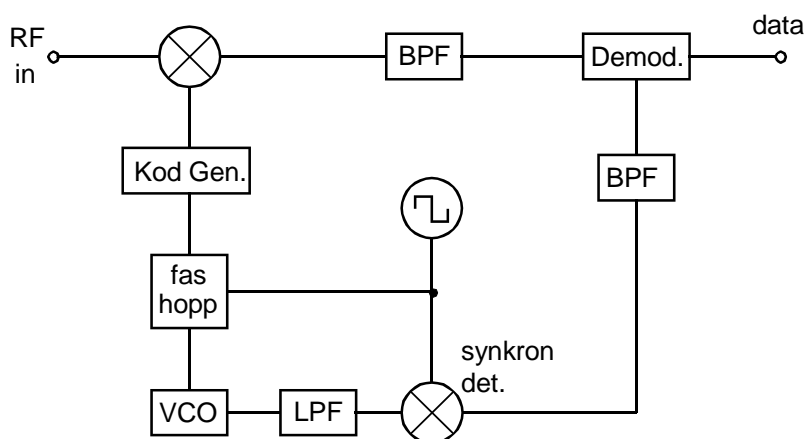
Om koden är mycket lång, kan man välja att systemet ska sända en liten kort kodsekvens (preamble), som går snabbt att synkronisera till. Den korrelationstoppen ställer sedan in den långa kodens fasläge. Nackdelen är att den korta koden får motsvarande lägre process gain. Den blir alltså känsligare för störningar under inställningen.

Ett annat sätt är att sända över information om fasläget. Eller sända över information om det rätta tidsläget, antingen från satellit (GPS) eller genom det egna systemet.

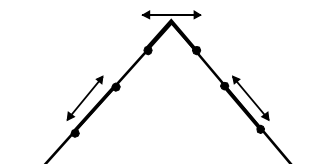
Tracking

När synkroniseringskretsarna har hittat korrelationstoppen, kopplar mottagaren istället in en trackingkrets för att låsa synkroniseringen till inkommande signal. De vanligaste trackingkretsarna är Tau-Dither och delay-lock.

Tau-Dither



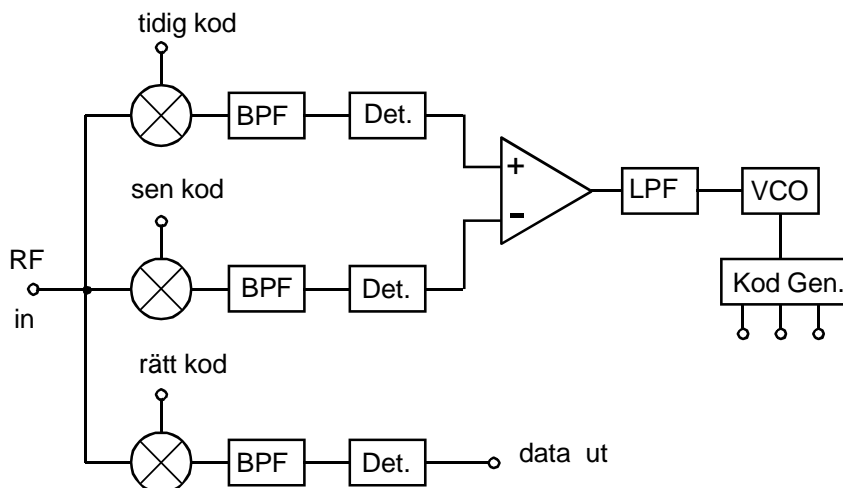
Tau-Dither är ett vibrerande servo. I det här fallet är det klockan som hoppar fram och tillbaka i fas i takt med en lågfrekvent fyrkantvåg. De olika faslägena representerar olika punkter på korrelationstoppen.



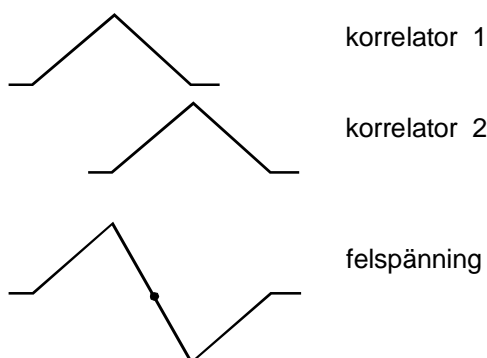
Den AM-modulerade felspänningen synkrondetekteras, och likspänningen styr klockoscillatorn (VCO). Polariteten på felspänningen justerar klockoscillatorn till korrelationstoppen, från ena respektive andra hållet. Jämvikt sker då faser hoppar lika mycket åt vardera hållet från toppen. AM-signalen har då amplituden noll.

Nackdelen med Tau-Dither är att den under låsning aldrig ligger högst på korrelationstoppen. Den hoppar ju hela tiden mellan lite före och lite efter. Men känslighetsförsämringen blir måttlig om hoppen är små i förhållande till chiptiden. Ett fashopp på $1/5$ chip ger ca 1 dB försämring från toppen.

Delay-Lock



Delay-Lock tracking gör sin faslåsning med hjälp av två separata korrelatorer, som matas lite olika i fas. Skillnaden i fas mellan de två koderna är vanligen en eller två chip.



Eftersom koderna har olika faslägen, blir korrelationstopparna sidoförskjutna i förhållande till varandra. Vid summeringen vänds den ena korrelationstoppen. Det ger en utspänning som har ett linjärt område som går genom noll. Felspänningen kommer således att låsa klockoscillatorn till nollgenomgången.

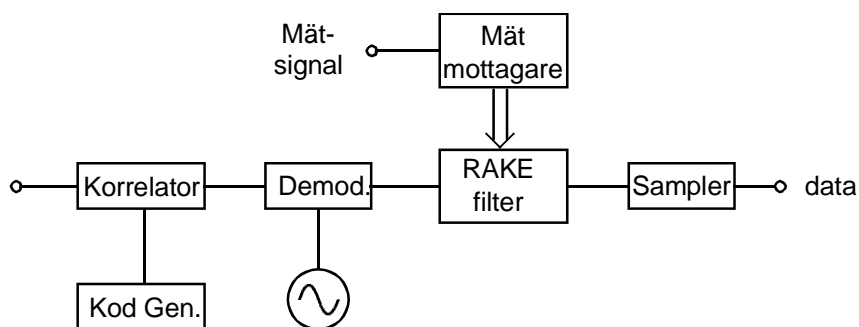
För att demodulationen av informationen ska få korrelation på toppen, behövs ytterligare en korrelator med det önskade fasläget.

Rake mottagare

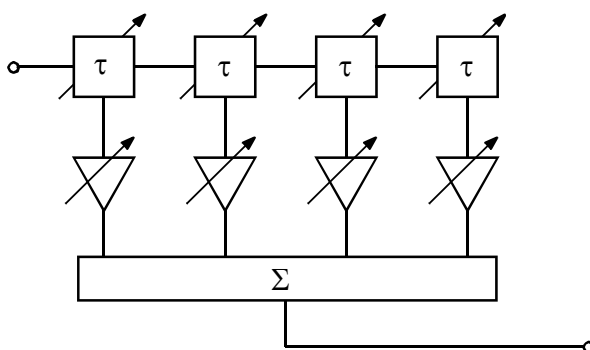
Vid flervägsutbredning (reflektioner) får man flera tidsfördröjda signaler i mottagaren. En vanlig mottagare ser det som distorsion, som måste korrigeras med en equalizer.



Ett DS-system får de olika fördröjningarna uppsorterade till olika korrelationstoppar. Åtminstone om de är åtskilda mer än ett chip. Med motsvarande fördröjningar i mottagaren kan de olika signalerna sammansättas till en gemensam stor signal.



För att kunna ställa in summeringen av de olika delarna, behöver man veta hur kanalens vågutbredning ser ut. Med en känd signal mäter man upp kanalen (sounding receiver). Uppmätt fördröjning och amplitud används för att ställa in Rake-mottagaren.



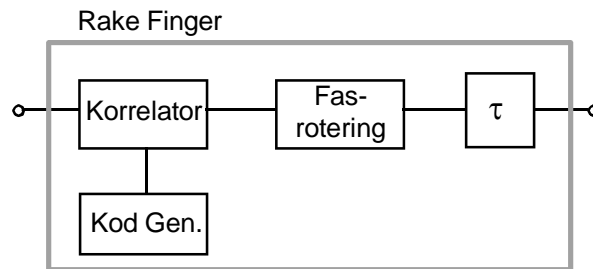
Rake-mottagaren består av fördröjningar och amplitudvägningar. Det är alltså ett transversellt filter (finite impulse response filter). Vanligtvis brukar Rake-mottagaren ha 2 - 8 armar (fingrar) till summeringen.

Rake-mottagaren kan därför betraktas som ett matchat filter, som är anpassat till vågutbredningen i kanalen. DS-demodulatore kan på samma sätt ses som ett matchat filter, som är anpassat till den utsända signalen. Uppmätningen av kanalen (sounding receiver) kan betraktas som ett matchat filter, som är anpassat till testsignalen (sounding signal) t.ex. en särskild kodsekvens.

Förutsättningen är att fördröjningen (delay spread) i kanalen är större än en chip. I städer kan fördröjningen vara ca $1 \mu\text{s}$, det motsvarar 1 Mcps. Inomhus kan fördröjningen vara ca 200 ns. Det kräver då en chipfrekvens på minst 5 Mcps. Då fördröjningen är för kort för Rake-mottagaren får signalen distorsion, precis som för andra typer av system.

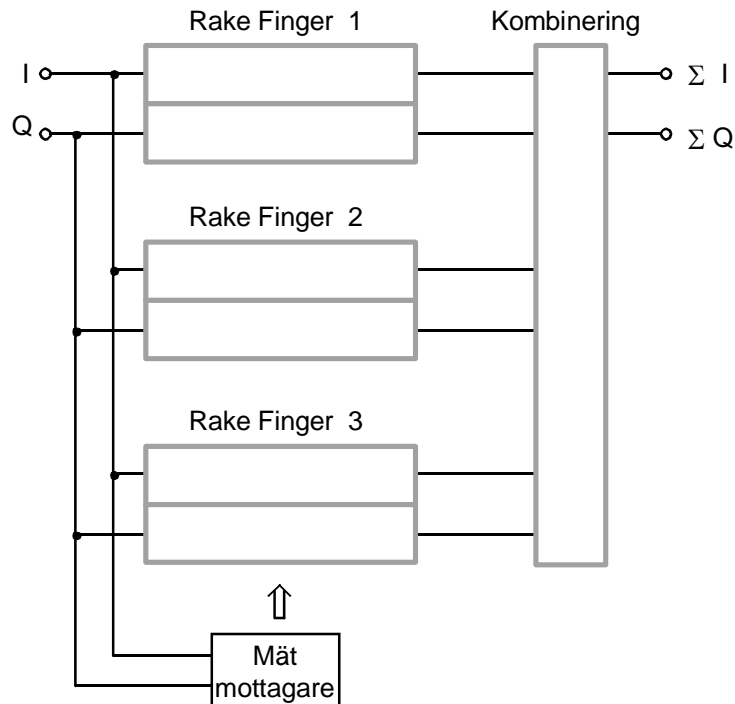
UMTS FDD har en chiplängd på $0,26 \mu\text{s}$. Det motsvarar en skillnad i gångväg på 78 m.

Rake fingrar



Vanligtvis innehåller varje Rake-finger en korrelator med tillhörande kodgenerator. Kodgeneratoren ställs in till den önskade fördröjningen för aktuellt Rake-finger. På utgången sitter en kompenserande fördröjning så att alla fingrar får ut sina signaler samtidigt.

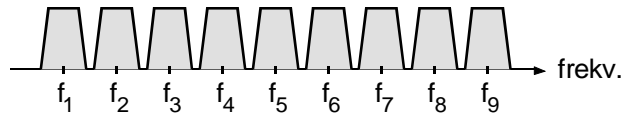
Rake-fingret innehåller också en fasroterare som ska kompensera för fasvariationer i vågutbredningen. Den ska vara så snabb att den kan kompensera för snabb fading.



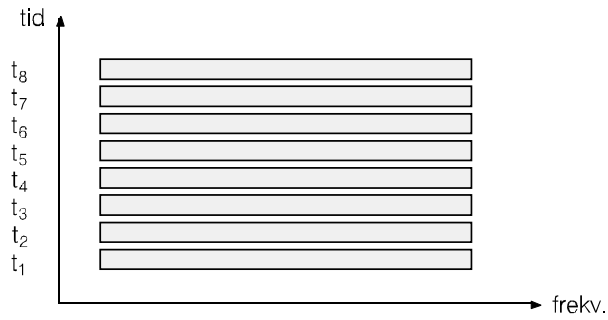
Varje finger har en dubbel uppsättning kretsar för att hantera både I- och Q-kanalen. Vid summeringen på utgången kan de olika fingrarna vägas beroende på aktuell signalstyrka i respektive reflektion. Ett ännu bättre sätt är att väga delsignalerna beroende dess signal i förhållande till störningar. Det kallas Maximal-Ratio-Combining och kan ge ett bra S/N förhållande även om inte delsignalerna har det. Det enklaste alternativet att fasa ihop signalerna utan amplitudvägning ger också ett ganska bra resultat.

Signaler från olika antenner kan hanteras på samma sätt som multipelreflektionerna som kommer in i en antenn.

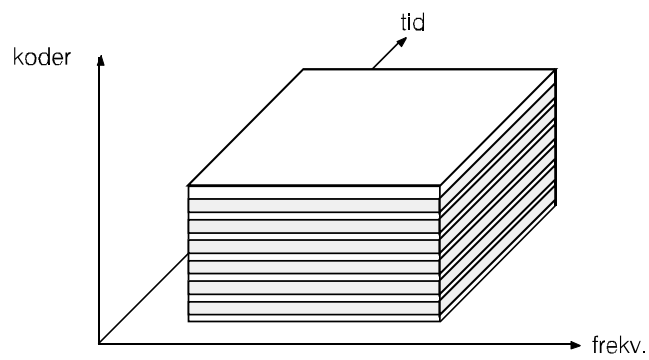
4. Sammanfattning



FDMA Frequency Division Multiple Access

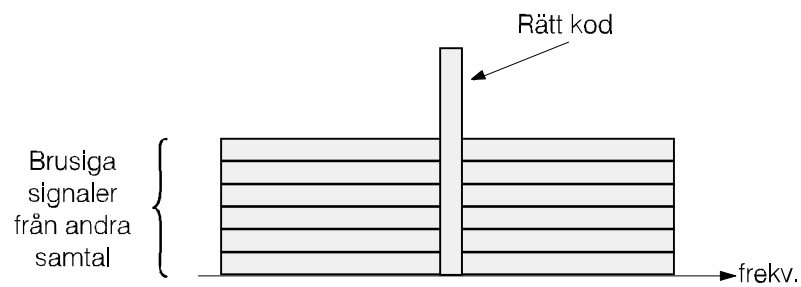


TDMA Time Division Multiple Access



CDMA Code Division Multiple Access

DS demodulering



Data + kod.gen. \Rightarrow Spread Spectrum

Spread Spectrum + kod.gen. \Rightarrow Data

Kräver: Rätt kodsekvens
Rätt fasläge av koden

Tracking: Tau Dither
Delay Lock

Rake mottagare: Tillskott från flervägsutbredning

Mobiltelefon

1. Inledning

Med mobiltelefon menas ett trådlöst telefonsystem med små handburna terminaler (telefonapparater), till en stor del av befolkningen. Befintliga radiokanaler räcker inte till en så stor kapacitet. Geografin delas därför upp i ett stort antal små celler med kort räckvidd. Varje frekvenskanal kan då återanvändas många gånger på olika platser.

Till att börja med används ganska stora celler för att få stor täckning. Nästa steg är att öka kapaciteten med hjälp av mindre celler samt ytterligare frekvensband.

Första generationens mobilsystem använde analog FM-modulering. Andra generationen gick över till digital modulering, för att få högre kapacitet och enklare switchnät.

GSM är det mobilsystem av andra generationen som fått störst spridning. Det är en öppen standard, med väl definierade gränssnitt. Det gör att man kan kombinera enheter av olika fabrikat. Det är inte bara ett radiointerface, utan ett komplett specificerat nätverk. Olika operatörer kan därför samarbeta och flytta över samtalen till varandras nät (de har roamingavtal). Man kan därför använda sin mobiltelefon även i andra länder hos andra operatörer.

CDMA är ett sätt att separera de olika kommunikationerna. Första generationen separerade trafiken till olika frekvenser. Andra generationen använder både frekvensuppdelning och separering i tidsluckor. Tredje generationen använder en separering med hjälp av koder. I USA finns ett system med smalbandig CDMA. Europa och Asien har kommit överens om ett system med bredbandig CDMA.

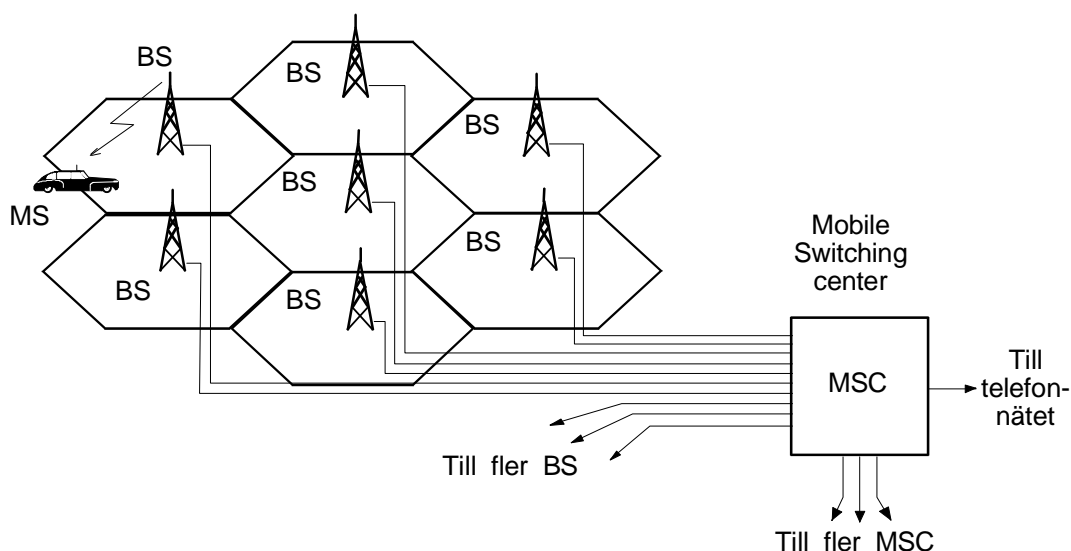
Tredje generationen använder större bandbredd, för att överföra mer information och datatrafik. Det skapar nya användningsområden förutom att använda mobilen till samtal. Terminalerna kan arbeta i olika moder och på olika frekvensband, för att välja det system som är lämpligast för tillfället.

Den fjärde generationen för med sig ännu högre datahastighet och bättre utnyttjande av spektrat. Modulationen har valts till OFDM.

2. Cell-radio

Det krävs två radiokanaler för att få dubbelriktade samtal. Med tillgängliga frekvensband får man bara plats med ett fåtal kanaler.

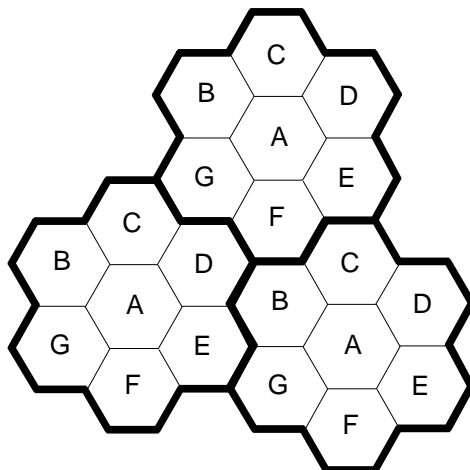
Mobiltelefoner använder cell-radio för att få ett stort antal telefonförbindelser samtidigt.



Det geografiska området delas upp i ett stort antal små celler, med en basstation i varje cell. En grupp intilliggande celler använder olika frekvenser. Nästa grupp celler (cluster) kan använda samma frekvenser. Eftersom motsvarande cell hamnar så långt bort, och sändarna har låg effekt, blir störningarna inom banden små.

Genom att återanvända samma frekvenser på många olika platser, får man mycket hög kapacitet.

Vid förflyttning kopplas samtalet automatiskt mellan de olika basstationerna, så att användaren upplever det som en obruten uppkoppling. Överflyttningen kallas hand-over (Eng.) eller hand-off (Am.)



Ett cluster kan bestå av t.ex. 3 , 4 , 7 , 9 eller 12 celler. Med färre celler per cluster kan man använda fler kanaler i varje cell. Men med ett fåtal celler i clustret blir det kortare avstånd till motsvarande cell i nästa cluster. Dessa celler, som använder samma frekvens, kommer då att störa varandra (co-channel interference). Clustrets storlek blir alltså en kompromiss mellan systemets kapacitet (antal kanaler) och dess kvalitet (på grund av störning).

Anledningen till att det räcker med 7 celler/cluster, är att signalens styrka avtar snabbare än i fri rymd (R^{-2}). Exponenten är vanligtvis 3 - 4 för markbaserad cellradio.

celler / cluster	C / I
3	- 11 dB
4	- 13
7	- 18
9	- 20
12	- 23

Tabellen gäller för rundstrålande antenner och vågutbredning med exponenten 4.

Cellernas diameter är vanligen ca 30 km på landsbygden. Med GSM kan maximala avståndet (radien) vara så stor som 35 km. I stadsregioner är cellerna mycket mindre, ca 2 km. När man rör sig från en cell till nästa, kopplas samtalet automatiskt över till motsvarande basstation (hand-over).

Frekvenser

De flesta systemen för mobilradio arbetar på frekvensbandet 900 MHz. I tät befolkade storstäder kan man behöva gå upp till 1800 MHz för att få tillräcklig kapacitet. Ju högre frekvens desto mindre blir cellerna. Det ger 4 gånger så många användare per MHz per km². I USA och på några andra platser används istället banden 800 MHz och 1900 MHz.

Några system arbetar på 450 MHz bandet. Det ger större celler och har alltså använts för att täcka stora glest befolkade områden.

Microcell

För att få högre kapacitet används mindre celler. En microcell har en räckvidd på några hundra meter. Det får plats ca 10 celler / km². Basstationens antenn är monterad på en husvägg. Strålningen sker då längs gatorna istället för över hustaken. Dämpningen runt ett gathörn är i storleksordning 20 dB

En macrocell har en mycket större räckvidd. GSM klarar upp till 35 km. Antennerna placeras då några meter ovanför hustaken eller i en hög mast.

De olika typerna av celler används tillsammans. Microcellerna används för att få högre kapacitet på vissa gator eller små områden. Macrocellerna behövs för att klara snabbt rörliga mobiler och för att ge en full täckning av hela området. Den överlagrade macrocellen kallas ibland för paraplycell. Den kan innehålla några tiotal mikroceller. Microcellen kan kallas för "Hot Spot". Vanligtvis lånar Hot Spot sina frekvenser från en macrocell.

En uppdelning till mindre celler kallas cell-splitting.

Om det behövs riktigt stor kapacitet, ligger microcellerna intill varandra. Med hand-over mellan microcellerna får man ett kontinuerligt lager microceller. Det kan gälla ett område i en stad eller längs en högt trafikerad motorväg. Vid kontinuerliga microceller blir speciella frekvenser tilldelade microcellernas lager.

Mikroceller med 4 Tx/cell får en kapacitet på 200 – 300 Erlang/km².

Erlang

Cellradio bygger sin funktion på ett mycket stort antal mobilstationer, som används mycket sällan. Erlang är ett mått på trafikintensiteten, och beror på hur ofta och hur länge samtalen sker.

$$1 \text{ E} = \frac{\text{antal samtal} \times \text{medellängd}}{3600} \quad \text{krets / tim}$$

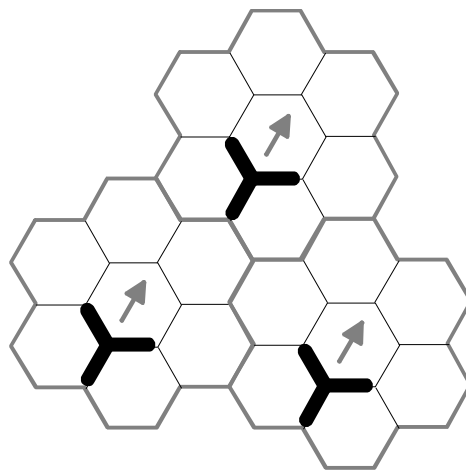
Vanligtvis används ca 0,017 Erlang per användare. Ett systems kapacitet kan anges med antalet Erlang/km². Det första steget i ett mobilnätets utbyggnad gäller att få täckning. Kapaciteten blir då ca 25 Erlang/km². Nästa steg är att öka på kapaciteten till ca 400 Erlang/km².

En picocell inomhus har en storlek på ca 10 · 60 meter. Med en kapacitet på 2 Erlang, blir det ca 3000 Erlang / km² /våning.

En väl utbredd användning av mobiltelefon som motsvarar de trådbundna telefonerna till hemmen, behöver en kapacitet på 0,066 Erlang per användare.

Sektorceller

För att öka kapaciteten måste storleken på clustren minskas. Antennerna är monterade på höga byggnaders tak eller i höga master. För att slippa betala hyra för fler antennplatser, byts de rundstrålande antennerna ut mot antenner som är riktade i olika sektorer.

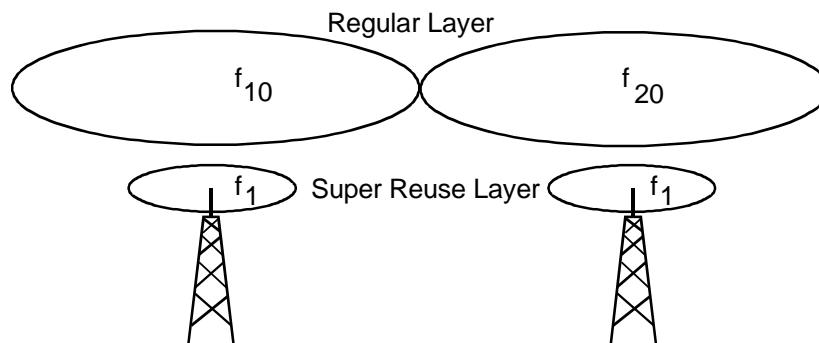


En typisk riktantenn har minst 21 dB förhållande mellan huvudlob och backlob. Interferens inom det egna frekvensområdet (co-channel) kommer då endast in bakifrån (backlober och reflektion). Därigenom minskar interferensen i det egna bandet ner till hälften. Interferensen minskar ytterligare om man lutar antennloberna neråt 3 - 10°.

En övergång från 7-cellers omni-cluster till 4 cellers cluster med 3 sektorer per cell, ger samma störnivå men en ökning i kapacitet på 1,75

Rundstrålande antenner (en sektor) används i små celler, det vill säga microceller och inomhusceller. Uppdelning med 2 sektorer är lämpligt längs motorvägar och järnvägar. Macroceller använder som standard 3 sektorer. Om det behövs stor kapacitet i en macrocell kan den vara uppdelad i 6 sektorer.

Cellens uppdelning i lager



I närheten av basstationen är signalen mycket stark, i förhållande till störningarna från andra celler. Signal/stör förhållandet C/I är där stort. Samma frekvenser kan då återanvändas i samtliga celler. Det resulterar i mycket hög kapacitet.

Naturligtvis måste det finnas ett reguljärt lager med olika frekvenser, för att klara områdena längre ut som har starka störningar, det vill säga litet C/I . Tekniken med samma frekvens i cellernas närområden har kallats IUO (Intelligent Underlay Overlay).

Genom att fördela de tillgängliga frekvenserna till de två lagren, kan kapaciteten höjas med 30 %.

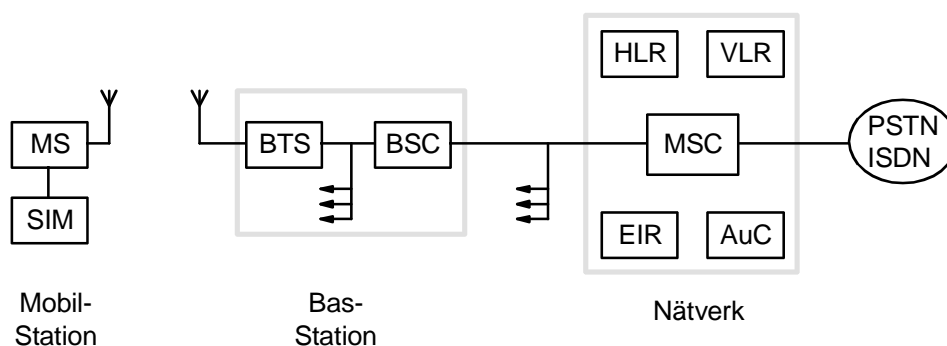
Sammanfattning

Cellradio karakteriseras av:

- Låg effekt, för att få små celler
- Återanvändning av frekvenserna (frequency reuse)
- Hand-over mellan cellerna
- Cell-splitting för att få högre kapacitet

3. GSM systemet

GSM-systemet består av tre huvudgrupper. Mobilstationen som används av abonnenten. Basstationen som sköter radiokommunikationen med mobilerna. Dessutom behövs ett nätverk som kopplar samtalen mellan abonnenterna. GSM-systemet har alltså ett självständigt nätverk för att koppla samtalen. Det nätverket kopplas ihop med befintliga fasta telenätet, både det analoga PSTN och det motsvarande digitala ISDN.



Mobilstation

Mobilstationen består både av radiodelen för kommunikation till basstationen och av signalprocessorn som hanterar den digitala signalen och överför den till ljud eller annan tjänst. Ytterligare en viktig del är det SIM-kort som innehåller abonnentens identifiering.

Basstation

BTS (Base Transceiver Station) innehåller sändare och mottagare för kommunikationen med mobilerna. BSC (Base Station Controller) styr användningen av radiokanalerna. Den sköter uppkoppling, frekvenshopp och hand-over.

En BSC hanterar ofta 20 - 30 olika BTS, som är utspridda på olika platser. Platsen för BTS kallas sajt (site). Ofta placeras flera BTS på samma sajt för att sända i olika sektorer. Kommunikationen mellan BSC och de olika sajterna sker med kablar, optiska fibrer eller med mikrovågslänkar.

Nätverk

Den centrala delen i nätverket är själva switchen. MSC (Mobile Switching Center) ska koppla de olika samtalen och sköta all administration. Till sin hjälp har den olika register för att hitta och godkänna abonnenterna. Dessutom ska den kunna flytta över samtalet till en annan cell (hand-over) eller till en annan operatörs nätverk (roaming).

HLR (Home Location Register) innehåller uppgifter om alla abonnenter som registrerats i nätverket, samt var de för tillfället befinner sig.

VLR (Visitor Location Register) innehåller alla de abonnenter som för tillfället befinner sig i aktuellt geografiskt område.

AuC (Authentication Center) och EIR (Equipment Identity Register) används för att godkänna användaren. Det gör att stulna eller falska mobiltelefoner inte kan användas.

SIM-kort

En fördel med en mobiltelefon är att man kan ta emot samtal var man än befinner sig. I telefonen sitter ett litet kort med processor och minne. Kortet innehåller ett nummer för identifiering av abonnenten.

SIM-kort (Subscriber Identification Module) kallas också för smart-card.

Olika operatörer har avtal om att skicka vidare samtalen mellan varandra (roaming). Det gör att man kan använda sin telefon, och ta emot sina samtal, oavsett var i Europa man befinner sig. Även andra delar av världen har roaming-avtal. Men i USA används ett annat frekvensband för GSM. Då behöver man plocka ur sitt SIM-kort och flytta över den till en telefon med rätt band.

Det går också att köpa en telefon utan abonnemang. SIM-kortet är då kopplat till ett konto som ska betalas i förväg (pre-paid). En nackdel är att det inte finns roaming-avtal. När man kommer till ett annat land får man köpa ett SIM-kort som fungerar där.

Logiska kanaler

En stor mängd information överförs mellan mobil och basstation. Utöver användarens kommunikation behövs det en mängd signalering för att upprätthålla själva systemet. Dataflödet delas in i olika logiska kanaler.

TCH (Traffic Channel) är den trafikkanal som överför användarens samtal och datatrafik. Trafiken från basstationen respektive från mobilen är separerade tre burster (tidsluckor).

Basstationerna sänder hela tiden en BCCH (Broadcast Control Channel). Den fungerar som en fyr, så att en mobil ska kunna hitta ett GSM-nät. Den innehåller frekvenstilldelning och sekvenser för frekvenshopp.

FCCH (Frequency Correction Channel) används för justering av frekvensen. SCH (Synchronisation Channel) används för att justera tidsluckorna. FCCH och SCH sänds alltid under den första tidsluckan i en frame.

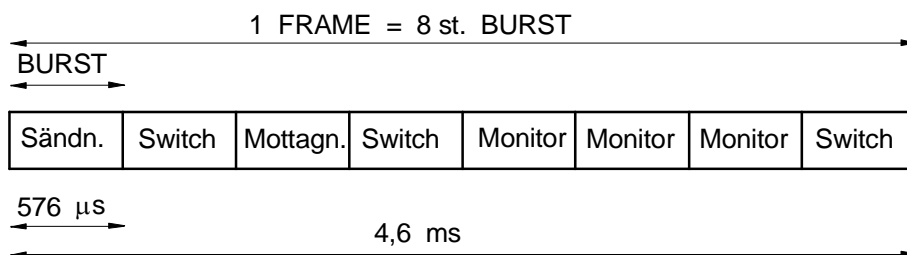
Dessutom används olika kontrollkanaler för att starta samtal samt söka efter en abonnent.

Fysiska kanaler

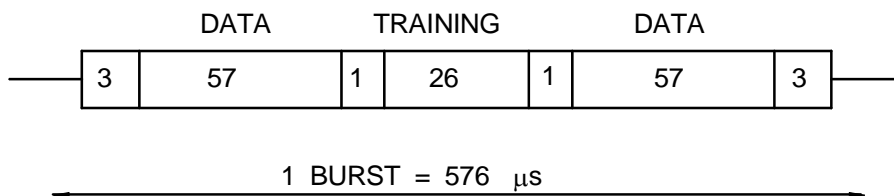
Olika samtal kan fördelas till olika frekvenser. GSM-systemet är dessutom uppdelat i olika tidsluckor. Den digitala informationen från samtalet överförs under korta tidsavsnitt. På så sätt kan flera samtal ske på samma frekvens. En fysisk kanal är ett visst tidsavsnitt på en viss frekvens.

TDMA

Varje radiokanal är i tiden uppdelad i ramar (frames). Inom en ram finns det plats för 8 korta sändningar (bursts) efter varandra. Det motsvarar 8 olika samtal samtidigt i radiokanalen.



En användare utnyttjar en tidslucka för sändning och en för mottagning. Eftersom det sker på olika frekvenser behövs det dessutom tidsluckor för att ställa in oscillatoren till rätt frekvens. De resterande tre tidsluckorna används till att mäta signalstyrkan i kanalerna.



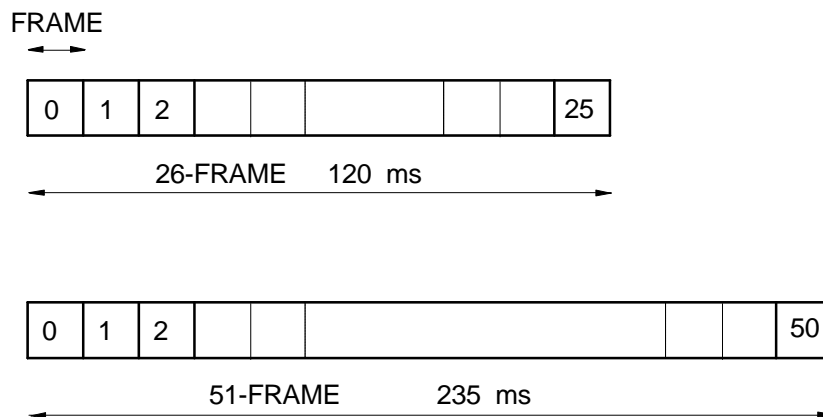
Förutom själva datatrafiken innehåller en burst en känd testsekvens (training). Den används för att mäta upp överföringens distorsion, speciellt distorsionen från flervägsutbredning. På mottagarsidan korrigeras sen datatrafiken för motsvarande distorsion i en utjämnare (equalizer).

De tre bitarna i början och slutet behövs för den felkorrigerande decodern i mottagaren.

Ett litet område i början och slutet används inte alls. Dessa skyddsområden är till för att systemet ska bli okänsligt för små tidsfel. Tillsammans är skyddsområdena på 8,25 bitar. Sändningen sker alltså med en bithastighet på 270,83 kb/s. Hastigheten är begränsad av tillgängliga utjämnare.

Förutom den normala databursten finns det några kontrollburstar. Bursten för frekvenskorrigering består av en serie "nollor". Den används för att synkronisera mobilstationens frekvens. Bursten för tidssynkronisering av mobilstationen använder 64 bitar till training-sekvensen. Access-bursten har ett oanvänt skyddsområde på 68,25 bitar. Den används i början av uppkopplingen, innan systemet har ställt in burstsynkroniseringen.

Ett antal ramar (frames) sätts ihop till en multiframe. Den kan se ut på två sätt.



26-ramars multiframe används till själva trafiken, med dess kontrollkretsar.

51-ramars multiframe innehåller enbart kontrollkanaler.

En superframe består i sin tur av ett antal multiframe. Antingen 26 stycken 51-ramars multiframe eller 51 stycken 26-ramars multiframe.

En hyperframe använder 2048 stycken superframes. Det blir alltså en ram som är ca 3,5 timmar. Så lång tid behövs för att ge datakryptering.

Tidskorrigering

Mobilstationen sänder i en viss tidslucka. Basstationen är samtidigt inställd på mottagning. Det går bra om stationerna står intill varandra. När mobilstationen flyttas längre bort blir den en viss tidsfördröjning på grund av gångvägen. Signalen kommer för sent för att passa in i mottagarens tidslucka.

Basstationen räknar ut förseningen i antal bitperioder, och sänder tillbaks den informationen till mobilstationen. På så sätt kan mobilstationen tidigarelägga sin sändning så att den passar in i mottagarens tidslucka. Med ett 6-bitars nummer kan man få en korrigering på 0 - 63 bitperioder. Det motsvarar 35 km avstånd mellan stationerna ($63 \cdot 3,69 \mu\text{s}$).

Hand-over

I och med att cellerna är så små sker överflyttning mellan celler (hand over) ganska ofta. Mobilstationen övervakar (monitor) spektrat under samtalet. Den kan då se vilken basstation som är starkast, och sen rapportera det till sin basstation. Data på de 6 starkaste basstationerna sänds till nätverket.

Genom att justera vid vilken nivå som hand-over ska ske, kan man påverka cellens storlek. Cellens storlek väljs för att passa olika områdets trafikbehov.

Förutom signalnivån mäter både mobilstationen och basstationen också kvalitén, dvs bitfelfrekvensen (BER). På så sätt kan man få bättre kontroll på "hand over" och uteffekt.

Basstationen kan också mäta signalnivån i tidsluckor som inte används. Det ger ett mått på interferensnivån. Mobilstationen kan då flyttas över till en bättre kanal på samma basstation (intra-cell hand-over).

Uteffekt

En mobiltelefon är mycket liten. För att klara sig på ett litet batteri måste strömförbrukningen hållas nere. Den sänder bara när någon pratar, och då sänder den bara i de mycket korta tidsluckorna. Dessutom regleras uteffekten automatiskt så att den inte sänder mer effekt än nödvändigt. Det ger dubbelt så lång tid till samtal mellan uppladdningarna.

Automatisk reglering av uteffekten medför också att stationerna inte stör varandra lika mycket. Den totala interferensnivån blir lägre.

Basstationen mäter signalnivån och talar om för mobilstationen vilken nivå som är lämplig. Mobilstationen kan ställas in i 2 dB steg ner till 20 mW. Justeringen kan ske med 60 ms intervall. Maxeffekten bestäms av stationens effektklass, 20 W, 8 W, 5 W eller 2 W.

Basstationerna är indelade i 8 effektklasser från 2,5 W till 320 W beroende på cellstorlek. Basstationerna kan också vara automatiskt reglerade beroende på signalnivån som mobilstationerna mäter. Basstationens effekt kan regleras 30 dB, i 2 dB steg (min 13 dBm). Inställningen får ta max 18 μ s.

Frekvensindelning

För att få samtidig kommunikation i båda riktningarna (duplex) sker sändning och mottagning på olika frekvenser. FDD = Frequency Division Duplex.

Mobil till basstation	890 - 915 MHz	(uplink)
Basstation till mobil	935 - 960 MHz	(downlink)

Frekvensområdena är indelade i 24 stycken 200 kHz band. Eftersom man utnyttjar TDMA med 8 tidsluckor motsvarar det 8 användare, dvs 25 kHz per användare. En eller fler frekvenser är tilldelade varje basstation.

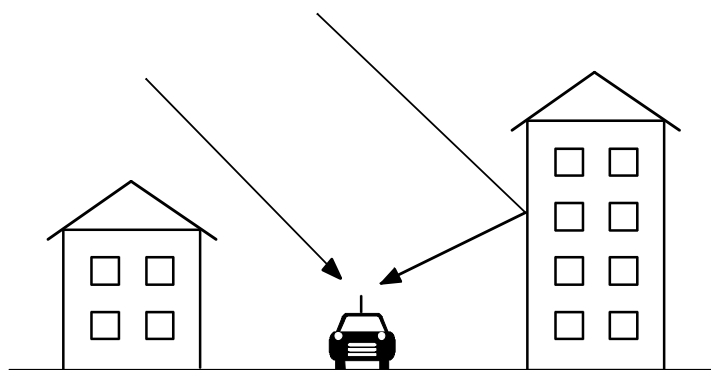
Interleaving

Till dataflödet adderas några bitar som används till felkorrigering på mottagarsidan. Ett kodat datablock på 456 bitar delas upp i grupper om 114 bitar för att få plats i 4 tidsluckor.

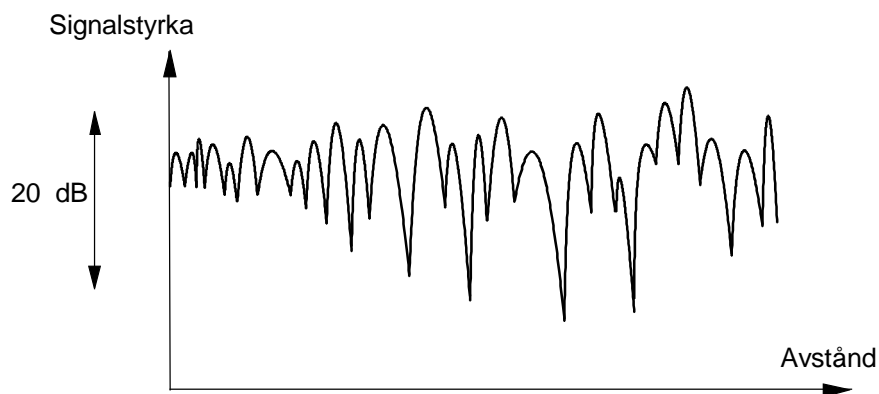
Felrättande koder fungerar bäst då felen är jämnt fördelade. Ibland får man många fel efter varandra. Genom att sprida ut grupperna över fler tidsluckor, blir felen mer jämnt fördelade. Det kallas interleaving. Vid tal sprids grupperna över 8 frames, och vid data sprids grupperna över 20 frames.

4. Diversitet

Fading



Sändaren kan nå mottagaren dels direkt och dels efter en eller flera reflektioner. Signalerna kan adderas i fas eller motfas beroende på skillnaden i gångväg.

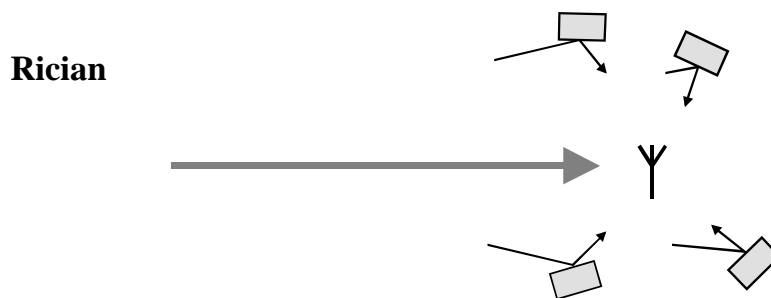


När man rör sig en eller ett par våglängder, ändras de olika gångvägarna så att signalerna ibland adderas i fas och ibland tar de ut varandra. Signalstyrkan i mottagaren faller ofta 20 dB, och ibland t.o.m. över 30 dB.

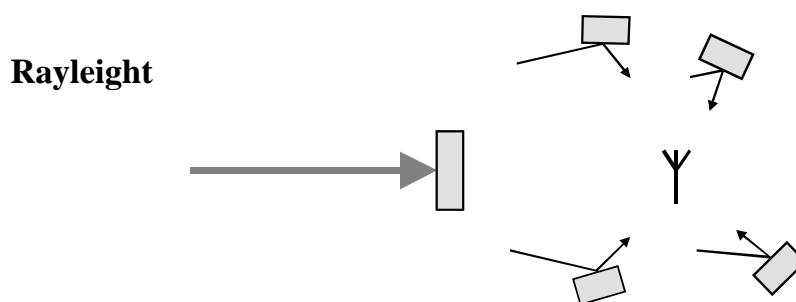
Signalbortfallen är ganska kortvariga, så vid tal märker inte örat det. Däremot är det mycket kritiskt om en del av signalen försvinner då det är datatrafik.

Variationer i signalstyrkan kallas fädning. För att klara denna signalminskning kan sändaren ha motsvarande högre uteffekt. Ofta används istället någon form av diversitet för att undvika de djupa signalbortfallen vid fädningen.

Vågutbredningen kan delas in i två olika grupper, beroende på om det finns fri sikt mellan stationerna.



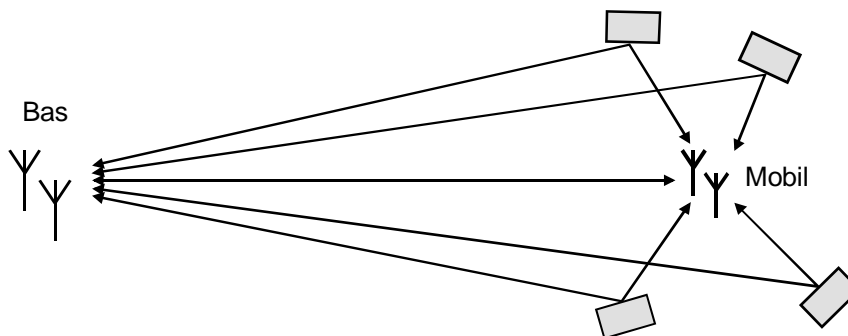
Om det finns en stark direkt signal, utöver alla reflektioner, kallas fädningen Rician.



Om det inte finns någon direkt signal, utan endast reflektioner av slumpmässiga amplituder, kallas fädningen Rayleigh.

Rymd diversitet

Med två skilda antenner kan man få olika fädingmönster. Det ger signal från den ena, när den andra är utfasad.



Mobilen har många reflektioner i närzonen. Det ger en stor vinkelspridning på reflektionerna. Det räcker då att de två antennerna sitter $0,5 - 0,8 \lambda$ från varandra. Det är rimligt åtminstone på en bil. På en liten handtelefon är det inte lämpligt att ha två skilda antenner. Däremot kan basstationen ha det. Det innebär att handtelefonen inte behöver sända på så hög effekt.

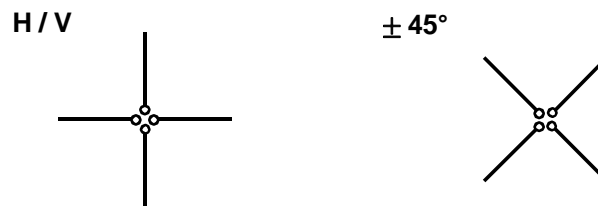
Basens antenn sitter högt i en mast, där det är relativt fritt från reflektioner. Det ger en mycket liten vinkelspridning. Basens två antenner behöver då sitta $10 - 20 \lambda$ från varandra, för att få olika fäding. Med flera meter mellan antennerna blir det ett mycket stort arrangemang, speciellt då cellen har delats upp i tre sektorer (alltså med 6 antenner).

Diversiteten förbättrar också C/I med 4 - 7 dB.

Antennerna ska alltså sitta långt ifrån varandra, för att vågutbredningen ska bli olika. I gränsområdet mellan två celler är signalstyrkan extra låg. Där kan man utnyttja diversitet från två olika basstationer. Det kallas då macrodiversitet. Två antenner på samma basstation kan på motsvarande sätt kallas microdiversitet.

Polarisations diversitet

Vid polarisationsdiversitet används två korspolariserade antenner på basstationen. Mobilen sänder med en enkel antenn.



En vertikalt polariserad våg är fortfarande vertikalt polariserad även efter en reflektion mot marken. Horisontal polarisation ger vid marken en reflektion i motfas, men blir fortfarande horisontellt polariserad. 45° lutning kastas däremot om till en lutning åt andra hållet. I stadsmiljö är det mesta orienterat vertikalt och horisontalt. Därför blir det bättre överföring mellan polarisationerna om man använder $\pm 45^\circ$.

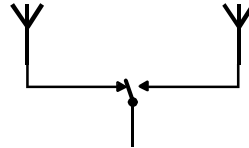
För mobilsystemen är kopplingen mellan polarisationerna 10 - 20 dB. När den ena polarisationen är utfasad, kan det finnas tillräcklig signal på korspolarisationen.

Fördelen med polarisationsdiversitet är att det inte behövs två antenner långt isär. De behöver inte ta mer plats än en enkel antenn.

En annan fördel är att basstationen får stark signal, även då handapparaten under samtalet vrids mellan horisontell och vertikal polarisation.

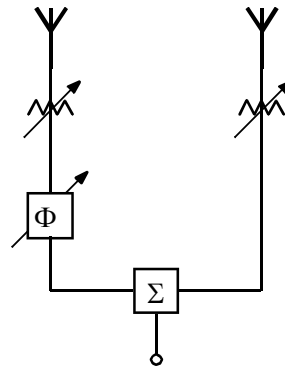
Nackdelen med två polarisationer är att diversitetsvinsten blir lite lägre än för rymddiversitet. Om de två polarisationerna istället lutar $\pm 45^\circ$ blir det lite högre diversitetsvinst i stadsmiljö. Jämfört med rymddiversitet är $\pm 45^\circ$ ca 1 dB sämre, och H/V är ca 2 dB sämre.

Kombinering med switch



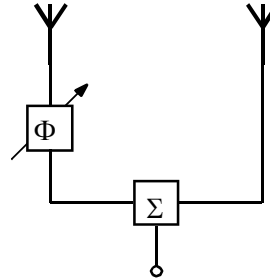
Den enklaste formen av diversitetskombinering är att med en switch välja den antenn som för tillfället har bästa signal/brus förhållande. Vid 99 % tillförlitlighet, vinner man teoretiskt 10 dB med två antenner switchade.

Kombinering för max C/N



De två signalernas amplitud vägs och fasjusteras, för att kunna summeras till bästa signal i förhållande till brus och störningar (BER). Denna kombineringsmetod ger den största diversitetsvinsten, 11,5 dB vid 99 % tillförlitlighet.

Kombinering med lika gain



Systemet blir enklare om amplituderna får vara lika och endast fasen justeras. Det ger 10,5 dB gain, dvs 1 dB sämre än kombineringsför max C/N.

I praktiken blir vinsten med diversitet lägre. Dessutom kommer inte all strålning rakt framifrån. Den signal som kommer från sidan, ser för de två antennerna mer lika ut. Den får alltså lägre diversitetsvinst. Det gäller både rymddiversitet och polarisationsdiversitet.

I stadsmiljö ger rymddiversitet en vinst på ca 6,5 dB. I ytterområdena blir vinsten något lägre, ca 5 dB.

Frekvens diversitet

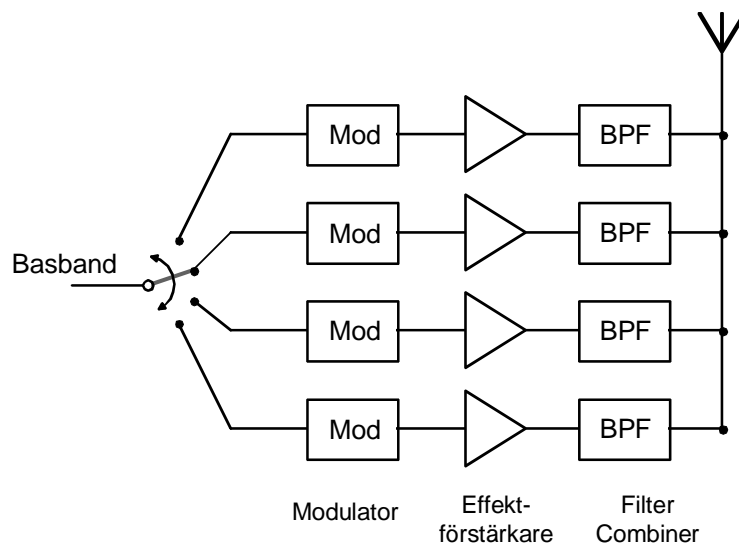
SFH — Slow Frequency Hopping

Genom att variera frekvensen för varje frame (långsamt frekvenshopp) förflyttas platsen för utfasning. Ingen placering ger då totalt bortfall av signalen. Enstaka bortfall kan korrigeras med felrättande koder.

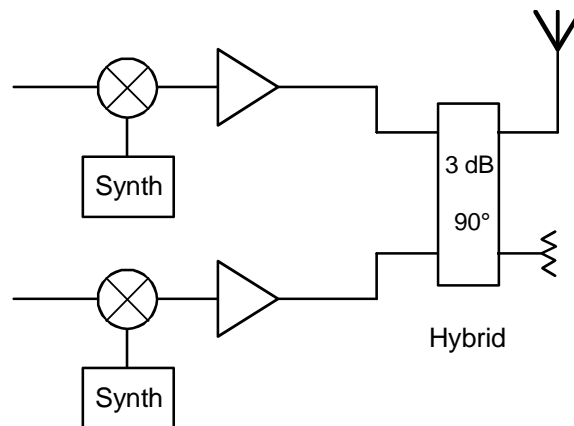
Med frekvenshopp fördelar man också felen från störande signaler (co-channel interference). Systemet kan arbeta på ett S/I som är ca 3 dB lägre. Med störningarna utjämnade till ett medelvärde, behöver cellerna inte dimensioneras efter värsta situationen. Cellerna kan därför packas tätare, vilket ger högre kapacitet.

Systemet kan frekvenshoppa (byta kanal) 217 gånger per sekund. Vanligtvis hoppar endast trafikkanalen. Kontrollkanalen är fast, för att få ett enklare system.

Frekvenshopp sker antingen med basbandshopp eller med synteshopp. Vid basbandshopp används flera sändarsteg med olika frekvenser. Basbandet switchas sedan till de olika sändarna efter ett visst mönster.



Basbandshopp är enkelt att införa, om det redan finns ett stort antal sändarsteg i basstationen. Varje sändare ligger fast inställd på sin frekvens. De olika kanalerna kombineras med filter (kaviteter).



Synteshopp innebär att sändaren ställer in olika frekvenser för varje tidslucka. Frekvensändringen ska ske på $28 \mu\text{s}$, till ett faskel på max 2° . För att få längre tid till inställningen, används vanligen två syntesgeneratorer. När den ena används till sändning, har den andra gått om tid på sig att ställas in till ny frekvens.

Med synteshopp kan sändaren hoppa mellan alla tillgängliga frekvenser, även om det bara finns ett sändarsteg i basstationen. Det blir en betydande förbättring om systemet hoppar mellan åtminstone 4 frekvenser.

Den största nackdelen med synteshopp är att det behövs en bredbandig kombinerings av effektstegen. Då två slutsteg kombineras med en hybrid, hamnar hälften av effekterna i avslutningsmotståndet. 3 dB förluster för en effektförstärkare är ett högt pris för att få frekvenshopp.

I mottagaren är det däremot inga problem med att använda synteshopp. Mottagaren kan ha ett filter på ingången som täcker hela mottagarbandet. Därefter hoppar basstationens mottagare i frekvens för att följa mobilens hoppsekvens. Den smalbandiga filtreringen görs senare på MF-bandet.

Jämförelse

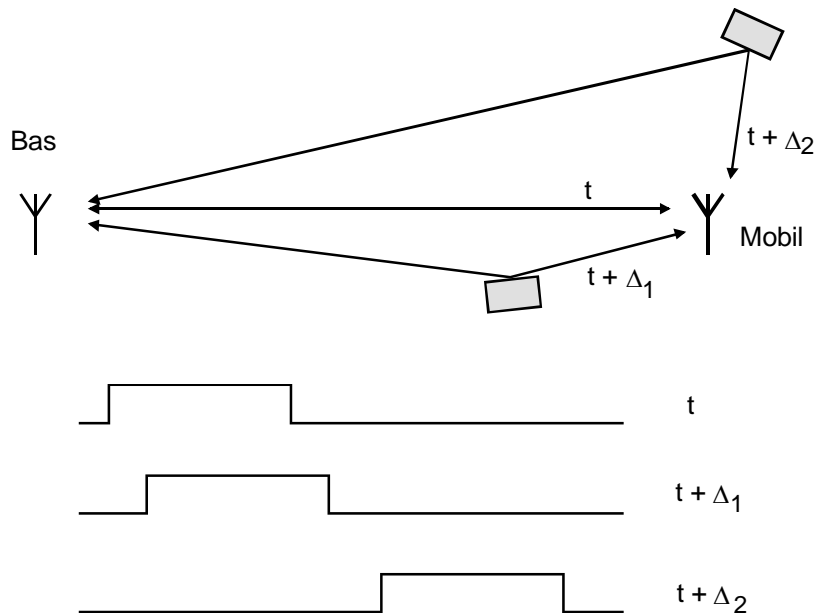
SFH (Slow Frequency Hopping) fördelar signalbortfallen från fädning (fädning dipparna) så att de kan korrigeras med de felrättande koderna. Även interferensen från granncellerna kommer att jämnas ut. Systemet kan dimensioneras för medelinterferensen istället för den värsta situationen. Den största förbättringen sker i cellens ytterområde.

IUO (Intelligent Underlay Overlay) utnyttjar att cellens mitt har mindre störproblem. SR-lagret (Super Reuse) kan återanvända samma frekvens tätare.

Båda metoderna ökar kapaciteten. SFH är effektivast i ytterområdena, IUO är effektivast i centrum. Bäst är en kombination av båda. Men frekvenserna ska räcka till både SFH, IUO och microceller.

Diversitet mellan olika antenner förbättrar mottagningen vid snabb fading. Mobiler som rör sig långsammare än 20 km/tim blir bättre med frekvenshopp än med antenndiversitet. Bäst blir det om båda teknikerna används tillsammans.

Delay spread



Vid flervägsutbredning får de olika gångvägarna olika tidsfördröjning. Fördröjda databitar ger intersymbol interferens (ISI). Det gör inte så mycket om symboltiden är lång i förhållande till variationerna i fördröjning. Men om datahastigheten ökar (symboltiden minskar), eller delay spread ökar, kommer de fördröjda signalerna att blandas ihop med efterföljande bitar.

Den detekterade signalen blir försämrad även om signalstyrkan är hög. Om delay spread (rms-värdet) överstiger ca 10 - 20 % av symboltiden behövs korrigering med equalizer eller diversitet.

Microceller inomhus ger så små fördröjningar ($< 0,2 \mu\text{s}$) att datahastigheten kan vara större än 4 Mb/s.

Utomhus är en microcell flera hundra meter stor. Dess fördröjningar begränsar bithastigheten till ca 1 Mb/s.

System för mobiltelefon använder celler som är flera km stora, dvs 5 μ s eller mer i delay spread. Om bithastigheten är på flera hundra kb/s används en adaptiv equalizer för att korrigera distorsionen.

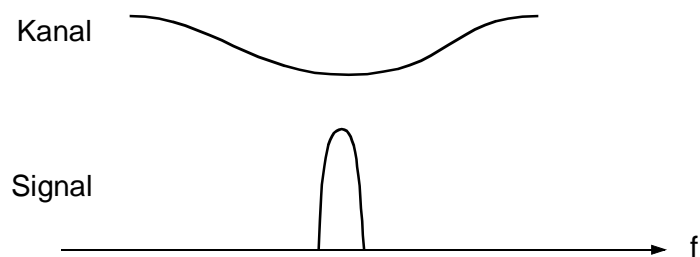
FDMA använder mycket längre symboltider än TDMA. Därför behövs ofta inte någon equalizer i FDMA-baserade system.

Eftersom ISI blir värre då signalen är svagare, kan diversitet användas för att minska problemet.

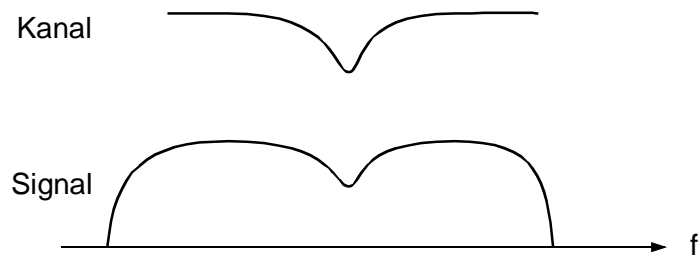
Det är också bra att luta basstationens antennlob neråt, så att de reflektioner som har gått långt ska bli svagare.

Koherent bandbredd

Kanalens koherenta bandbredd är det inverterade värdet av delay spread.

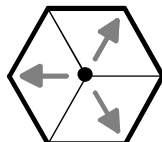


Med endast en liten delay spread, påverkas de olika frekvenserna på samma sätt inom ett stort frekvensområde. Kanalen är inte frekvenssektiv. Det blir alltså en stor koherent bandbredd. Den smalbandiga signalen får ingen distorsion.

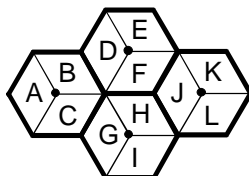


Med stor delay spread får man liten koherent bandbredd. Om kanalens koherenta bandbredd är mindre än signalens spektralbredd, kallas kanalen frekvenssektiv. Det behövs då en equalizer för att kompensera distorsionen.

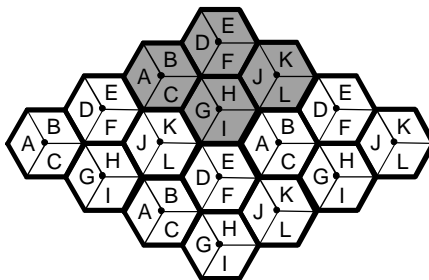
Kluster med sektorceller



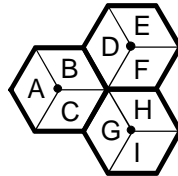
Istället för rundstrålande antenner har varje sajt tre antenner som är riktade i tre olika sektorer. Varje antenn är kopplad till varsin BTS (Base Tranceiver Station). Det finns alltså tre separata sektorceller runt varje basstation.



Till varje sektor tilldelas några frekvenser. Intilliggande celler har fått andra frekvenser för att de inte ska störa varandra. Ett kluster med fyra sajter innehåller då 12 olika frekvensgrupper.



Nästa kluster ligger tillräckligt långt bort för att frekvenserna inte ska störa varandra. Med 12 sektorer blir störningarna tillräckligt låga för kontrollkanalen BCCH. Trafikkanalerna kan däremot tåla mera störningar.



Trafikkanalerna kan hoppa mellan frekvenserna som är tilldelade den sektorn. Det resulterar i utspridda bitfel som de felrättande koderna kan ta hand om. Frekvenserna kan då återanvändas efter en grupp om 3 sajter och 9 sektorer.

På GSM900 finns det 124 frekvenser, som ska fördelas till kanske tre operatörer. BCCH ska ligga på frekvenser som inte hoppar. Det blir då bara tre frekvenser kvar till respektive sektor. Om kluster med 3 sajter ger för mycket störningar och 4 sajter har bättre marginal än som behövs, så kan man blanda med olika kluster. I medeltal får man då en storlek som ligger mellan 3 och 4 sajter.

Ännu tätare återanvändning av frekvenserna

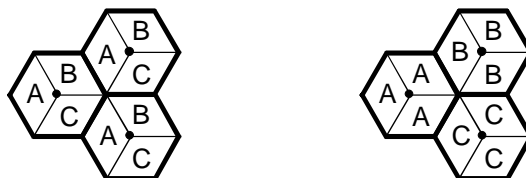
Ju oftare frekvenserna kan återanvändas desto högre kapacitet får systemet. Men när cellerna med samma frekvens kommer närmare varandra ger det störningar med bitfel som följd. Kapaciteten bestäms alltså av störnivån. Det finns olika tekniker för att minska störningarna och de ska kombineras och utnyttjas så mycket som möjligt.

Diskontinuerlig sändning innebär att sändning bara sker då någon pratar. Vid tystnad sänds ingen onödig störning, enbart enstaka burster.

Dynamisk effektkontroll justerar ner uteffekterna så att det bara sänds så mycket som behövs. Det minskar den allmänna störnivån i granncellerna.

Dynamisk tilldelning av kanalerna innebär att systemet väljer de frekvenser (och tidsluckor) som är minst störda. Det är en långsam process som påverkas av förändringar i systemet, till exempel förändringar i frekvensplanering, nya basstationer eller förändringar i trafikbelastningen.

Frekvenshopp är den viktigaste tekniken för undertryckning av störningar. Ju fler frekvenser man kan använda desto effektivare blir undertryckningen. På GSM1800 finns det 375 frekvenser att fördela mellan operatörernas sektorer. Det ger större möjlighet att använda små kluster.



Ett alternativ är att göra alla sajter lika. Frekvenserna fördelas då till de tre sektorerna. Visserligen kommer de störande sektorerna närmare varandra, men ju fler frekvenser sektorn har desto mer undertrycks störningarna.

Det optimala är att använda samtliga frekvenser i alla sektorer, men med olika hoppsekvenser. Frekvenserna återanvänds då överallt, så att kapaciteten blir som störst. Men det ger för mycket störningar, om man inte har tillräckligt många frekvenser. Ett alternativ kan då vara att fördela frekvenserna till två eller tre olika sajter, för att minska störningarna.

Hierarkisk cell-planering

En hierarkisk uppdelning innebär att macrocellen har underliggande microceller och picoceller. Trafiken fördelas mellan lagren så att macrocellen hanterar de snabbt rörliga mobilerna och de mindre cellerna tillför kapacitet. De olika lagren behöver ha olika frekvenser för att inte störa varandra.

Frekvensplanering med hierarkiska lager är en komplicerad och kostsam process. Men eftersom GSM kan använda frekvenshopp så blir störningarna i viss mån undertryckta. Den marginalen i störnivå man får, av att hoppa mellan 6 frekvenser, kan användas för att i ett befintligt system lättare kunna införa inomhusceller och hot-spot. Om en picocell plötsligt ska installeras för en kortare tid är det viktigt att inte resten av systemet ska behöva planeras om.

Cell-optimering

När ett system byggs upp från början utgår man från en beräknad fördelning. Senare upptäcker man att för många frekvenser har tilldelats fel celler. En del celler har fått för stor marginal mot interferens, dvs onödigt liten kapacitet. Nätstrukturen och installationerna på sajterna blev i praktiken inte så bra. Speciellt antennerna kan ha fått en dålig placering.

Mobilnätet behöver alltså optimeras för att anpassas från den teoretiska modellen till verkligheten.

Nya byggnader ger reflektioner och skuggning, som resulterar i att cellerna behöver justeras. Dessutom tillkommer nya köpcentrum och industriområden som behöver tillföras ny kapacitet.

Vid varje utbyggnad bör systemet åter optimeras. En förändring mot högre kapacitet ger ofta lägre kapacitet innan systemet har trimmats in. Det är viktigt att bara införa en förbättring i taget, för att inte tappa kontrollen.

5. Förbättring av GSM

Vägen till tredje generationen sker genom en successiv utbyggnad av befintligt system. Det gör att 2:a generationen kan till viss del användas för 3:e generationens tjänster.

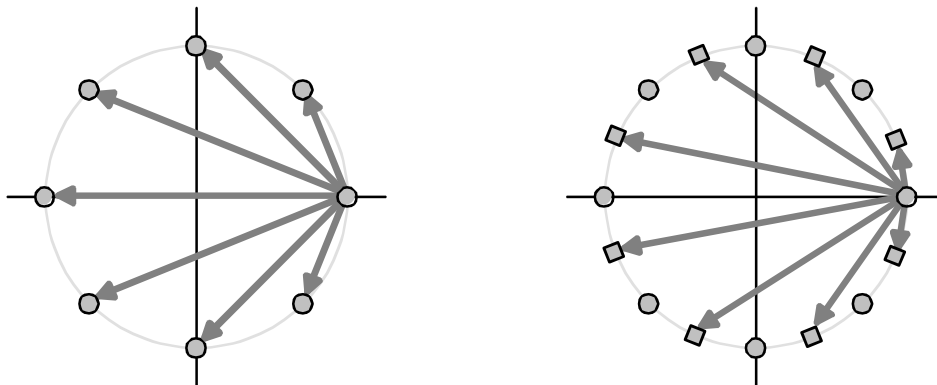
HSCSD High Speed Circuit Switched Data

När man sänder data behövs inte den extra kodning som talkanalen har i GSM. Det gör att datahastigheten ökar från 9,6 till 14,4 kb/s. Genom att utnyttja flera tidsluckor kan datahastigheten komma upp till 57 kbps.

EDGE Enhanced Data rate for GSM

Vidareutvecklingen av GSM mot större bandbredd, går under arbetsnamnet Evolved GSM eller EDGE (Enhanced Data rate for Global Evolution).

För att uppnå högre datahastighet införs modulationen 8-PSK. Det ger 48 kbps användbar datahastighet per tidslucka. Totalt resulterar det i 384 kbps vid liten mobilitet, och 144 kbps vid full mobilitet. 8-PSK använder samma längd på bursten och har samma spektralform som GSM.



8-PSK innebär att signalen går genom origo för vissa kombinationer av symboler. För att slippa denna amplitudvariation ner till noll, vrids konstellationen $3\pi/8$ för varje symbol.

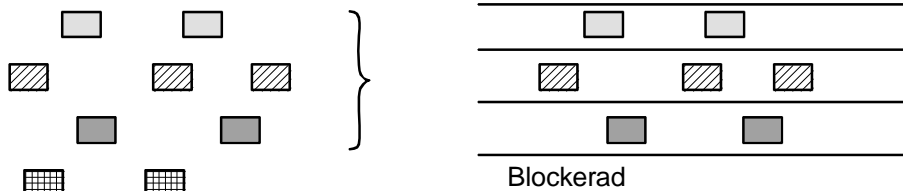
Resterande amplitudvariation ger en medeleffekt som är 3,2 dB lägre än toppeffekten. Effektförstärkaren behöver minska uteffekten ca 2 – 5 dB jämfört med GSM. Om effektförstärkaren redan kan klara amplitudvariationerna behövs endast en uppgradering av basstationens mjukvara.

GMSK överför 1 bit per symbol, medan 8PSK överför 3 bitar per symbol. Med 3 bitar blir det 114 respektive 342 databitar per burst.

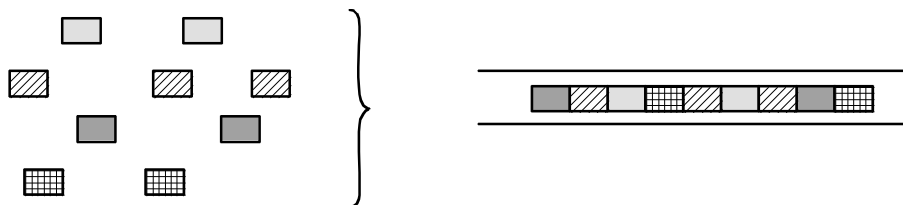
Då signalkvaliten inte räcker för 8-PSK, eller då det inte finns EDGE-funktion, arbetar EDGE-kanalen som vanlig GSM. Vid kretskopplad data kan en eller flera tidsluckor användas för EDGE medan resten använder GSM,

Spektrat från EDGE och GSM är nästan identiska.

GPRS General Packet Radio Services



Med ett kretskopplat nät får varje samtal en egen kanal. Ytterligare samtal blir blockerade, trots att det pågår väldigt lite trafik på de befintliga kanalerna.



En viktig utveckling av GSM är att gå över från switchade kretsar till switchade datapaket. De olika datapaketerna, från olika användare, staplas ihop i samma kanal. Både radiokanalen och nätverket blir då effektivare utnyttjat. Principen att switcha datapaket är speciellt effektivt för kortvariga överföringar (burster), till exempel e-mail, databas och TCP/IP nät.

Eftersom man delar resurserna med andra användare kan man välja hur många paket man skickar med. GSM/GPRS stöder datahastigheter från 11.2 till 22.8 kbit/s. EGPRS tillåter datahastigheter från 11.2 till 59.2 kbit/s för varje tidslucka. Med två tidsluckor blir det 107 kb/s. Naturligtvis blir det ännu högre datahastighet med alla 8 tidsluckorna, men det blir dålig kapacitet om en hel bärvåg tilldelas till bara en användare.

Med GPRS betalar man inte för att man blockerar en telefonlinje en viss tid. Betalningen sker efter hur mycket data som man har överfört. Det betyder att man kan vara uppkopplad hela dagen, och bara betalar då någon information sänds. Ett e-mail tas emot direkt efter det har sänts.

Tyvärr kräver det en ny infrastruktur. Nätverket med switchning av paket blir en utbyggnad parallellt med befintligt system med kretskoppling. Fördelen med parallella nät är att telefonen kan användas till flera olika tjänster samtidigt. Man kan t.ex. ta emot e-mail samtidigt som man pratar.

Andra system för tal

1. Trådlösa telefoner

Trådlösa telefoner (Cordless Telephone) är små och billiga apparater som går på låg effekt. De har en räckvidd på högst några hundra meter utomhus, eller 20 - 30 m inom en byggnad. Det ger systemet stor kapacitet, dvs många simultana samtal.

Dynamisk tilldelning av kanaler

DCA – Dynamic Channel Allocation

Mobiltelefoner använder en fast tilldelning av frekvenser till olika celler. Trådlösa telefoner använder istället en dynamisk tilldelning, där varje handapparat väljer den kanal som har minsta störningar eller minst trafik. Återanvändningen av frekvenserna bestäms av interferensens medelvärde, istället för det värsta fallet. Det ger 4 - 8 ggr högre kapacitet i en microcell, jämfört med fast tilldelning av kanaler. I en macrocell blir det ca 1,5 ggr högre kapacitet.

Tidsduplex

TDD – Time Division Duplex

Mobiltelefoner använder olika frekvensband för sändning och mottagning. Trådlösa telefoner får 2-vägs förbindelse genom att dela upp sändning och mottagning i olika tidsluckor, men på samma frekvens. Det ger enklare duplex-kretsar. En cirkulator eller en PIN-switch, istället för en diplexer med filter. En annan fördel är att det är lätt att få diversitet på både upp- och nerlänk. Den inställning av antennen som ger bästa mottagning på basstationen, används också för sändning. Eftersom sändning sker på samma frekvens, ger det bästa mottagning för mobilen.

Ett problem med tidsduplex är att den som lyssnar kan bli utsatt för en annan som sänder på samma frekvens. Därför är systemen för trådlösa telefoner synkroniserade så att alla handapparater sänder respektive lyssnar samtidigt. Det är lätt att synkronisera så här små nät, men det är betydligt svårare att använda TDD till de större näten för mobiltelefon.

2. DECT

Digital Enhanced Cordless Telecommunication

Användning

DECT är främst ett system för trådlös telefon i hemmet. Det finns också system för företag där DECT används som telefon till en trådlös växel. Det går då att använda den till både lokala och externa samtal.

Med "Local Loop" menas den sista biten telefontrådar som går till respektive abonnent. DECT kan användas som trådlös överföring till abonnenterna, WLL (Wireless Local Loop). Vid nybyggnad och då en andra operatör snabbt ska kunna nå stora kundgrupper blir det billigare och flexiblere med WLL jämfört med kabeldragning. DECT används till WLL i t.ex. Indien och Syd Afrika. Med riktantenner har man utsträckt räckvidden till över 10 km.

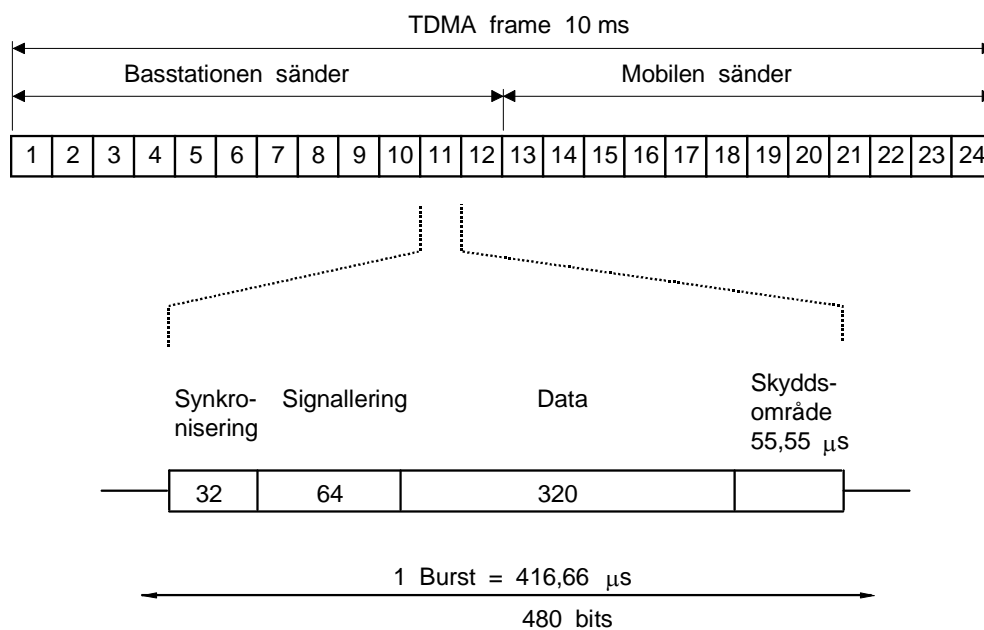
Frekvensområdet 1880 - 1900 MHz är avsett för DECT i alla länder i Europa. En basstation för DECT har en kapacitet på 4 Erlang. Om basstationen kan arbeta med två bärvågor samtidigt, blir kapaciteten 15 E.

DECT är en radiokanal som kopplas till ett befintligt nät.

t.ex. GSM Nätet för mobiltelefon
 PSTN Public Switched Telephone Network
 ISDN Integrated Service Digital Network
 PBX Private Branch Exchange dvs företagsväxel
 CCFP Central Control Fixed Part

En CCFP kan kopplas till flera hundra basstationer för DECT.

DECT använder 10 kanaler inom 1880 - 1900 MHz (Multi Carrier). Kanalavståndet är 1,728 MHz. Uteffekten är 24 dBm och mottagarens känslighet -83 dBm.



Datahastighet

En tidslucka ger 32 kb/s. Vill man ha högre datahastighet kan man utnyttja flera tidsluckor. Det går också att använda alla 24 tidsluckorna åt samma håll. Datahastigheten blir då 1,152 Mb/s.

Om inte det räcker kan man få ännu högre datahastighet med fler basstationer inom samma cell.

Varje kanal har 24 tidsluckor, 12 för sändning och 12 för mottagning. Totalt ger det en frame på 10 ms.

Duplexer

Sändning och mottagning sker i olika tidsluckor men på samma frekvens (TDD - Time Division Duplex). Eftersom sändning och mottagning inte sker samtidigt, behöver de inte separeras med filter (duplexer). Det räcker med en cirkulator eller en PIN-switch.

Hand-over

Handapparaten mäter kontinuerligt signalstyrkan på olika frekvenser och beslutar om hand-over till en bättre kanal:

- inom cellen
- till nästa cell
- till en repeater
- till annat DECT-system

Den nya kanalen kopplas först upp parallellt med den gamla, därefter kopplas den gamla kanalen ner.

DCA **Dynamic Cell Allocation**

Eftersom handapparaten hela tiden väljer den bästa kanalen, behövs det ingen central fördelning av frekvenserna till olika platser. De stora fördelarna är:

- ingen cellplanering
- ingen frekvensplanering
- ingen kapacitetsplanering

Det ger stor flexibilitet och stor kapacitet. Om täckningen eller kapaciteten behöver ökas är det bara att koppla in fler basstationer. Det behövs ingen omplanering av befintliga stationer.

Räckvidd

Med låg uteffekt (24 dBm) och hög frekvens (1,9 GHz) blir räckvidden mycket liten. Små celler betyder mycket stor kapacitet. Men om man har tillräckligt med kapacitet kan man använda riktantenner eller repeater för att få större räckvidd.

	Pico-cell	Riktantenn	Repeater
Inomhus	20 - 60 m	80 - 90 m	
Utomhus	⇒ 500 m	flera km	4 km eller mer

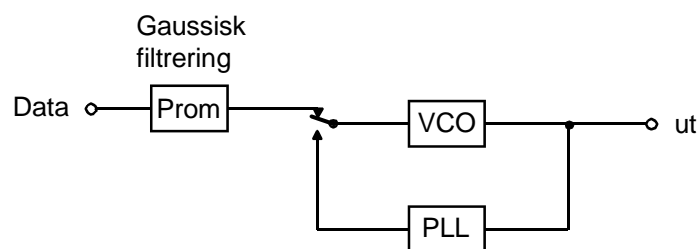
WLL använder riktade antenner, på både basstationen och abonnentens hus, för att få stor räckvidd. För att nå en handapparat inne i en byggnad, behövs 40 dB mer uteffekt, eller en tiondel så långt avstånd.

Modulator

DECT använder FSK med modulationsindex = 0,5 dvs MSK. Det ger konstant amplitud så att man kan använda en enkel klass-C förstärkare som slutsteg.

Datapulserna är Gaussiskt filtrerade för att få låga sidlobor i spektrat. Nykvistfiltrering (BT = 0,5) ger ingen partiell respons. Det förenklar mottagaren.

DECT sänder i korta burster, och ska snabbt switchas mellan sändning och mottagning. Tiden för faslåsning ska vara mycket kort (ca 30 μ s), och utsignalen är mycket bredbandigare än loopfiltret. Modulatorn kan vara en PLL med öppen slinga, för att kombinera snabb switchning och stor bandbredd.



Vid sändning är först slingan sluten, för att låsa till rätt frekvens. Sen öppnas slingan så att VCO:n kan moduleras bredbandigt. Efter modulationen sluts slingan igen för att låsa till frekvensen för mottagning.

Ofta arbetar VCO:n på halva frekvensen, för att senare frekvensdubblas. Det minskar störningarna från övriga RF-kretsar.

3. TETRA

Trans European Trunked RAdio

Terrestrial Trunked Radio

TETRA är 3:e generationen av privat mobilradio (PMR). 1:a generationen var analog mobilradio. 2:a generationen var analog mobilradio med analogt nätverk (switchning).

Radiosystemet är optimerat för att passa olika räddningstjänster, som polis, ambulans, brandkår och tull. Men även kommersiella och publika tjänster kan vara med och dela på systemet.

Räddningstjänsterna behöver ett system som kan innehålla prioritering. Det ska finnas gruppanrop och nödanrop som bryter annan trafik. Gruppanrop ska kunna ske till hundratals mottagare i samma cell eller sektor. Dessutom ska det gå att kommunicera direkt mellan enskilda terminaler, eftersom en telefonväxel kan bli överbelastad i ett krisläge. Det kanske inte ens finns täckning från en basstation. Den direkta kommunikationen kan gå via en repeater.

TETRA för räddningstjänst ska arbeta på 380 - 400 MHz. Kommersiella och publika tjänster får i första hand arbeta på 410 - 430 MHz och 870 - 921 MHz, samt i andra hand på 450 - 470 MHz. Kanalavståndet är 25 kHz.

Modulationen är $\pi/4$ QPSK, med TDMA i fyra tidsluckor. Det ger fyra talkanaler per bärvåg. Datatrafik får en kapacitet på 7,2 kbps i vardera talkanal. Om systemet istället optimeras för enbart datatrafik (packed data), ger de fyra tidsluckorna tillsammans kapaciteten 28,8 kbps.

En tidslucka med 510 bitar, är ca 14 ms lång. En frame med 4 tidsluckor är 56,7 ms. Dessa bygger upp multiframear och hyperframear.

Upplänken är synkroniserad till nerlänken, på två tidsluckors avstånd. Tidpunkten för sändning justeras beroende på avståndet (på motsvarande sätt som för GSM).

TETRA har vidareutvecklats för att få bättre multimedia. Det behövs överföring av video och högupplösta bilder. Till det behövs högre datahastighet. Med 200 kHz bandbredd kan man uppnå 473 kb/s

4. Mobil-satellit

Satellit på låg höjd

Satellitesystem för mobil kommunikation använder satelliter på ganska låg höjd (LEO - Low Earth Orbit). Med satelliter som flyger så lågt som ca 1000 km, kan man använda små handterminaler med låg uteffekt (ca 1W). En annan fördel är att tidsfördröjningen bara blir 10 - 20 ms.

Gemensamt för satelliter på låg höjd är att de rör sig över kontinenterna. Inom markbaserad cellradio sker hand-over då mobilen rör sig genom cellerna. Men vid mobil satellit sker hand-over då satelliterna passerar eftersom mobilen rör sig betydligt långsammare. Satellitens snabba rörelse ger endast 10 minuters användning per satellit. En mängd satelliter (50 - 200 stycken) i ett nätverk ger tillsammans global täckning.

Ett flertal system har byggts på 1,5 - 1,6 GHz. En nackdel är att de bygger på respektive företags egna standarder. Det är därför svårt för andra företag att bygga handapparater. Dessutom blir det en terminal som bara fungerar i det egna nätverket.

3GPP har avsatt ett särskilt frekvensområde med upplänken på 1980-2010 MHz och nerlänken på 2170-2200 MHz. Mobiltelefon via satellit beskrivs ofta under förkortningen MSS (Mobile Satellit Service)

Fördelen med mobil-satellit är den globala täckningen. Speciellt i de stora områdena där det inte finns någon lämplig telefonförbindelse.

Den största nackdelen är den låga kapaciteten, på grund av de stora cellerna. Det resulterar också i mycket höga samtalsavgifter för användarna.

Geostationär satellit

De flesta satellitesystem använder satelliter i geostationär bana (GEO). Terminalerna kan då rikta in sina antenner till en fast punkt på himlen. Nackdelen är att avståndet blir så stort (ca 36 000 km höjd) att det behövs stora parabolantenner (> 1m diameter och tung utrustning). Tidsfördröjningen som blir ca 250 ms kan dessutom vara besvärande vid samtal.

De vanligaste systemens frekvensområden är:

C-bandet 3,6-4,2 GHz för nerlänk och 5,85-6,7 GHz för upplänk

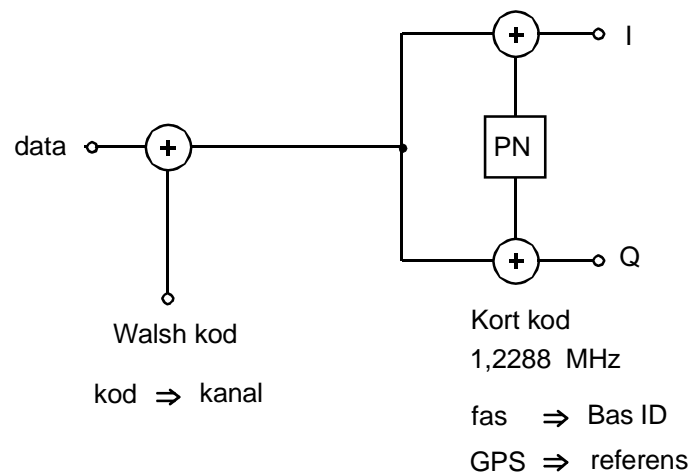
X-bandet 7,25-7,75 nerlänk respektive 7,9-8,4 GHz upplänk

Ku-bandet 10,7-12,75 nerlänk respektive 13,75-14,5 GHz upplänk

5. IS-95 cdmaOne

cdmaOne är ett nytt namn på det som tidigare kallades IS-95. Det är en kombination av CDMA och FDMA. CDMA-kanalen är 1,25 MHz bred. Ett band på 10 MHz är FDMA uppdelat till 8 stycken CDMA-kanaler.

Forward link (basstation till mobil)



Kort kod 1,2288 MHz

Den korta koden består av två sekvenser, en för I-kanalen och en för Q-kanalen. Olika basstationer identifieras med fasläget av en kod. Alla basstationer måste därför vara synkroniserade inom några μ s. Den absoluta tidsreferensen hämtas från GPS. Alla basstationer sänder samma kod, men med olika starttider. Med ett avstånd på 15,6 km behövs 64 chips för att separera stationerna. Det ger 512 olika faser för identifiering.

Walsh-koder

Basstationerna kan kommunicera med 40 olika mobiler. De olika kanalerna separeras med varsin kod. Med Walsh-koder får man mycket låg korskorrelation, under förutsättning att sekvenserna är synkrona. IS-95 använder 64 orthogonala Walsh-koder.

Av de 64 kanalerna används en som pilot-kanal, en som synk-kanal, 7 stycken paging-kanaler och de övriga som trafik-kanaler. De 64 logiska kanalerna är oberoende av varandra. De kan alltså innehålla olika datatrafik, med olika datahastigheter.

Pilot-kanalen

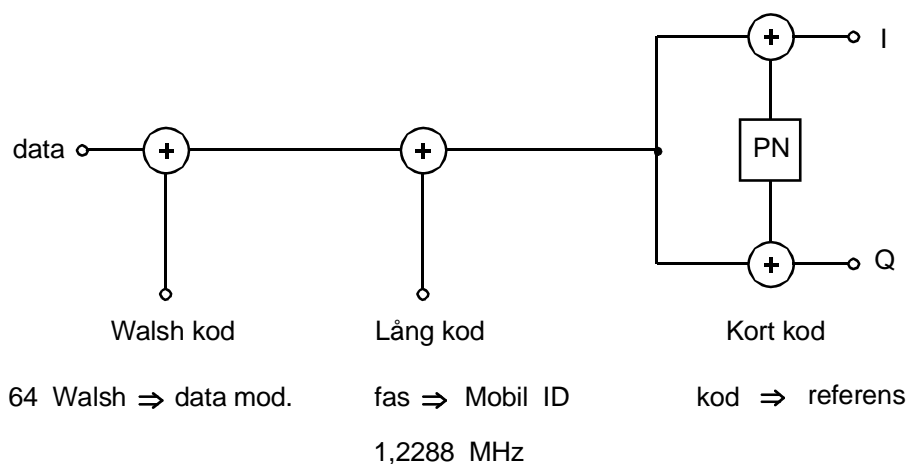
Den av Walsh-koderna som har alla 64 symbolerna lika, kallas pilot-kod (kanalnummer = 0). Mobilstationerna söker efter den för att hitta lämplig basstation, eller för att initiera hand-over (hand-off), eller för att justera Rake-fingrarna i mottagaren. Den används som referens vid koherent demodulering och vid nivåmätning för hand-over. Det är en ren kort kod, utan information.

Synk-kanal

Meddelandet i synk-kanalen är basstationens identifiering, och absolutfasen för pilot-sekvensen.

Paging-kanal

För att söka efter en abonnent, som ska få ett inkommande samtal. Samtalet tilldelas här en trafik-kanal.

Reverse link (mobil till basstation)**Lång kod 1,2288 Mcps**

En lång kod, från ett 42-bitars skiftregister, används för att separera olika mobilstationer. Istället för att separera med olika koder, används samma kod men med olika faslägen i koden.

Skiftregistret ger en kod med $2^{42}-1$ steg. Det tar 41 dagar att stega igenom koden. Varje mobilstation identifieras med ett eget fassteg av sekvensen. Inställningen baseras på tillverkaren och enhetens serienummer. IS-95 identifierar alltså handapparaten istället för att som GSM identifiera användaren via SIM-kortet.

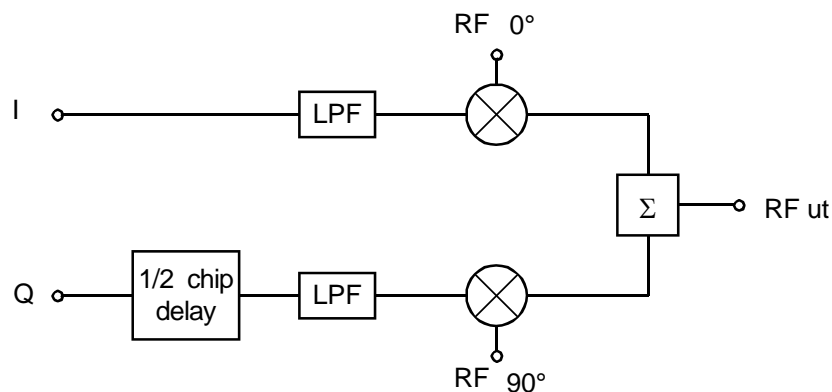
Kort kod

Eftersom tidsläget också beror på fördröjningen på grund av avståndet, används dessutom en kort kod från 15-bitars skiftregister. Det är egentligen två olika koder, en för I-kanalen och en för Q-kanalen. De koderna är lika för alla mobiler.

Walsh-kod

Datamoduleringen sker sedan med 64 ortogonala Walsh-koder (4,8 ksps). Varje period av Walsh-sekvensen (Walsh chip) varar i 4 chips av PN-sekvensen.

Modulation



Signalen i Q-kanalen är fördröjd 1/2 chip. Det är alltså en offset-QPSK modulation, för att få låga amplitudvariationer.

Process Gain

IS-95 har i synk-kanalen 1024 chips/bit, dvs 30 dB process gain. Trafikhastigheten kan variera från 1200 till 14400 bps, det motsvarar 1024 till 85 chips/bit. Process gain blir då så lågt som 19 dB.

Tredje Generationen

1. Inledning

För att få högre kapacitet och högre datahastighet infördes 3:e generationens mobilsystem. Till det används ett nytt frekvensområde vid 2 GHz, samt nya modulationer. GSM finns fortfarande kvar. 3:e generationen blir till att börja med ett tillskott i storstäderna. De två systemtyperna som har vidareutvecklats till 3G är mobiltelefon (cellular) och sladdlösa telefoner (cordless).

Mobiltelefon är optimerat för att klara mobiler som rör sig snabbt (bil och tåg), i stora celler med snabb fading. Det gör den mer komplicerad, dvs högre samtalskostnad.

Sladdlösa telefoner är optimerade som decentraliserade halvstatiska system, för högsta kapacitet (små celler). Mobilerna är stillastående eller rör sig långsamt. I första hand installeras systemen för mobiltelefon. De sladdlösa telefonerna kan vara ett tillägg för att få mer kapacitet inomhus.

Den högre datahastigheten medför många nya datatjänster utöver att vara en telefon. Mobiltelefon är alltså inte bra namn. Det är bättre att kalla det mobilsystem.

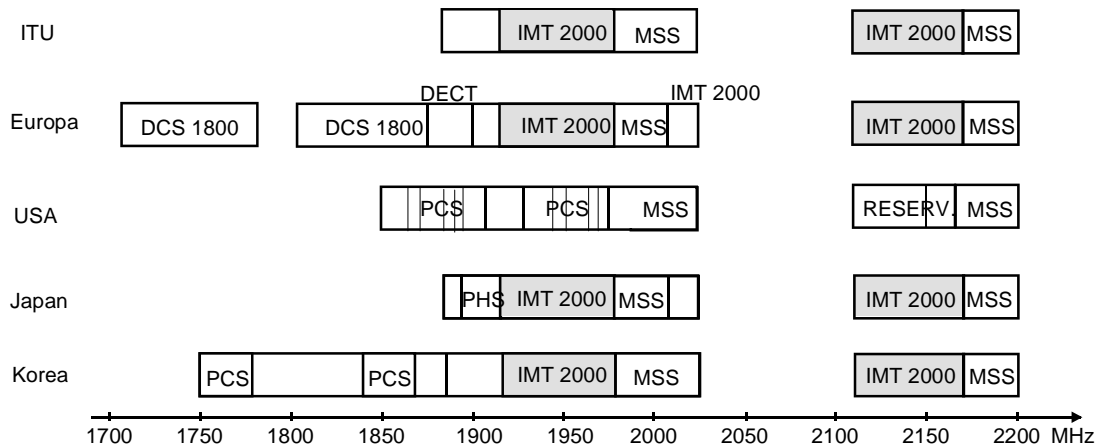
Standardisering av 3:e generationen

Olika standardiseringsorgan använder olika arbetsnamn för tredje generationens mobilkommunikation.

Globalt	ITU IMT 2000	International Telecommunications Union International Mobile Telecom
Europa	ETSI UMTS UTRA	European Telecom Standards Institute Universal Mobile Telecom System UMTS Terrestrial Radio Access
Japan	ARIB IMT 2000	Association of Radio Industries and Businesses
USA	Operatörerna som äger spektrat väljer teknik, service och tidpunkt för införandet. FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecom System
3 GPP	3:rd Generation Partnership Project Ett gemensamt standardiseringsorgan av UTRA mellan Europa, Japan, Korea, USA och Kina	

Frekvenser

De flesta länder och organisationer för standardisering har kommit överens om vilka frekvensband som ska användas till 3G



Parade Band

Cellular

FDD

W-CDMA

1920 - 1980 MHz upplänk

2110 - 2170 MHz nerlänk

Oparade Band

Cordless , asymmetrisk trafik

TDD

TD-CDMA

1900 - 1920 MHz

2010 - 2025 MHz

Satellit

MSS

1980 - 2010 MHz

2170 - 2200 MHz

3:e generationens modulationer

Europa, Japan och många länder har valt modulationen W-CDMA till 3:e generationens mobiltelefon. USA och några länder kommer dessutom att använda cdma2000, som är en vidareutveckling av IS-95.

W-CDMA är av typen cellular. Här används olika frekvenser för sändning respektive mottagning. Det gör att systemet klarar stora celler, med mobiler som rör sig med hög hastighet.

De frekvensområden som inte går att para ihop kan användas till cordless, och kommer att användas i små celler med korta fördröjningar, för att få hög datahastighet. Modulationen är TD-CDMA eller TD-SCDMA. Här används samma frekvens för både sändning och mottagning.

Det system som först byggs upp är med modulationen WCDMA. TD-CDMA blir ett senare tillskott för att få högre kapacitet i picoceller inomhus.

3:e generationens tjänster

Den högre datahastigheten gör att man kan förmedla tjänster som innehåller datatrafik och multimedia. Utöver ljud och text kan den större bandbredden överföra bild och video. Som multimedia räknas snabbare Internet, videokonferens, interaktiva nöjeskanaler, sjukvård på distans, elektronisk nyhetsinsamling och videoövervakning vid nödläge.

2. WCDMA

Grundkonceptet antogs 1998. Specifikationerna arbetades fram 1999, och kommersiell start 2002. Datahastigheten är 2 Mbps inomhus, 384 kbps utomhus och 144 kbps till snabba bilar och tåg.

Modulationen är WCDMA, dvs bredbandig CDMA (Wide band CDMA). Med 5 MHz bandbredd får man 8 ggr högre kapacitet jämfört med 1,25 MHz CDMA. På 15 MHz spektrumbredd blir det dubbelt så hög kapacitet som IS-95 (respektive GSM).

Ytterligare en fördel jämfört med GSM är den flexiblare hanteringen av kapaciteten till olika användningar.

Varje bärvåg (carrier) delas in i flera fysiska kanaler. De fysiska kanalerna definieras med sina speciella koder. Transmission av tal sker med 32 ksps. En datahastighet på 384 kbit/s kan överföras på tre stycken 256 ksps fysiska kanaler.

Bandspridningskoden har en chiphastighet på 4,096 Mcps.

Pilotsymboler

Pilotsymboler används i varje frame, tillsammans med data. De används till inställning av den koherenta Rake-mottagaren. Med dess 2 - 3 dB högre känslighet får man större täckning. Koherent detektering används på både upp- och nerlänk. Pilotsymbolerna är så viktiga för systemets funktion att de vanligtvis får 10-20 % av totala uteffekten.

Med pilotsymboler i varje förbindelse kan man använda adaptiva antenner för att optimera antenndiagrammet till varje mobil.

Räckvidd

Vid tal klarar WCDMA några dB mer förluster än GSM. Det ger bättre räckvidd. Med 144 kbit/s kretskopplad data får man samma räckvidd som GSM. Det betyder att man kan placera basstationerna på samma plats (sajt).

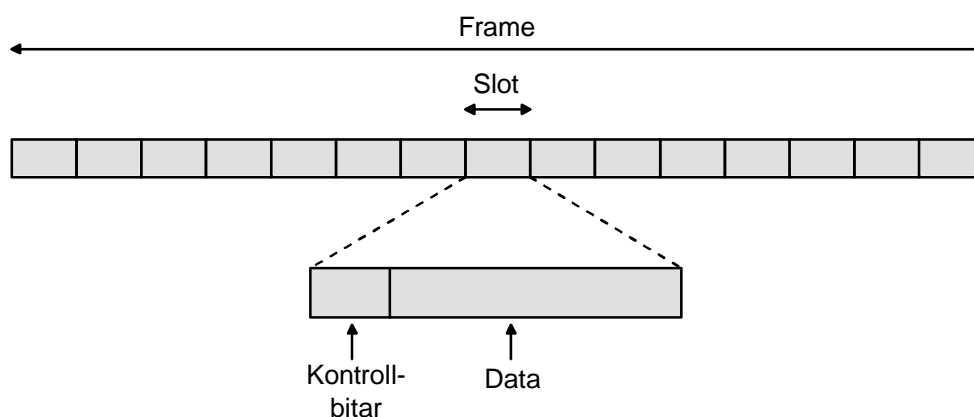
Nätverk

Det kommer att finnas två olika typer av nätverk till WCDMA, dels ett GSM-baserat nätverk och dels det amerikanska ANSI-41. Båda nätverken klarar både kretskopplad och paketkopplad trafik.

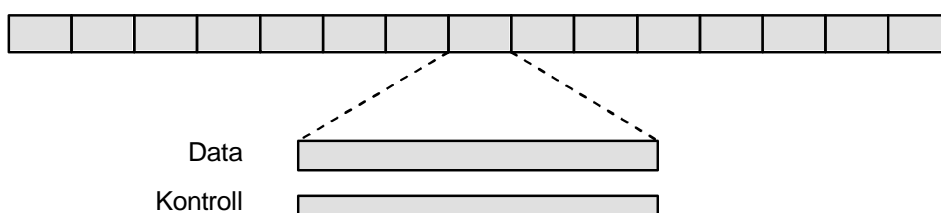
Basstationerna kallas här Node-B. Varje RNC (Radio Network Controller) kan hantera upp till några hundra Node-B. Den största intelligensen ligger i RNC, Node-B fungerar främst som ett modem.

Uppdelning i grupper

Sändningen delas upp i grupper (frames) som är 10 ms långa. Varje frame delas in i 16 stycken 0,625 ms långa sändningar (slot).



En slot innehåller dels kontrollbitar och dels databitar. På nerlänken ligger kontrollbitar och databitar efter varandra inom varje slot. Antalet bitar i nerlänken varierar mellan 20 - 1280. Det motsvarar bithastigheten 32 - 2048 kb/s, för en bandspridning på 256 - 4. Högre datahastighet kan man få genom att parallellkoppla flera fysiska kanaler.

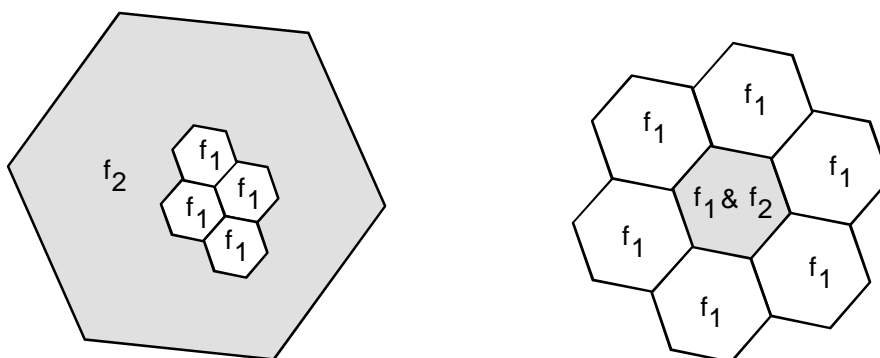


I upplänken sänds kontrollbitar respektive databitar på två parallella fysiska kanaler. Här sänds mellan 10 - 640 bitar per slot. Det motsvarar 16 - 1024 bitar per fysisk kanal, för en bandspridning på 256 - 4. Även i upplänken kan flera kanaler parallellkopplas för att få högre datahastighet.

Hierarkisk uppdelning

Ett vanligt sätt att öka ett systems kapacitet, är att adderas ytterligare en basstation. Men det ger en högre störnivå till de intilliggande basstationerna, som måste justeras om. Med hierarkisk uppdelning är det lättare att addera kapacitet, utan att behöva göra justeringar i ett större område. Det är speciellt viktigt att slippa dyrbara cellplaneringar om det är tillfällig kapacitet som ska adderas.

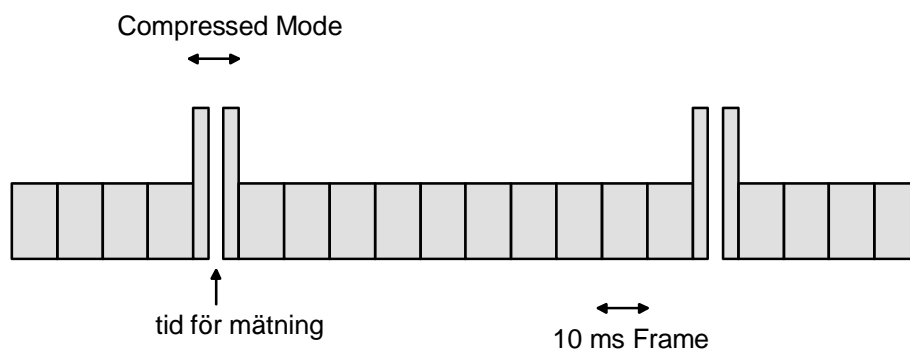
En operatör som har tilldelats två frekvenser kan använda den ena till ett macrolager, och den andra till microceller. En tredje frekvens kan tilldelas ännu mindre picoceller inomhus. Ett annat sätt att få hög kapacitet på vissa platser (hot spot) är att ge de cellerna fler frekvenser.



I WCDMA påverkar kapacitet och räckvidd varandra. Högre uteffekt påverkar räckvidden direkt, men kapaciteten ökar inte i motsvarande grad för ett system som är begränsat av interferens. Om basstationens uteffekt fördelas till två olika frekvenser, minskar interferensen så mycket att kapaciteten kan öka 90 %.

Compressed Mode

För att kunna utnyttja hierarkiska lager behövs hand-over mellan olika frekvenser (IFOH - inter frequency hand over). Vid hand-over till en annan frekvens, eller till GSM, behöver systemet stängas av en kort tid för att göra mätningar. CDMA innebär ju annars att sändning och mottagning sker kontinuerligt.



Compressed Mode innebär att bandspridningen minskar med en faktor 2 i en viss frame. Sändningen sker då under 5 ms istället för 10 ms. Resten av tiden i denna frame kan användas för uppmätning på andra frekvenser. För att kompensera förlusten i process gain behöver istället uteffekten ökas med 3 dB under denna frame.

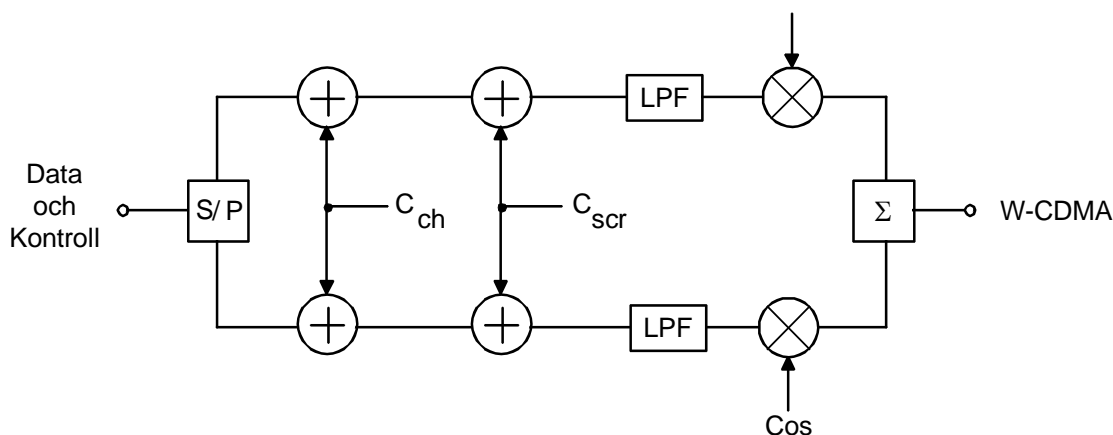
Nackdelen med Compressed Mode är att den lägre spridningsfaktorn förbrukar mer kapacitet.

Variabel datahastighet

De olika kommunikationerna separeras med koder som är speciellt utvalda för att ge hög isolation (liten korrelation) även om datahastigheterna är olika. Koderna kallas OVVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor). Varje bärvåg kan då överföra olika tjänster med variabel bithastighet. Kapaciteten fördelas mellan de olika användarna för varje frame. Men under en frame hålls datahastigheten konstant.

En kanal med högre datahastighet får mindre spridningsfaktor, dvs lägre process gain. När bithastigheten ändras kommer därför uteffekten att justeras för att behålla den garanterade kvalitén (E_b/N_0). Lägre process gain innebär också att det inte får plats lika många samtidiga samtal. Antalet OVVSF-koder är begränsat till 256.

Modulation i nerlänk



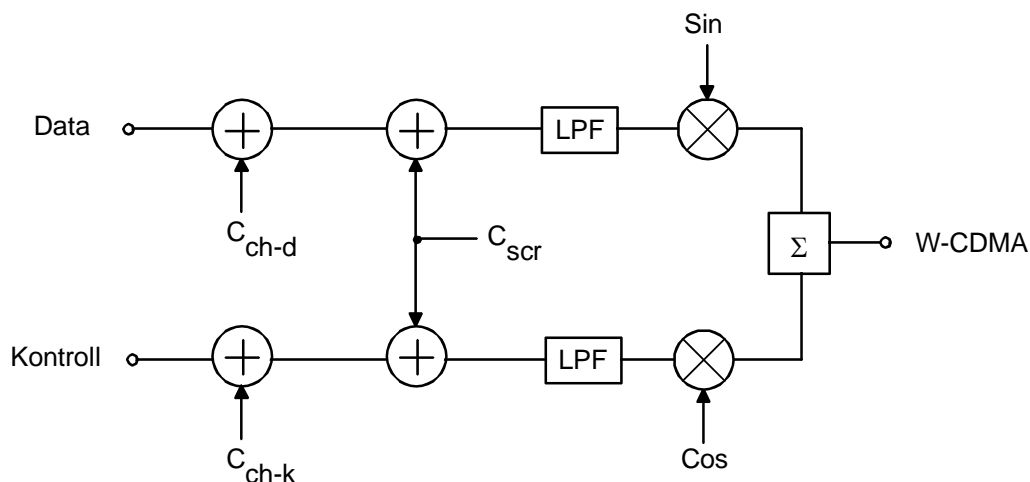
Data delas upp i två parallella bitströmmar, för att längre fram QPSK-moduleras i en IQ-modulator. Varje uppkoppling (fysisk kanal) inom cellen får bandspridning med varsin kanal-kod. Men för en viss fysisk kanal används samma kanal-kod till både I- och Q-kanalen. Kanal-koderna är av typen OVVSF för att kunna ha variabel datahastighet.

Längden på OVSF-sekvenserna (antalet chip per symbol) avpassas för att med önskad datahastighet ge resultatet 4,096 Mcps. Taltrafik på 32 kbps kan spridas med 128 chip/symbol. 384 kb/s använder spridningsfaktorn 8. För att få 2 Mb/s kombineras tre datakanaler med 768 kb/s, som har spridningsfaktorn 4.

Därefter adderas en kod för kryptering (scrambling). Varje cell får en viss scrambling-kod. Om basstationen har uppdelning till flera sektorer, får de olika sektorerna varsin kod för kryptering. Sekvensens första 40960 chip fyller upp en frame på 10 ms. Det finns 512 olika scrambling-koder. För att få effektivare sökning efter celler delas scrambling-koderna in i 32 grupper, med 16 koder i varje grupp. Även om kanal-koderna är begränsade till 256, så gör det stora antalet scrambling-koder att det inte behövs någon kod-planering för cellerna.

Filtret före IQ-modulatorn är av typen "kvadratroten av rised cosine" med en roll-off på $\alpha = 0,22$

Modulation i upplänk



I upplänken används I- och Q-kanalerna som två oberoende BPSK kanaler. Data-kanalen respektive kontroll-kanalen får här bandspridning med varsin kanal-kod (OVSF). Därefter adderas en scrambling-kod som är specifik för aktuell förbindelse. Varje mobil identifieras med sin egen scrambling-kod, som den fått som ett slags serienummer. Slutligen kopplas datakanalen och kontrollkanalen till IQ-modulatorn.

Variationer i amplitud

BPSK och QPSK innehåller kraftig AM-modulation vid fashoppen. WCDMA innehåller toppeffekter ca 10 dB högre än medeleffekten.

TPC (transmit power control)

TPC är helt nödvändigt på upplänken eftersom mobilerna får olika dämpning beroende på avståndet. Basstationen mäter signal/stör förhållandet, och ber varje mobilstation att justera uteffekten i 1 dB steg. Det sker en korrigerings för varje slot, det vill säga 1500 gånger per sekund. Effektregeringen är så snabb att den kan kompensera för snabb färdning. Målsättningen är att samtliga mobiler ska ha samma signalnivå framme vid basstationen.

Men även nerlänken använder TPC för att förbättra systemet. När signalnivån fram till mobilen varierar, justerar basstationen uteffekten. Mobilen ska få sin önskade kvalitet (datahastighet), men det får inte bli mer effekt än nödvändigt. Det gäller att hålla nere medeleffekten för att minska störningarna mellan cellerna.

Pilotsignalen, synksignal och kontrollsignaler, som är mycket viktiga för systemets funktion, tillåts inte att variera i amplitud.

Asynkron cellsökning

WCDMA ska kunna arbeta utan synkronisering med GPS. Sändningen från olika basstationer är alltså inte tidssynkroniserade. Det ger enklare uppbyggnad av system inomhus. Istället för GPS sänder basstationerna själva speciella signaler (koder) för synkroniseringen.

En omodulerad Gold-kod med längden 256 chip sänds för varje slot. Det ger slot-synkronisering. En omodulerad Gold-kod med längden 256 chip sänds parallellt med slot-synkroniseringen under varje frame. Det ger frame-synkronisering.

Genom att välja olika Gold-koder för varje slot får mobilstationen samtidigt information om vilken grupp som basstationens scrambling-kod tillhör. Därefter behöver mobilstationen söka igenom den gruppens olika scrambling-koder. Vid den uppmätningen används pilot-kanalen, som har en känd bitsekvens.

Diversitet

WCDMA har så stor bandbredd att det ger frekvensdiversitet. Men inomhus och i små celler utomhus är den koherenta bandbredden i storleksordning av signalens bandbredd. Det ger då ingen frekvensdiversitet som kan skydda mot fädning. Dessutom rör sig mobilerna så långsamt att det inte går att utnyttja tidsdiversitet. WCDMA kan då istället utnyttja sändning från två antenner.

Paket-data

Med "Packed Data" kan man vara uppkopplad hela dagen, och istället betala för mängden information som överförs. Telefonen kan användas för flera olika tjänster samtidigt, t.ex. ta emot e-mail samtidigt som man pratar.

Den högsta användbara datahastigheten är 400-500 kb/s. Om det behövs högre datahastighet används flera parallella kanaler, det vill säga koder. Med upp till sex parallella koder kan man komma upp i 2 Mb/s användbar datahastighet.

3. Cdma2000

cdma2000 är en vidareutveckling av IS-95, eller cdmaOne som den också kallas. IS-95 har bara en bandbredd på 1,25 MHz. 3:e generationens system har mer resurser med sin kanaldelning på 5 MHz. Men cdma2000 togs med som en 3:e generations standard eftersom man kan få motsvarande resurser genom att stapla ihop tre stycken 1,25 MHz band. Vidareutvecklingen av IS95 har resulterat i några olika standarder.

cdma 2000 1x

Med en enklare uppgradering av IS95 kan man få dubbelt så mycket kapacitet till talkanalerna. Nerlänken modulerar data med 64 olika Walsh-koder, ytterligare 64 koder moduleras ortogonalt. Men det kan fortfarande betraktas som ett system av 2:a generationen.

cdma2000 1x EV-DO

Tillägget "Evolved - Data Only" betyder att det är en utveckling av en kanal som endast transporterar datatrafik. Genom att optimera kanalen för datatrafik går det att uppnå datahastigheter på 2,4 Mb/s. Hela kanalen används som en delad resurs för paketdata. Nackdelen är att om man vill ha telefonsamtal och data samtidigt så behövs det två separata 1,25 MHz kanaler. 1x EV-DO har genomgått olika revisioner där den första kallas Rev 0.

En grundläggande skillnad jämfört med 1x är att 1x EV-DO har tidsmultiplex på nerlänken. Varje mobil kan alltså utnyttja kanalens fulla bredd, under sin tilldelade tid (1,667 ms). Tidsluckan till respektive användare kan också moduleras oberoende av varandra. En användare med bättre mottagning kan alltså tilldelas en högre modulationstyp, med motsvarande högre datahastighet. De olika modulationerna är QPSK, 8-PSK och 16QAM.

Upplänken ser fortfarande ut som för 1x. Med modulationen begränsad till QPSK blir den maximala datahastigheten 153 kb/s. Men i verkligheten blir datahastigheten typiskt 20-50 kb/s

cdma2000 1x EV-DV

DV innebär att både paketdata och kretskopplade samtal (Data and Voice) sker på samma 1,25 MHz kanal. Nya operatörer behöver alltså två nätverk mellan basstationerna, dels ett IP-nät och dels ett kretskopplat switchnät. Men eftersom det går att överföra samtal med IP-nät, väljer man att inte bygga det dyrare kretskopplade nätet. System med Cdma2000 1x EV-DV har inte byggts och arbetet har lagts ner.

cdma2000 1x EV-DO Rev A

Med tillägg av modulationen 8-PSK och lite ny mjukvara kan upplänken nå upp till 1,8 Mb/s (eller typiskt 500-700 kb/s). Det har samtidigt fört med sig att nerlänken förbättrats till 3,1 Mb/s.

cdma2000 1x EV-DO Rev B

Rev B innebär att systemet kan utnyttja flera 1,25 MHz kanaler för att uppnå högre datahastigheter. I princip kan upp till 16 kanaler, tillsammans ge 46,5 Mb/s på nerlänken. Men i praktiken blir det bara upp till 3 kanaler för att uppnå 9,3 Mb/s.

Eftersom fler frekvenskanaler kopplas ihop har systemet också kallats cdma2000 MC (Multi Carrier). Med tre kanaler får man motsvarande resurser som 3:e generationens W-CDMA. Den kombinationen med tre kanaler har också i litteraturen kallats cdma2000 3x eller MC 3x. Men Rev B får inte blandas ihop med den variant som fanns med från början, för att få statusen 3:e generationen.

cdma2000 1x EV-DO Rev C

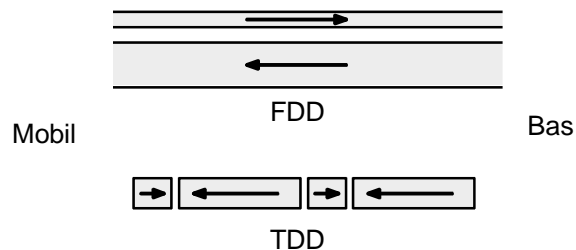
Rev C var tänkt som en framtida utveckling med modulationen OFDM.

GSM/WCDMA respektive cdma2000 har använt olika modulation och olika nätverk. De två systemtyperna har därför haft varsin utvecklingslinje. Nästa generations mobilkommunikation (4:e generationen) innehåller det som går under arbetsnamnet LTE (Long Time Evolution). Målsättningen är att systemet ska ha en sån flexibilitet att det kan fungera som vidareutveckling av båda systemtyperna. Därigenom har arbetet med Rev C avstannat.

4. TD-CDMA

TDD

En finess med TD-CDMA är att man kan använda TDD, dvs tidsduplex. Det är speciellt fördelaktigt om kanalerna är osymmetriska, dvs har olika stor mängd information åt respektive håll.



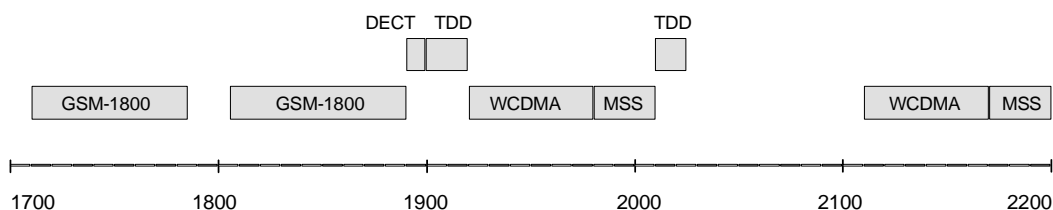
FDD (frekvensduplex) behöver olika bandbredd på de två riktningarna, för att överföra olika mängd information. TDD använder istället olika tidslängd på bursterna, längre tid för mer information.

Osymmetriska kanaler används då man beställer överföring av stor datamängd, till exempel ljud, video eller dokument.

Fördelningen mellan nerlänk och upplänk kanske behöver ändras. Med FDD behövs det då nya filter med andra frekvenser och bandbredder. TDD behöver endast ändra tiderna. Det är mycket enklare eftersom det kan göras med mjukvaran.

Frekvensområde

FDD behöver två frekvensband som inte ligger intill varandra. Det behövs ett skyddsområde mellan FDD-banden för att kunna filtrera frekvenserna för sändning respektive mottagning. De frekvensband som inte går att para ihop till FDD kan istället användas till TDD.



Frekvensbanden för TD-CDMA är 1900-1920 MHz och 2010-2025 MHz. Många operatörer har fått licens för 5MHz TDD tillsammans med 2x15 MHz FDD. Vid planeringen av uppbyggnaden är det viktigt att se till att inte TDD och FDD stör varandra.

Användningsområde

W-CDMA används i stora celler med många mobiler som rör sig med hög hastighet. TD-CDMA kan användas i små celler (pico eller micro) med korta fördröjningar och liten delay-spread, för att uppnå hög datahastighet.

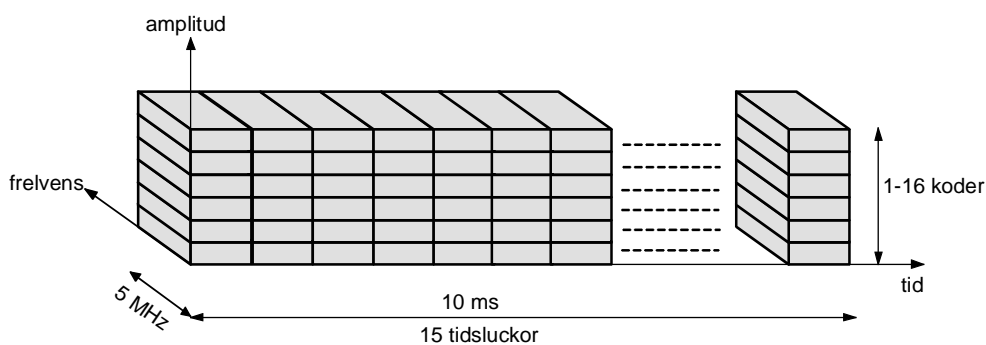
TDD används bland annat till WLAN, Bluetooth och DECT. Det vill säga små system med kort räckvidd som ska överföra datatrafik. Istället för centralt styrd trafikplanering används ett system som automatiskt undviker de frekvenser och tidsluckor som är störande, dvs dynamisk tilldelning av kanal.. Det är speciellt fördelaktigt då flera stationer inom ett område arbetar helt okoordinerat.

En fördel med TDD är att upp- och nerlänk använder samma frekvens, och påverkas alltså lika vid snabb fadning. Effektkontrollen kan då ske med öppen slinga. Dessutom behövs det bara dubbla antenner på basen för att få diversitet åt båda hållen. Ytterligare en fördel är att adaptiva antenner som gör en riktningbestämning av mobilen, kan använda samma inställning för sändningen.

UMTS-TDD

TDD har standardiserats av 3GPP i två olika varianter. TD-CDMA har med 3,84 Mcps optimerats för att samarbeta med W-CDMA. TD-SCDMA är ett kinesiskt mobiltelefonsystem som använder 1,28 Mcps. De två systemen har också kallats UTRA TDD-HCR (high chip rate) respektive UTRA TDD-LCR (low chip rate). Med 3,84 Mcps används ett kanalavstånd på 5 MHz. Systemen med 1,28 Mcps använder ett kanalavstånd på 1,6 MHz. Båda systemen använder QPSK, men TD-SCDMA ska dessutom kunna använda 8PSK.

TD-CDMA



En radioframe på 10 ms är uppdelad i 15 tidsluckor (slot). Varje tidslucka på 666 μs innehåller 2560 chip. Minst en tidslucka ska användas till nerlänken och en tidslucka ska fördelas till upplänken. Övriga tidsluckor kan dynamiskt användas till upplänk eller nerlänk beroende på behovet.

Om mycket information ska överföras kan man använda flera intilliggande tidsluckor i samma frame. Det går också att använda flera koder inom samma tidslucka. Då utnyttjar man olika OVFSF kanalkoder. Varje tidslucka kan använda upp till 16 olika koder. Det betyder att varje frame innehåller 240 användbara block (Resource Units). Kanalkoderna kan ha en variabel spridningsfaktor upp till 16. Ett fåtal användare kan då få motsvarande högre datahastighet.

Varje tidslucka innehåller en sändning (burst) med en given testsekvens (midamble) i mitten. Denna testsekvens används för koherent detektering och för att justera mottagarens frekvensgång (equalizer). Efter sändningen är det ett skyddsområde för att säkerställa att sändning inte sker under mottagning. Skyddsområdet ska vara 96 chip långt, det vill säga 25 μs. Det motsvarar en räckvidd på max 3,75 km. TD-CDMA är alltså avsett för micro-celler och picoceller.

DCA - Dynamic Cell Allocation

Långsam DCA innebär att tidsluckorna fördelas i samarbete med intilliggande celler. Det ger snabb hand-over och minimerar interferensen. Långsam DCA bygger också upp en lista på lämpliga tidsluckor och koder (resource units) som underlag till snabb DCA.

Snabb DCA tilldelar de resurser (tider och koder) som är minst störda. Flera resurser kan tilldelas för att ge högre datahastighet. Om cellen inte är hårt belastad kan snabb DCA variera tidsluckor och koder (och frekvenser) för att undvika interferenstoppar.

Reglering av uteffekten

WCDMA använder Rake-mottagare, men det kräver att alla mobiler ska ha samma signalnivå vid mottagaren. Naturligtvis ska inte uteffekten vara högre än nödvändigt, men det är svårt att reglera effekten med sluten slinga eftersom signalen inte är kontinuerlig. Upplänken är bara reglerad med öppen slinga, dvs genom att mäta mottagen signalstyrka. Nerlänken har däremot en sluten slinga genom mobilen. Intervallen för justering beror på hur tidsluckorna är fördelade mellan upplänk och nerlänk. Effekten justeras i steg på 1 dB, 2 dB eller 3 dB. Men det får vara max 20 dB skillnad mellan olika fysiska kanaler inom en tidslucka.

Undertryckning av interferens

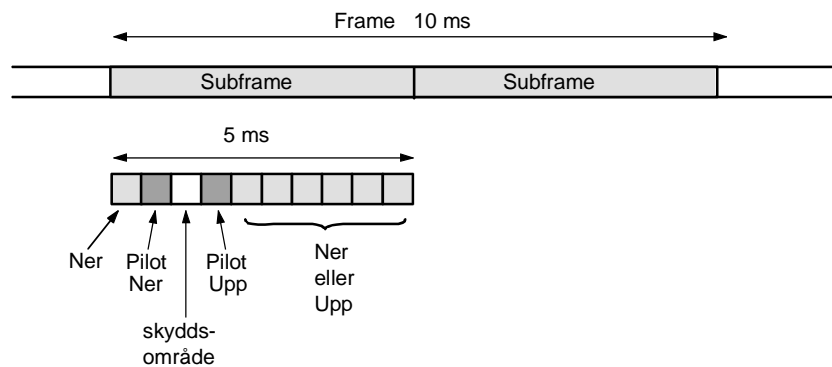
Rake-mottagaren fungerar inte lika bra för TD-CDMA. Spridningsfaktorn är så liten (max 16) att det bildas störande korskorrelation från multipelreflektionerna. Interferensen mellan kanalerna undertrycks därför med avancerad signalprocessor.

Detektering och undertryckning av interferensen kan delas upp i två grupper. Den ena som kallas Joint Detection (eller Multi User Detection) detekterar alla signaler, och samtidigt undertrycker störningen som har hamnat i fel kanal. Den andra metoden kallas Interference Cancellation. De individuella störningarna detekteras och tas sen bort från den totala mottagna signalen. Detekteringen och undertryckningen sker med Interference Cancellation successivt, så att SIR (signal to interference ratio) förbättras för varje steg.

Joint Detector fungerar bäst om det bara är ett fåtal samtidiga signaler. WCDMA har så många samtidiga användare att det krävs en alltför kraftig signalprocessor. Men TD-CDMA har bara 16 koder i respektive tidslucka, vilket ger en rimlig komplexitet. På upplänken är det speciellt lämpligt med Joint Detector eftersom alla kanaler ändå ska detekteras. Dessutom känner ju basstationen till samtliga aktuella spridningskoder och testsekvenser (midamble).

TD-SCDMA

Den kinesiska varianten av 3G använder en chipfrekvens på 1.28 Mcps, vilket ger ett kanalavstånd på 1,6 MHz.



En frame är 10 ms, precis som för TD-CDMA. Skillnaden är att TD-SCDMA delar upp den i två grupper. Varje subframe blir då 5 ms och innehåller 7 normala tidsluckor och 3 speciella tidsluckor. Första tidsluckan är alltid avsedd för nerlänken. De andra sex kan användas till nerlänk eller upplänk efter behov. Efter första tidsluckan i varje subframe kommer de tre speciella tidsluckorna, som innehåller pilotsignal för nerlänk, skyddsområde och pilotsignal för upplänk. Pilotsignalerna används till synkronisering och innehåller olika koder för att särskilja olika basstationer och mobiler.

TD-SCDMA är avsett att vara ett system för mobiltelefon. Det har därför försetts med ett skyddsområde mellan sändning och mottagning, som ger en räckvidd på 11,25 km. Datahastigheten kan vara upp till 2 Mb/s. Mobilerna kan röra sig med en hastighet upp till 120 km/tim.

Synkronisering

En enhet som lyssnar på en svag signal blir mycket störd av en närliggande sändare på samma frekvens. För att inte störa varandra ska samtliga mobila enheter sända samtidigt och lyssna samtidigt. Basstationerna inom ett visst område synkroniseras med varandra och använder lika många tidsluckor till sändning. Men det betyder att asymmetrin mellan upplänk och nerlänk inte kan vara adaptiv för varje mobil. Det blir istället en långsam systeminställning av symmetrin i hela området.

Trots att nerlänken är synkroniserad så blir ändå inte upplänken synkroniserad. De olika mobilerna befinner sig på olika avstånd, så det tar olika lång tid för signalen tillbaka till basstationen. Ett litet överlapp mellan tidsluckorna ger en motsvarande liten störning.

TD-SCDMA har bokstaven S i namnet, som indikerar att upplänken också är synkroniserad. De olika mobilerna tidigarelägger då sändningen lagom mycket för att sändningen ska nå fram till basstationen vid rätt tidpunkt. Basstationen talar då om för varje mobil hur mycket de måste tidigarelägga signalen.

TD-CDMA är avsett för hög datahastighet på korta avstånd. Tidsskillnaden mellan olika signaler på upplänken är då så liten att det går att klara sig utan synkronisering.

5. Sammanfattning

Cellradio ⇒ frekvensåtervinning ⇒ kapacitet

Multipel Access

FDMA, TDMA och CDMA är olika sätt att stapla ihop olika kommunikationer

FDMA Stora krav på filtren för att separera kanalerna

Skyddsområden i frekvens ⇒ sämre utnyttjat spektra

TDMA Noggrann synkronisering i tiden

Skyddsområden i tiden ⇒ mindre datahastighet

Korta burster med hög pulseffekt

CDMA Separerar kanalerna i amplitud, med hjälp av korrelation

Stora krav på amplituden

Duplex

FDD och TDD kräver lika stort frekvensområde. TDD behöver bara ett frekvensband, men switchningen ger dubbla bandbredden.

FDD Cellular behöver ett duplexfilter för att skydda mottagaren från den höga sändareffekten

TDD Cordless använder en enkel duplex-switch. Men det blir opraktiskt vid stora celler, som har hög uteffekt och långa fördröjningar av multipelreflektionerna.

En viss mängd information ska överföras. Access och duplex är bara olika sätt att flytta problemen mellan frekvens, tid och amplitud.

	Cellular	Cordless
Duplex metod	FDD	TDD
Effekt	1 - 20 W	10 - 250 mW
Antenn höjd	> 15 m	< 15 m
Cell storlek	0.5 - 30 km	50 m - 1 km
Fördelar	Stor täckning Snabbt rörliga mobiler Komplett nätverk	Hög kapacitet Låg kostnad Ingen central planering Stor flexibilitet < 6 km/tim

Utbyggnad av GSM

Dual band	t.ex.	900/1800 MHz
Hög kapacitet		mikroceller och inomhus
Hög datahastighet		16 QAM ger 384 kbps
GPRS		Packet Radio – effektivare vid korta överföringar t.ex. e-mail, databas och TCP/IP

3:e generationen

UMTS / IMT 2000		1900 – 2200 MHz
Tre systemtyper		Cellular, Cordless, MSS
Fyra modulationer		WCDMA, Cdma2000, TD-CDMA, TD-SCDMA

GSM har en uppdelning i frekvenskanaler med 200 kHz bandbredd. Varje operatör får ca 40 - 150 kanaler, att fördela mellan olika celler och hierarkiska lager. Om trafiken ökar kan det räcka med att lägga till ett extra sändarsteg.

3G har en kanaldelning på 5 MHz. Varje operatör får 2 - 5 kanaler. Om trafiken ökar kan det behövas en sajt till. Cellernas storlek beror på kapaciteten. Planeringen av täckning och kapacitet behöver göras tillsammans.

Mobilsystem på 900 MHz bandet och 800 MHz bandet

System		GSM	IS-95 CDMA	PDC JDC
Upplänk	MHz	890 (880) - 915	824 - 849	940 - 956
Nerlänk	MHz	935 (925) - 960	869 - 894	810 - 826
Kanalavstånd	kHz	200	1250	25
Användare / kanal		8	55 - 62 (118)	3
Access metod		TDMA	CDMA	TDMA
Modulation		GMSK	QPSK	$\pi/4$ DQPSK
Bandbredd/anv.	kHz	25	20	8,33
Max cellstorlek	km	35	2,5	20
Cluster	minsta	3	1	
Bit hast.	kb / s	271	1228	42
Antal kanaler		8·124	20 (eller 48) ·798	1600
C / I	dB	9	6	17 (13)

Mobilsystem på 1800 MHz bandet, 1900 MHz bandet samt Japan

System		GSM-1800 PCN-1800	IS-95	PDC JDC
Upplänk	MHz	1710 - 1785	1850 - 1910	1477 - 1513
Nerlänk	MHz	1805 - 1880	1930 - 1990	1429 - 1465
Kanalavstånd	kHz	200		25
Användare / kanal		8		3
Access metod		TDMA	CDMA	TDMA
Modulation		GMSK	O QPSK	$\pi/4$ DQPSK
Bit hast.	kb / s	271		42

Cordless

System	DECT	PHS (PHP)	PACS
Område	Europa	Japan	USA
Band MHz	1880 - 1900	1895 - 1918	1850 - 1910
Kanalavstånd kHz	1728	300	300
Antal kanaler	10	77	16
Access	TDMA	TDMA	TDMA
Användare / kanal	12	4	8
Duplex metod	TDD	TDD	FDD
Modulation	GMSK	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ QPSK
Bit hast. kb / s	1152	384	384
C / I dB	12	26	

Mobilsystem 3G

System	WCDMA
Upplänk MHz	1920 - 1980
Nerlänk MHz	2110 - 2170
Kanalavstånd MHz	5
Access metod	CDMA
Modulation	QPSK
Bit hast. med 6 koder	2 Mb/s

Trådlösa datanät

1. WLAN

Wireless Local Area Network

Wireless LAN, eller Radio-LAN, används för att trådlöst koppla datorer till ett lokalt datanät (LAN). WLAN är perfekt som ett flexibelt företagsnät. Det är praktiskt att kunna ha sin bärbara dator ansluten till datanätet oavsett var man sitter. Det är även lämpligt med trådlösa datanät i hemmet, för att få flexibilitet utan lösa sladdar.

För att enheter av olika fabrikat ska kunna fungera ihop behövs en standard. Den amerikanska standarden heter IEEE 802.11 och den Europeiska standarden heter HiperLAN. Skillnaden är att den europeiska standarden gjorts av ETSI som är en organisation för telecom, och den amerikanska har gjorts av IEEE som är mer orienterade mot datacom.

HiperLAN kan med fördel användas till stora nätverk, med allmän anslutning (hotspot), som drivs av en separat operatör. IEEE 802.11 har en styrning (MAC-protokoll) som bara är lämpligt för ett fåtal användare per frekvensband. HiperLAN är dessutom lämplig att användas till samtal och videokonferens, som kräver korta tidsfördröjningar. Däremot saknas det kommersiella produkter för HiperLAN.

Inom dataindustrin har det producerats en mängd billiga apparater efter IEEE 802.11 standarden. Problemet var att de bara var delvis kompatibla eller helt inkompatibla med varandra. Därför bildades WECA (Wireless Ethernet Compability Alliance), som numera kallas för WiFi-alliansen. Det är en ideell organisation för att certifiera 802.11 kompatibla produkter. IEEE 802.11 har vidareutvecklats med en mängd olika tillägg så att standarden börjar likna HiperLAN.

På ISM-banden krävs att signalerna har spektrumspridning (Spread Spectrum), för att minska störningarna mellan olika system. De praktiskt användbara varianterna är frekvenshopp (FHSS), direktsekvens (DSSS) och OFDM.

2,4 GHz bandet sträcker sig internationellt från 2400 till 2483,5 MHz. Däremot har Europa, USA respektive Japan olika krav på maximal uteffekt. På 5 GHz bandet skiljer sig både frekvensgränserna och uteffekten mellan Europa, USA och Japan. Räckvidden är ca 100 m utomhus och ca 30 m inomhus.

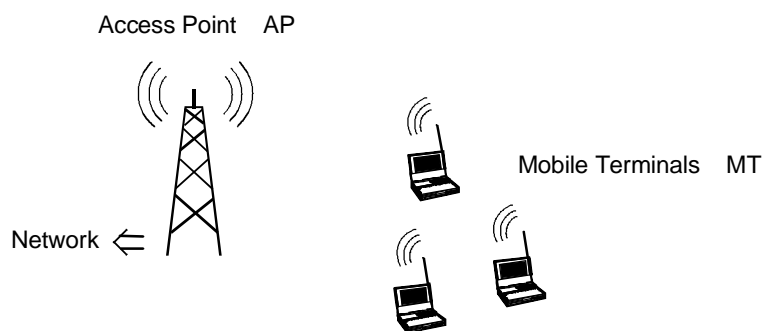
HiperLAN 2

På 5 GHz bandet finns det två frekvensområden som får användas utan licens i Europa. Förutsättningen är att de anslutna apparaterna följer specifikationerna för HiperLAN på RF-sidan.

Det nedre bandet är 5150 – 5350 MHz. Det får plats 8 kanaler, och uteffekten är begränsad till 200 mW. Bandet är tänkt att användas enbart inomhus.

Det övre bandet är 5470 – 5725 MHz. Här får det plats 11 kanaler, som får användas även utomhus. Uteffekten får vara upp till 1 W EIRP.

Avståndet mellan kanalerna är 20 MHz och de olika kanalerna fördelas mellan olika system och celler. Med DFS (dynamisk frekvens selektion) väljs automatiskt den av cellens kanaler som är lämpligast. Systemet använder TDD (time division duplex) dvs växelvis sändning och mottagning på samma frekvens. Det ger stor flexibilitet då det sänds mycket stor datamängd åt bara ena hållet (osymmetriska kanaler). Liksom för GSM-systemet används TDMA (time division multiple access) för att få hög kapacitet.



Det man inom mobiltelefon kallar basstation motsvarar här en Access Point (AP). Därifrån kopplas signalerna till ett nätverk. Kopplingen ska kunna ske i centraliserad mode eller direkt mode. Med centraliserad mode kopplar en MT via AP till en annan MT eller till ett nätverk. I den direkta moden bildas länkar direkt mellan olika MT, i en radiokanal som AP har tilldelat.

OFDM

Modulationen är OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) eftersom det ger bättre prestanda i kanaler som är mycket dispersiva (olika frekvenser påverkas olika). OFDM kan med hjälp av FFT hantera höga datahastigheter, även då multipelreflektionerna ger stor spridning i tiden. System med snabbt modulerad bärvåg (Single Carrier) behöver istället en equalizer. Men en equalizer kräver 10 gånger fler multiplikationer per sekund, dvs blir 10 gånger mer komplex. OFDM behöver bara hälften så många logiska kretsar som "single carrier".

WLAN använder 52 bärvågor (subcarriers). 48 bärvågor för data och 4 bärvågor för pilotsymboler. Pilotsymbolerna hjälper till med faslåsnings i den koherenta demoduleringen. För att få enklare filtrering mellan banden används endast 52 subkanaler från en FFT på 64 punkter. Avståndet mellan subkanalerna är 312,5 kHz

OFDM symbolerna varar i 4 μ s, varav skyddsområdet är 0,8 μ s. Det gör att systemet kan hantera en spridning i vågutbredning (delay-spread) på 250 ns, i en utomhuscell med 100 m räckvidd.

Modulation av bärvågorna

Mode	Modulation	Code rate	Bit rate
1	BPSK	1/2	6 Mb/s
2	BPSK	3/4	9
3	QPSK	1/2	12
4	QPSK	3/4	18
5	16QAM	9/16	27
6	16QAM	3/4	36
7	64QAM	3/4	54

Varje frekvens kan moduleras på olika sätt. För en viss BER och C/I väljer systemet lämplig modulationstyp. Det ger högsta möjliga datahastighet för aktuell kanal. 64 QAM används endast som en extra option i Hiperlan. Pilotsymbolerna är alltid modulerade med BPSK.

Modulationen har ett dynamikområde som ska få plats ovanför brus och störnivån. BPSK behöver ett C/I på ca 9 - 13 dB, det resulterar i en känslighet på -85 dBm. 64 QAM har så stort dynamikområde att det behövs 26 - 30 dB C/I. Det ger känsligheten -68 dBm.

Det stora dynamikområdet på signalen betyder att effektförstärkaren i slutsteget behöver vara linjär. Men maximala effekten är endast 200 mW respektive 1 W, så det blir ganska billiga kretsar ändå.

Störningar

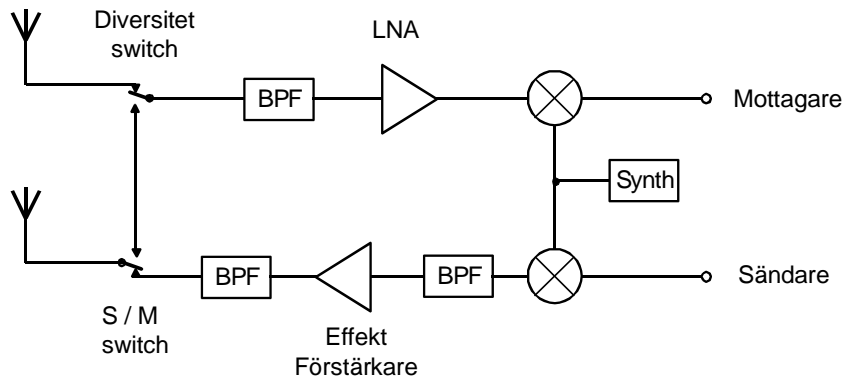
Dynamiskt frekvensval (DFS – Dynamic Frequency Selection) innebär att mottagaren först lyssnar för att avgöra om kanalen är ledig. Det är speciellt för att undvika radar och satellitkommunikation som finns på 5 GHz bandet. Det betyder också att det inte behövs någon frekvensplanering. Då flera system används i samma område, väljer de automatiskt kanaler, så att de stör varandra så lite som möjligt.

TPC (Transmit Power Control) reglerar uteffekten så att det inte sänds mer effekt än nödvändigt. Det minskar den allmänna störnivån då flera system ska arbeta samtidigt. AP ser ungefär samma signalnivå från de olika terminalerna. Det förenklar konstruktionen av mottagaren.

Prioritering

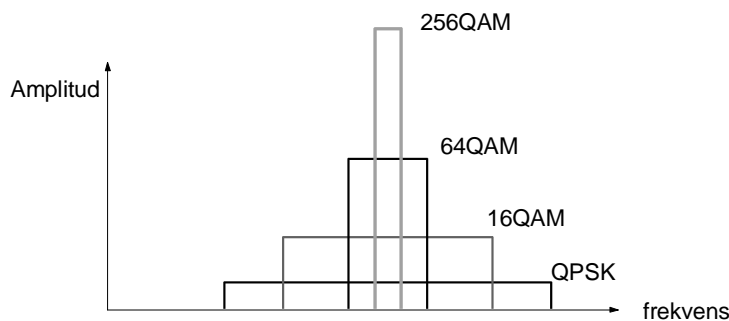
HiperLAN markerar datapaketerna med önskad prioritet, för att ge transmissionen en viss garanterad kvalitet (QoS – Quality of Service). Det är speciellt viktigt för samtal och videokonferens, som kräver korta tidsfördröjningar.

Blockschema



Ofta används två antenner för att kunna utnyttja diversitet vid mottagningen. De flesta övriga komponenterna kan tillverkas monolitiskt. Däremot är det lämpligt att effektförstärkare och filter tillverkas separat.

Bandbredd – Amplitud



Figuren visar hur samma mängd informationen fördelas för olika modulationer. QPSK har konstant amplitud och kan klara svaga signaler, med den behöver klockas snabbt så bandbredden blir stor. 256QAM har stor amplitudvariation som måste få plats ovanför brusnivån. Men det räcker med en liten bandbredd för att överföra informationen.

För att öka datahastigheten i ett system behöver man alltså antingen öka amplitudvariationerna eller öka bandbredden.

IEEE 802.11

802.11 – Frekvenshopp

Frekvensområdet 2400 – 2483,5 MHz är indelat i 79 stycken 1 MHz subkanaler. Varje kommunikation har en bärvåg som hoppar efter en av 78 olika hoppsekvenser, för att inte störa varandra.

Bärvågen moduleras med GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Symbolen 1 ger en förskjutning mot högre frekvens, och symbolen 0 en förskjutning mot lägre frekvens. Förskjutningen ska vara minst 110 kHz. Med Gaussisk menas att inställningen är avrundad för att inte ge transienter som stör i andra subkanaler. Byte av frekvens sker på 224 μ s. Skiftet mellan sändning och mottagning sker på 19 μ s.

Med två alternativa frekvenser (2GFSK) blir datahastigheten 1 Mbit/s. Med fyra nivåers modulation (4GFSK) blir datahastigheten 2 Mbit/s. Varje bärvåg kan då skiftas till en av fyra olika frekvenser, med minst 135 kHz avstånd.

802.11 – Direktsekvens

Informationen moduleras med fashopp. D-BPSK ger datahastigheten 1 Mbit/s, och med D-QPSK blir det 2 Mbit/s. Varje symbol moduleras dessutom med en 11 chip Barker-sekvens för att få 22 MHz spektrumspridning.

Med 5 MHz kanalavstånd får det plats 13 kanaler (11 i USA) om man låter kanalerna delvis överlappa varandra. Men det får bara plats 3 helt oberoende kanaler.

Frekvenshopp har inte utvecklats vidare som LAN. Frekvenshopp behöver ett signal/brus förhållande på 18 dB, medan direktsekvens klarar sig på 12 dB. Det ger kortare räckvidd för frekvenshopp. Däremot används frekvenshopp till Bluetooth, som är ett mer personligt datanät (PAN – Personal Area Network).

802.11 b – CCK

För att få högre datahastighet väljs en av 64 komplementära spridningskoder för att definiera en symbol (CCK – Complimentary Code Keying). Med QPSK-modulering tillförs ytterligare 2 bitar. Det resulterar i sammanlagt 8 bitar per symbol. Med 1,375 MS/s blir datahastigheten 11 Mb/s. Om 4 bitar används per symbol blir hastigheten istället 5,5 Mb/s.

Beroende på vågutbredning och störnivå ska den högsta möjliga datahastigheten automatiskt kunna väljas. Vid behov ska 802.11 b även kunna arbeta med 1 eller 2 Mb/s enligt 802.11 direktsekvens. Däremot är den inte bakåtkompatibel med 802.11 frekvenshopp.

Signalens bandbredd är 22 MHz. Med kanalavståndet 25 MHz får det plats 3 kanaler. Med delvis överlappande kanaler får det plats 6 kanaler på 10 MHz avstånd. Uteffekten får vara max 100 mW.

802.11 a – 5 GHz

Hiperlan/2 och 802.11a ska ha samma RF-interface (PHY layer), skillnaden ligger i protokollen (MAC layer). Hiperlan/2 är centraliserat och 802.11a är distribuerat, dvs har enklare signalprocessor. Hiperlan/2 har högre prestanda, speciellt vid höga datahastigheter. 802.11a är lämplig för applikationer med lägre prestanda. En fördel med 802.11 är att den går att köra utan AP.

För att 802.11 ska bli jämförbar med HiperLAN behövs dynamisk selektion av frekvensen, reglering av effekten och styrning av prioritet. Dessutom behövs förbättrad kontroll av identitet och bättre kryptering.

Protokollen som styr sändningen ligger i MAC lagret (Medium Access Control) 802.11 har ett distribuerat MAC protokoll baserat på CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance). Det innebär att mottagaren först kontrollerar att det inte pågår någon sändning, sen kan den sända själv.

I Hiperlan/2 styrs sändningarna centralt från AP genom tidsdelning (TDMA). Sändning och mottagning separeras med tidsduplex (TDD).

Det Japanska systemet HiSWANa, som utarbetats av ARIB, har både ett RF-interface och ett MAC protokoll som liknar HiperLAN/2.

Frekvensbanden skiljer sig för de olika systemen. 802.11a är designat för 200 MHz brett band. HiperLAN/2 kräver 330 MHz spridning över 5150-5350 och 5470-5725 MHz eller 255 MHz över 5470-5725 MHz. Modulationen är OFDM med 52 subkanaler. Det kan teoretiskt ge en datahastighet på upp till 54 Mb/s, men en mer praktisk uppkoppling ger en överföring på 20 Mb/s.

802.11 g

Eftersom OFDM fungerar bra vid höga datahastigheter har den adderats som standard på 2,4 GHz bandet. Det ger datahastigheter upp till 54 Mbit/s. Men för att vara bakåtkompatibel med 802.11b behövs dessutom CCK-modulering. CCK används för att sända paketets inledning (preamble & header), medan OFDM används för att sända själva datadelen. Inledningen med CCK behövs för att alla WiFi enheter ska få veta att sändning har startat och hur lång den kommer att vara, så att det inte uppstår kollisioner.

Eftersom WiFi enheterna inte kan höra OFDM sändningar, är det inte lämpligt att använda CSMA/CA som MAC-protokoll. Dessutom kan det hända att en MT kan höra AP men inte andra MT. En MT kan därför tycka att det är tyst och börja sända, samtidigt som AP tar emot signal från en dold MT. Därför har RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) tagits med i 802.11 standarden. Varje MT måste sända ett RTS-meddelande och ta emot ett CTS-svar innan sändning kan börja.

En enhet med 802.11g ska automatiskt kunna välja 802.11g eller 802.11b eller 802.11 beroende på störnivån.

Med OFDM på 2,4 GHz bandet kan det bli möjligt med enheter för dubbla band. Systemet väljer 5 GHz bandet om det är för trångt på 2,4 GHz bandet, men väljer 2,4 GHz om det behövs längre räckvidd.

802.11 d

Anpassning till olika länders tillåtna radioband

802.11 e

Bandbredd tilldelas beroende på sändningens innehåll. Förbättringar för att hantera samtal och videokonferens, med en fördröjning helst mindre än 20 ms (Quality of Service).

802.11 h

Dynamisk frekvensselektion och reglering av effekten för att 802.11a ska få användas i Europa.

802.11 i

MAC-protokollet har utvidgats med bättre kryptering och förbättrad kontroll av identitet.

802.11 j

Anpassning till frekvensuppdelningen i Japan

802.11 n

Med två antenner på mottagaren kan man få diversitet. Mottagaren väljer då den antenn som har största signalen. Den andra antennen har då signal och reflektioner som adderas i motfas. Den antennen kan istället användas för att ta emot en annan sändning. Med två antenner på sändaren också, kan man få två parallella sändningar, som i viss mån sorteras upp i de två antennerna på mottagaren med hjälp av en signalprocessor.

System med flera antenner på både sändaren och mottagaren kallas MIMO (Multipel Input Multipel Output).

Specifikationen för 802.11n är fortfarande under utveckling. En färdig specifikation kan möjligen komma i januari 2010. Men det finns företag som redan 2006 sålde produkter som de kallade pre-n , draft-n eller MIMO-based. WiFi Alliansen bestämde sig därför att redan 2007 börja certifiera en förhandsversion. När standarden är klar behöver det bli en ny certifiering med en ny logotyp.

802.11 p

WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment) är en specifikation för transportmedel t.ex. ambulans, bussar och tåg. Den förväntas bli klar 2009.

802.11 s

ESS (Extended Service Set) är en specifikation för mesh-nät som endast finns som draft 2009.

Sammanställning WLAN

	Frekvens GHz	Hastighet Mb/s	Antal kanaler	Modulation	Datahast. Mb/s
802.11	2,4	2	14	PSK	1,2
802.11 b	2,4	11	14	CCK	5
802.11 g	2,4	54	3	OFDM	22
802.11 a	5	54	19	OFDM	32
802.11 n	2,4 & 5	248	19	OFDM	74

2. Bluetooth

Bluetooth är en trådlös kommunikation som kan ersätta kablar mellan små elektroniska apparater. Genom att utnyttja det fria ISM-bandet på 2,45 GHz, kan man använda systemet utan att söka licens. Men en förutsättning är att överföringen använder spektrumspridning och har låg uteffekt (<100 mW).

Bluetooth använder frekvenshopp (FH) för att få spektrumspridningen. Med frekvenshopp går det att få billiga radiosystem på låg effekt, så att det passar enkla elektroniska apparater. Även om radion har ett stort hoppområde så är den momentana bandbredden ganska liten. Den blir då ganska tålig mot störningar. När radion hoppar till en störd frekvens får man bitfel, men det kan hanteras med felrättande koder och ARQ (återsändning). Med adaptivt frekvenshopp (AFH) detekteras störningar från andra typer av system, för att undvika att använda just de frekvenserna.

En annan fördel är att systemet kan hantera fädning på samma sätt. En viss frekvens kan vara helt utfasad av en multipelreflektion. Men systemet befinner sig bara en kort stund på den frekvensen.

Frekvensområdet är ISM-bandet 2,4 - 2,4835 GHz. Kanalavståndet är 1 MHz, och hoppen sker med 1600 hopp per sekund. Inom området 2,402 - 2,480 GHz används 79 kanaler. Varje hoppintervall (slot) varar i 625 μ s. Varannan slot används för sändning respektive mottagning (TDD).

Bluetooth startade som ett samarbete inom industrin för att få fram en gemensam standard för trådlös överföring mellan apparater. Bluetooth SIG (Special Interest Group) bildades 1998 och har nu ca 12000 medlemmar. Bluetooth är en öppen standard, utan royalty inom gruppen.

Bluetooth kan användas för inkoppling av kringutrustning till bärbar dator eller mobiltelefon. Både tal och data kan hanteras samtidigt. När apparaterna är i närheten av varandra kan man t.ex. få automatisk synkronisering av kalender, e-mail och adressbok. Sändning kan ske från punkt till punkt (P-P) eller från punkt till multipunkt (P-MP). Jämfört med trådlösa LAN (WiFi) kostar Bluetooth bara en tredjedel och har en effektförbrukning som bara är en femtedel.

Modulation

Inom varje inställd frekvens är signalen FSK-modulerad. Modulationsindex mellan 0,28 - 0,35 ger en deviation upp till 175 kHz. En binär etta ger högre frekvens och en nolla ger lägre frekvens. Dataflödet filtreras med ett Gaussiskt filter med $BT=0,5$. Bandbredden är alltså tillräckligt stor (Nykvist) för att slippa interferens mellan symbolerna. Med 1 MHz kanaldelning kan man komma upp till 1 Msps.

Med hjälp av en faslåst slinga (PLL) blir oscillatoren inställd till rätt frekvens, till en noggrannhet på ± 75 kHz. Därefter moduleras oscillatoren. Modulationen kan ske efter syntesgeneratoren med hjälp av en IQ-modulator (SSB-modulator).

Ett lite enklare sätt är att först låta slingan stabilisera, och sedan öppna slingan för att modulera oscillatoren. Förutsättningen är förstås att oscillatoren inte hinner driva i frekvens under sändningen. Men redan efter 625 μ s ska den ju hoppa och låsa till en annan frekvens. Driften får var högst ± 40 kHz över 5 slot. En nackdel med den öppna slingan kan vara att starka störningar kan påverka oscillatorens frekvens.

Ett tredje sätt är att direkt programmera en syntesgenerator (Fractional-N) till rätt frekvens i takt med modulationen. Nackdelen är att den är lite svårare att tillverka och tar upp mer plats på monoliten.

Med högre modulationstyp kan man överföra fler bitar per symbol, och få högre datahastighet. Med $\pi/4$ -DQPSK blir datahastigheten 2 Mb/s, och med 8-DPSK kommer man upp till 3 Mb/s.

Uteffekt

Uteffekten specificeras i tre olika klasser:

Klass	1	upp till	100 mW	20 dBm
	2		2,5	4
	3		1	0

Med en uteffekt upp till 1 mW får man en räckvidd på 10 cm till 10 m. Med 100 mW går det att uppnå 100 m räckvidd.

Klass 1 som har den högsta uteffekten ska ha effekttreglering. På mottagarsidan mäts först signalnivån med RSSI (Receiver Signal Strength indicator) och rapporterar tillbaks till sändaren om effekten behöver ökas eller minskas. Sändaren justerar nivån stegvis. Storleken på stegen är 2 - 8 dB. Nivån ska kunna regleras ner till 4 dBm eller lägre. RSSI ska se till att nivån ligger mellan -56 dBm och -36 (± 6) dBm. Klass 1 används främst inom industrin. Om mottagaren inte kan mäta och rapportera nivån, ska sändaren gå över till klass 2 eller 3.

Mobila enheter använder vanligtvis klass 2 som ger en räckvidd på ca 10 m. Klass 3 som har den lägsta uteffekten har en räckvidd upp till 1m.

Mottagare

Om man väljer samma MF som för DECT, dvs 110,6 MHz, så finns det redan tillgängliga SAW-filtrer till låg kostnad. Nackdelen är ytterligare en kapsel.

Med en MF på 5 – 10 MHz blir den procentuella bandbredden på kanalfiltret 10 - 20 %. Ett filter kan då byggas med komponenter som har så lågt Q-värde att de kan tillverkas direkt på chip. Nackdelen är att det behövs en blandare som undertrycker spegelfrekvensen (IR-mixer), för att inte detektera signaler på andra kanaler.

Med blandning till en så låg MF som halva kanalbredden kan man använda ett lågpassfilter med DC-notch. Det filtret kan integreras med övriga halvledare direkt på chip. Bluetooth har ett ganska lågt modulationsindex. Därför behövs AGC för att MF-kanalen ska vara tillräckligt linjär.

Direkt nerblandning till basbandet (Direct Conversion Receiver), dvs till MF-frekvensen 0 Hz, kräver också undertryckning av spegelfrekvensen (IQ-mixer). Men nyttosignalen och spegelfrekvensen ligger på samma nivå. Det är större problem med spegelfrekvensen vid låg MF eftersom signalnivån kan vara betydligt större där. Vid direkt nerblandning sker filtreringen av kanalen med ett lågpassfilter.

Nackdelarna med direkt nerblandning är stort LO-läckage ut mot antennen, som kan störa andra mottagare. Och att utsignalen kan ha en DC-offset från de jämna blandprodukterna som alstras i lågbrusförstärkaren och mixern. Dessutom kan 1/f-bruset bli störande på så låga frekvenser.

Med AC-koppling eller högpassfilter minskas problemet vid DC, men signaleffekten runt DC blir ju också undertryckt. I ett TDMA system kan DC-spänningen mätas upp under en tidslucka, för att sedan balansera bort DC-spänningen under mottagningen.

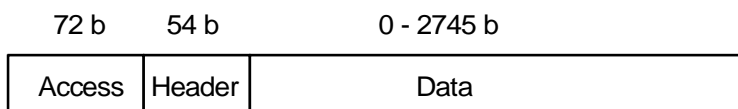
För att direkt nerblandning ska bli riktigt bra behöver LNA och mixer vara mycket linjära så att distorsionen med jämna blandprodukter blir så låg som möjligt. Dessutom behöver LO-signalen ha en noggrann 90° uppdelning till mixerns IQ-ingångar, för att undertrycka spegelfrekvensen. Isolationen i mixern behöver vara mycket hög, och $1/f$ -bruset ska vara lågt.

Mottagaren har en LO som hoppar efter den kod som sändaren anger vid uppkopplingen. Mottagarens känslighet definieras som nivån där rådata har bitfelfrekvensen $BER = 0,1 \%$. Känsligheten ska vara bättre än -70 dBm. $0,1 \%$ BER kräver 21 dB C/N. Det får alltså plats 23 dB brusfaktor ner till brusgolvet på -114 dBm. Men en CMOS förstärkare har en betydligt lägre brusfaktor. Systemet får därför en behövlig marginal på ca 15 dB för att klara fädning i en besvärlig inomhusmiljö.

Profiler

Målsättningen med Bluetooth är ett system som är litet, billigt och har låg effektförbrukning. Därför är det inte gjort för att klara alla applikationer samtidigt. Istället väljer man ut lämpliga profiler som passar aktuell apparat och applikation. I version 1.1 fanns det 13 profiler, dels vissa basfunktioner och dels filöverföring, headset, fax med mera. Version 2 som har över tjugo profiler, har utökats med utskrift, strömmande ljud och video samt stöd för mus och tangentbord. Det räcker alltså inte med att det finns en logotyp med Bluetooth, alla enheter man tänker koppla ihop ska dessutom innehålla de önskade profilerna.

Datapaket



Den första delen av datapaketet (access code) innehåller synkronisering. Nästa del (header) innehåller adressen för önskat pico-nät, samt lite paketinformation. Sen kommer själva datatrafiken.

Mottagaren kontrollerar varje datapakete för att se om det finns bitfel. Om det finns bitfel markeras det i återsändningens header. Därefter sänds samma datapakete en gång till. Resultatet är en mycket snabb ARQ (Automatic Request), fördröjningen är endast en slot. ARQ används endast för data, taltrafik använder istället en kraftfull talkoder.

Transmissionen kan sträcka sig över ett, tre eller fem slot. Det gör att kommunikationen inte behöver vara symmetrisk. Den tillgängliga bandbredden kan fördelas mellan sändning och mottagning efter behov. Högsta symmetriska datahastigheten är 432,6 kb/s och den högsta asymmetriska datahastigheten är 721 kb/s. Med version 2 av Bluetooth kan man nå upp till 3 Mb/s.

Om en slavenhet behöver sända med regelbundna intervall, t.ex. vid tal, kan den begära synkron överföring. Masterenheten reserverar då slot till slavenheten med en bandbredd upp till 64 kb/s. Det får plats två eller tre synkrona överföringar i ett pico-nät. Det synkrona alternativet kan ge symmetrisk eller asymmetrisk paketförbindelse då det krävs låg felfrekvens.

Pico-nät

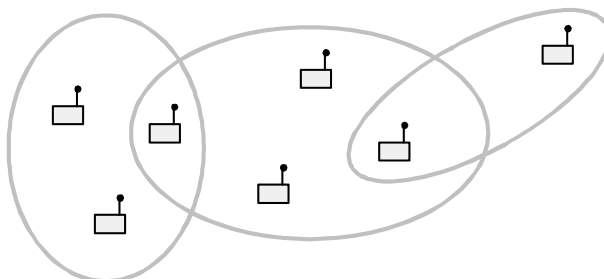
Två eller fler enheter kan kopplas ihop till ett litet nät. En enhet kommer att agera som styrenhet (master), de andra låter sig då styras (slaves). Det är mastern som bestämmer hoppsekvensen och klockningen. Alla Bluetooth-moduler är lika. Det är den enhet som startar nätet som blir master. De övriga blir slavar. Vid uppkopplingen adderas en offset, för att synkronisera till master-klockan.

Alla enheter med Bluetooth tilldelas ett serienummer i form av en 48-bitars adress. Det är masterns 48-bitars adress som används för att ge hoppsekvensen i ett pico-nät.

Största antalet enheter i ett pico-nät är 8 stycken, en master och 7 slavar. Men en enhet kan delta i flera pico-nät, under förutsättning att den bara är aktiv i en i taget (tidsmultiplex).

För att skydda användaren behövs en kod för att komma in i nätet (authentication) samt en krypteringskod. Och hoppsekvenserna varar i över 23 timmar innan de återupprepas. Dessutom finns några koder för signalering, för att starta uppkopplingen.

Scatter-nät



Flera olika pico-nät kan startas, även på platser som överlappar varandra. Ett antal pico-nät som är osynkroniserat ihopkopplade med varandra kallas Scatter-nät. Alla pico-nät utnyttjar samma frekvensområde, men de separeras med olika hoppsekvenser. (FHMA - Frequency Hopp Multiple Access).

Ibland händer det att de befinner sig på samma frekvens och stör varandra. Enstaka störningar gör inget eftersom de felrättande koderna kan justera felen. Men ett hårt lastat system, med antal kanaler i samma storleksordning som antalet frekvenser, får lika mycket interferens som om systemet inte skulle frekvenshoppa. Bäst fungerar FHMA i en svagt belastad omgivning. Men med 10 pico-nät i samma område minskar datahastigheten bara 10 %.

3. BWA

- BWA – Broadband Wireless Access
- FWA – Fixed Wireless Access
- FRA – Fixed Radio Access
- WLL – Wireless Lokal Loop

En radiolänk har kommunikation mellan två punkter (Point to Point). Med fast radioaccess menas kommunikation till många punkter samtidigt (Point to Multipoint). Till skillnad från radio och TV-utsändning ska kommunikationen vara tvåvägs. FWA är i sig inget eget nätverk, det är en trådlös anslutning till ett befintligt nätverk, t.ex. telenätet (PSTN, ISDN), Internet, WAN/LAN eller kabel-TV (HFC).

FWA har tillräcklig kapacitet för att ansluta tiotals trådlösa LAN (hotspots) till Internet.

Användningen har främst varit inriktad på bredbandig access till Internet. I allt fler länder tillåts att FWA-banden också ska kunna användas till att koppla ihop operatörernas basstationer (backhaul). Genom att kombinera applikationerna minskas den ekonomiska risken.

Anslutning till Internet kan ske enligt fyra olika principer.

Fiber	Stor bandbredd men dyrbart
Kabel-TV	2 Mb/s Bandbredden lokalt delad
ADSL	0,5 Mb/s upp till 5 km
VDSL	26 Mb/s upp till 1 km
FWA	3,5 GHz 10 – 50 Mb/s upp till 20 km

FWA är ett bra alternativ för att få stor bandbredd utan de dyra fibrerna. Idag är ADSL och kabel vanligast, men de har mindre bandbredd eller mindre räckvidd jämfört med FWA.

MMDS

Multichannel Multipoint Distribution Service

Används i USA på banden 2500 - 2686 MHz och 2150 - 2162 MHz. De första systemen använde analog VSB och de senare digitala systemen använder 64QAM och 256QAM i 6 MHz kanalbredd. Uteffekten är 15 - 100W. Tre subkanaler med 64 QAM kan kombineras till en 6 MHz RF-kanal. Upplänk sker med QPSK eller 16 QAM på 2150- 2162 MHz.

FWA

Fast Radioaccess på mikrovåg kan i Sverige ske på 3,5 GHz bandet och 10,5 GHz bandet.

3410 – 3438 MHz	3438 – 3466 MHz
3510 – 3538	3538 – 3566

10224 – 10294 MHz
10574 – 10644

Andra länder använder lite olika frekvensgränser. Gemensamt är att 3,5 GHz bandet ligger inom 3,4 - 3,6 GHz och 10,5 GHz bandet ligger inom 10,0 - 10,68 GHz. I Europa har tilldelningen av FWA-tillstånd varit störst på 3,5 GHz och 26 GHz banden. Intresset för 10,5 GHz och 28 GHz banden är betydligt mindre.

LMDS

Lokal Multipoint Distribution System

Främst används 26 GHz, 28 GHz och 40 GHz banden. Även 24 GHz och 32 GHz kan användas. Antennerna kan vara ganska små, och ändå ge hög antennförstärkning, på grund av att våglängden är liten. Med fri sikt och smala antennlobber undviker man problemen med flervägsutbredning. Det ger låg ISI så att man kan använda 16QAM och 64QAM för att få hög datahastighet. Nackdelen är att höga frekvenser ger en ganska kort räckvidd på 2 - 5 km.

Band GHz	Frekvens- område GHz
26	24,5 – 26,5
28	27,5 – 29,5
32	31,8 – 33,4
40	40,5 – 43,5

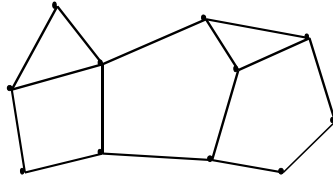
Vågutbredning

Bandet på 3,5 GHz har så låg dämpning i vågutbredningen att det går att använda bandet upp till ca 30 km. Men högre frekvenser får betydligt kortare räckvidd. 10,5 GHz sträcker sig 5 - 10 km, och 28 GHz räcker endast 2 - 5 km.

På högre frekvenser ger dessutom regn ytterligare dämpning. 10,5 GHz får en dämpning på 5 dB/km, och 28 GHz har så mycket som 10 - 30 dB/km regndämpning. På 3,5 GHz blir totala regndämpningen i cellen endast 1 - 2 dB.

Gemensamt för samtliga band är att med PMP (Point to Multipoint) behöver alla fri sikt till närmaste basstation. Även 3,5 GHz får så mycket som 10 - 20 dB extra dämpning om det står ett träd i vägen. Det behövs därför flera överlappande celler för att få bra täckning. Möjligen kan området närmast basstationen ha tillräckliga marginaler för att användas utan fri sikt.

Mesh



Mesh är en nätstruktur där användarna har kontakt med varandra, för att förmedla kommunikationen till närmaste basstation. Någonstans i nätet finns en anslutning till ett fast nätverk. Varje node innehåller signalprocessor och switch för att sända datapaketet vidare till lämplig node i närheten.

Kräver inte fri sikt till en basstation, men får ett mer komplicerat nätverk.

Redundant system, dvs signalen kan gå en annan väg om det uppstår problem. Varje node ska se minst två andra noder.

Nätet är decentraliserat, dvs nätstrukturen är självoptimerande. Systemet kan lätt byggas ut med fler användare så att nätet expanderar.

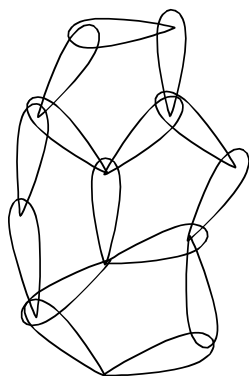
En nackdel är att det är mycket overhead, dvs mycket datatrafik utöver nodens egen användare. Varje node ska ju förmedla andra noders trafik i närområdet. Om det behövs många hopp så blir det låg datahastighet. Nätstrukturen används redan inom Internet, men ett trådlöst bredbandigt nät behöver ytterligare utprovning.

Enheterna vid noderna är mer komplicerade (dyrare) än vid multipunkt utsändning. Men det behövs å andra sidan inte så många basstationer.

Ett system på mm-våg (28 respektive 42 GHz) behöver antenner med högt gain (26 dB) som då automatiskt ska riktas in till lämpliga noder i närheten. En fördel är att ingen effekt slösas bort i någon riktning där det ändå inte finns någon abonnent. Det gör att spektrat utnyttjas effektivare. Totala signalstyrkan i luften blir lägre jämfört med ett multipunkt system, den allmänna störnivån blir alltså lägre.

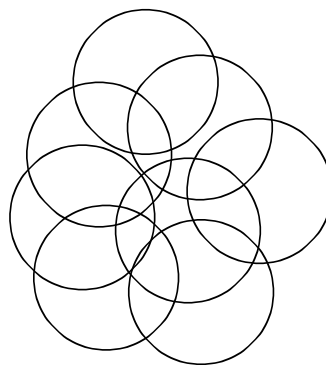
På 3,5 GHz är det inte rimligt med antenner som har hög riktverkan. Istället används rundstrålande antenner som kopplas ihop till en logisk mesh. De olika kanalerna är alltså inte avskilda med hjälp av riktantenner, utan separeras istället med hjälp av olika frekvenser (eller olika koder). Antennerna blir mycket billigare men den allmänna störnivån blir högre.

Physical Mesh



Riktade antenner
Kanalseparation med antenner
Högre C/I
Dyra antenner
mm-våg (28 och 42 GHz)
Fri sikt
IEEE 802.16

Logical Mesh



Rundstrålande antenner
Kanalseparation med frekvenser
Lägre C/I
Billiga antenner
< 10 GHz (2,5 och 3,5 GHz)
NLOS
WLAN
WiMax

IEEE 802.16

802.16 specifikationen ska reglera utrustningarna för LMDS inom 10 - 66 GHz, för att apparater från olika företag ska bli kompatibla. Standarden blev klar April 2002.

Olika frekvensband tilldelas i olika länder. I Europa är kanalerna vanligtvis 28 MHz breda, och i USA används bredderna 20 eller 25 MHz. Området 57 - 64 GHz är licensfritt för allt utom radar.

Modulationen kan vara QPSK , 16QAM eller 64QAM. I upplänk krävs endast QPSK, och i nerlänk krävs QPSK och 16QAM. Övriga modulationer är tillval. Modulation och kodning kan individuellt justeras till respektive abonnent för varje frame. Vid byte av modulation ska antingen toppeffekten eller medeleffekten hållas konstant. En kanal på 25 MHz kan med 64QAM få en datahastighet på 120 Mb/s.

Standarden stödjer både FDD och TDD. En TDMA frame varar i 1 ms. Datapulserna Nykvist filtreras "Square root rised cosine" med en "Rolloff" på 0,25

Korrigerig av frekvensen

För att minska komplexiteten på användarens enhet, gör basstationen regelbundna uppmätningar av inkommande frekvens. Därefter sänds ett meddelande till användarens enhet för att korrigera frekvensen. Frekvensen får inte avvika mer än ± 10 ppm, inkluderat åldring och temperaturvariationer.

Uteffekt

Basstationen mäter också signalnivån på inkommande burst, för att användarens enhet ska reglera till lämplig uteffekt. Effekten ska kunna regleras kontinuerligt i 0,5 dB steg, inom ett dynamikområde på 15 dB. Högsta effekten ska vara minst +15 dBm vid antennporten.

Den maximala uteffekten fördelas över den aktuella bandbredden. Eftersom bandbredden kan variera anges istället effektens spektraltäthet, som räknas på medeleffekten över en burst.

Europa har en begränsning av EIRP på 39 dBW/MHz för användarna och 18 dBW/MHz för basstationerna. Kundenheten kan på frekvensområdet 24,25 - 29,5 GHz använda en parabolantenn med 36 dB gain. Basstationens antennförstärkning beror på antalet sektorer, men kan åtminstone bli 15 dB. Det resulterar i en uteffekt på max 2 W på basstationen, och lite lägre effekt på kundenheterna.

802.16 a

Specifikationen 802.16a är speciellt utformat för frekvensområdet 2 - 11 GHz.

Tre modulationer har föreslagits:

WirelessMAN-SC2	Single Carrier modulation med TDMA
WirelessMAN-OFDM	med 256 punkters FFT
WirelessMAN-OFDMA	med 2048 punkters FFT
	Multipel Access med undergrupper

OFDM är speciellt bra i områden där hustaken är låga och skymms av träd, och det finns mycket flervägsutbredning. Om man använder single-carrier behövs antenner med smal lob för att begränsa spridningen i fördröjning (delay spread). OFDM behöver istället bättre effektförstärkare och noggrannare frekvensinställning.

OFDMA delar upp spektrat i undergrupper. Varje undergrupp har sina frekvenser väl utspridda över hela bandet, eftersom det minskar problemet med frekvensselektiv fading. Undergrupperna används för adressering till enskilda mottagare, samt till att bilda en gemensam upplänk för samtliga användare (Multipel Access). En enskild användare kan utnyttja flera undergrupper för att få högre datahastighet på upplänken.

Utvecklingen är inriktad på fyra systemprofiler.

2,4 GHz	Licensfri
5,8 GHz	Licensfri
2,5 GHz	MMDS
3,5 GHz	Internationell FWA

Specifikationen stödjer Mesh för licensfria band med TDD.

Tillägg till 802.16

802.16.2	Rekommendationer vid flera olika BWA
802.16 b	BWA för licensfria banden 5 - 6 GHz Koordinering av basstationer från olika operatörer
802.16 c	Förbättrad kompatibilitet genom att specificera olika systemprofiler för 10 - 66 GHz området
802.16 d-2004	Fast anslutning för banden 2 - 6 GHz
802.16 e-2005	Tillåter mobilitet mellan basstationerna, 2 - 6 GHz

Jämförelse

Wireless LAN 802.11

QoS med enbart prioritering
Optimerat för ca 100 m
Inget stöd för Mesh
MAC för tiotals användare
Enbart licensfria band
64 punkters FFT

Wireless MAN 802.16

Centralt styrd QoS
Optimerat för upp till 50 km
Stödjer Mesh
MAC för tusentals användare
För både licensband och licensfria band
256 FFT tål reflektioner med större delay spread

802.20

802.20 är en standard under utveckling. Systemet är optimerat för IP-data med överföring på minst 1 MB/s. Användaren ska kunna vara ”alltid ansluten”. Systemet ska ge global mobilitet, för hastigheter upp till 250 km/tim.

Modulationen kan vara QPSK, 16QAM, 64QAM eller OFDM. Systemet ska vara adaptivt för varierande vågutbredning. Både modulation och kodning samt bandbredd och uteffekt justeras för att få konstant felfrekvens för varje frame. (FER – Frame Error Rate) Det ska ge en mjuk justering av datahastigheten.

Frekvenserna ska vara på banden med licens upp till 3,5 GHz. Standarden stödjer både FDD och TDD. Vid FDD är frekvenserna parade med två stycken kanaler på 1,25 , 5 , 10 eller 20 MHz bandbredd. TDD använder enkla band, som istället är dubbelt så stora.

Fördröjningen genom sändare-kanal-motagare och tillbaks ska vara mindre än 10 ms. Den fördröjningen kallas RTT (Round Trip Time) eller ARQ-slingans fördröjning.

Cellerna har samma storlek som för mobiltelefon. Standarden stödjer återanvändning av samma frekvens i samtliga celler. Samma frekvens ska även kunna återanvändas flera gånger inom samma cell (Reuse factor < 1). Med rymddiversitet ska alltså olika abonnenter i olika riktningar kunna använda samma frekvens.

Vidareutveckling av 802.16

I första hand används 256-OFDM, med fyra systemprofiler som täcker de licensfria banden 2,4 GHz och 5,8 GHz samt banden med licens på 2,5 GHz (MMDS) och 3,5 GHz (International FWA). Utvecklingen av standarden för de här låga frekvenserna kallas i fortsättningen WiMAX. I Korea utvecklas en specialvariant av 802.16e som kallas WiBRO (Wireless Broadband), som ger 2,8 Mb/s på nerlänken och 1 Mb/s på upplänken.

4. WiMAX

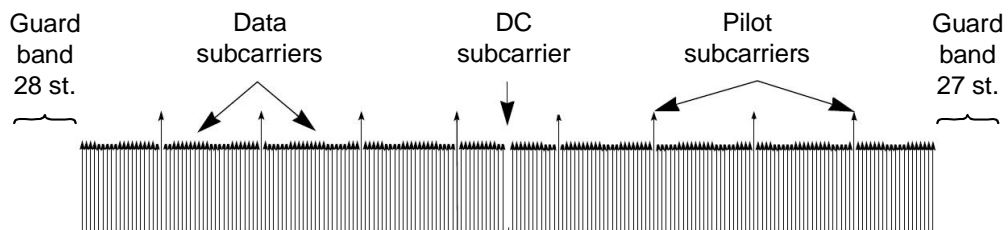
WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

Specifikationerna för IEEE 802.16 ger stort utrymme för olika systemlösningar. För att få en marknad med kompatibla produkter har WiMAX-forum valt ut två profiler att arbeta vidare med. Systemprofilerna innehåller önskade delar av både det fysiska lagret och MAC lagret. ”Fixed WiMAX” som bygger på IEEE 802.16d -2004 är avsedd för system med fast uppkoppling till bredbandig access. ”Mobile WiMAX” som är en vidareutveckling av IEEE 802.16e -2005 är tänkt för nomadiska eller mobila applikationer. Det är också tänkt att den ska användas som nästa generations mobiltelefon i USA. Eftersom det är olika systemprofiler är de inte kompatibla med varandra.

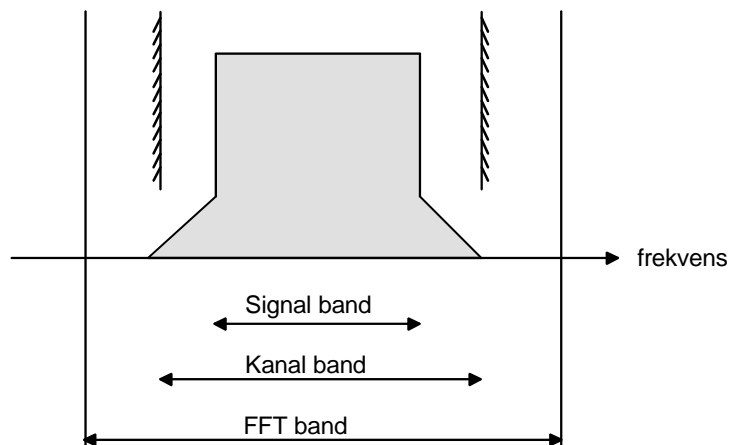
De vanligaste frekvensbanden för WiMAX är 2,5 GHz i USA och 3,5 GHz i Europa. Det går också att använda WiMAX på de licensfria banden 2,4 GHz och 5 GHz, men där finns okontrollerad interferens som kan förhindra kvalitén, QoS.

Bandbredd

Kanalernas bandbredd är 1,75 3,5 7 och 14 MHz enligt ETSI i Europa. Samt i Nord Amerika 1,5 3 6 12 och 24 MHz till MMDS eller 1,25 2,5 5 10 och 20 MHz till WCS (2305 - 2360 MHz).



Modulationen är OFDM med 256 subfrekvenser för WiMAX med fast användning. Av en grupp på 256 frekvenser används endast 200 stycken. Frekvensen i mitten undviks eftersom den kan få problem med DC-offset. För att förenkla filtreringen mellan banden undviker man också de två yttre grupperna med 28 respektive 27 subfrekvenser. Den aktiva återstoden består av 192 bärvågor för data och 8 bärvågor som pilotsignaler. Pilotsignalerna har lite högre effekt eftersom de behövs för synkroniseringen i mottagaren.



Systemets bandbredd kan anges på olika sätt. Bandet för FFT-processen baseras på 256 subfrekvenser och är alltså större än den angivna kanalbredden. Men det gör ingen eftersom frekvenserna i början och slutet inte har någon uteffekt. De 200 frekvenserna som har nyttsignal får en bandbredd som får plats inom önskad kanal.

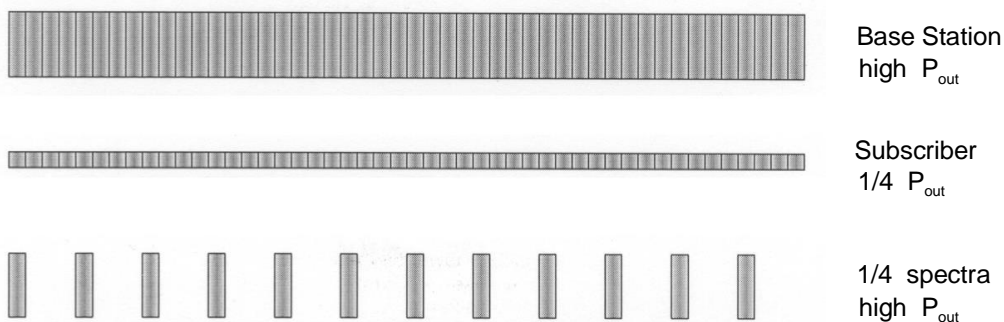
Nominell bandbredd	7	28	MHz	
256 punkters FFT	8	32	MHz	Samplings frekvens
200 bärvågor	6,25	25	MHz	
Carrier spacing	31,25	125	kHz	
Symboltid	32	8	μ s	1/carrier spacing

WiMAX för fast access använder endast FFT med 256 frekvenser. När man använder större bandbredd ökas avståndet mellan subfrekvenserna, och symboltiden blir alltså mindre. En kort symbol betyder att det aktuella skyddsområdet blir en större andel av symboltiden.

Mobil WiMAX kan få en dynamiskt skalbar bandbredd genom att välja 128, 512, 1024 eller 2048 frekvensers FFT. Avståndet mellan subfrekvenserna och symboltiden hålls hela tiden konstant. Flera frekvenser innebär därför att bandbredden blir större. Bandbredderna blir 1,25 MHz, 5 MHz, 10 MHz eller 20 MHz beroende på storleken på FFT. Avståndet mellan subfrekvenserna har valts till 10,94 kHz som en god kompromiss mellan spridningen i fördröjning och spridningen i doppler. På 3,5 GHz motsvarar det en spridning av reflektionerna på 20 μ s, och en mobil hastighet på 125 km/tim. På lägre frekvenser kan WiMAX användas upp till 160 km/tim

Subkanaler

De tillgängliga subfrekvenserna kan delas in i olika grupper. Varje grupp med subfrekvenser kallas subkanal.



Användarnas enheter har små antenner och låg uteffekt. Det ger obalans mellan nerlänk och upplänk. Genom att användaren koncentrerar sin effekt på endast ett fåtal subfrekvenser blir det mer effekt där. Den utsända effekten blir då lika stor som för basstationen. Det extra tillskottet i effekt behövs för att få lång räckvidd, vid skymd sikt (NLOS) och inomhustäckning.

Antal subkanaler	Ökar signalen dB	Relativ kapacitet (upplänk)
16	12	1/16
8	9	1/8
4	6	1/4
2	3	1/2

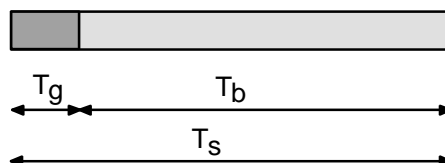
Nackdelen med subkanalerna är att kapaciteten blir lägre. Ju färre parallella databitar som överförs desto lägre blir datahastigheten.

Mobil WiMAX, som följer standarden 802.16e, utnyttjar subkanaler på nerlänken också. Olika subkanaler fördelas då till olika användare, dvs en form av multipel access (OFDMA).

Modulation

Modulationen av respektive subfrekvens ska vara QPSK, 16QAM eller 64QAM. På upplänken är 64QAM endast som ett extra tillval. Både modulationen och kodningen ska vara adaptivt inställda för varje burst, beroende på vågutbredningen. Det ger systemet betydligt högre kapacitet. 64 QAM behöver naturligtvis tillräcklig signalstyrka för att få plats ovanför brus och störningar, $C/(N+I) > 25$ dB.

Skyddsområde i tiden



Skyddsområdet T_g är till för att FFT-symbolen T_b inte ska störas av fördröjda signaler vid flervägsutbredning. Storleken på skyddsområdet beror på cellens räckvidd och hur reflekterande omgivningen ser ut. Förhållandet T_g/T_b kan ställas in till $1/32$, $1/16$, $1/8$ eller $1/4$. Om vågutbredningen (kanalen) tillåter används ett kortare skyddsområde, för att istället få plats med mer datatrafik.

Den utsända symboltiden T_s är $8 \mu\text{s}$ vid 28 MHz bandbredd och $32 \mu\text{s}$ vid 7 MHz.

Datahastighet

T_g	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
$T_b/32$	2,92	5,82	8,73	11,64	17,45	23,27	26,18
$T_b/16$	2,82	5,65	8,47	11,29	16,94	22,59	25,41
$T_b/8$	2,67	5,33	8,00	10,67	16,00	21,33	24,00
$T_b/4$	2,40	4,80	7,20	9,60	14,40	19,20	21,60

Tabellen visar datahastigheten i Mb/s för olika modulationer och koder. Om skyddsområdet är litet ($1/32$ av T_b) så får systemet hög datahastighet. Vid dålig mottagning behövs längre skyddsområde ($1/4$ av T_b) med längre datahastighet som följd. Den datahastighet som är tillgänglig för användaren är betydligt lägre, kanske hälften så hög.

Hybrid-ARQ

Ett sätt att få korrekt dataöverföring är att använda felrättande koder (FEC - Forward Error Correction). Vid dålig mottagning behövs mycket redundans i koderna, vilket resulterar i mindre datainnehåll. Ett annat sätt är att bara detektera att det blivit något fel, och sen sända datapaketet en gång till (ARQ - Automatic Request).

WiMAX använder en kombination av FEC och ARQ. Om ett datapaket behövs sändas två gånger, så kombineras de två detekteringarna för att på så sätt öka möjligheten för korrekt felrättning. Som ett extra tillägg går det också att få incrementell redundans. Varje sändning av datapaketet kodas då olika för att få ännu bättre prestanda.

FDD - TDD

FDD (Frequency Division Duplex) innebär att upplänk och nerlänk sker på olika frekvenser. Med passiva filter kan då mottagaren skyddas från sändarens höga uteffekt.

TDD (Time Division Duplex) sänder på samma frekvens, men separerar upplänk och nerlänk genom att tilldela olika tidsavsnitt. Sändning och mottagning sker alltså inte samtidigt.

H-FDD (Half duplex FDD) sänder och tar emot på olika frekvenser och olika tider. Filterkraven blir då lättare än för FDD. Nackdelen med två samtidiga radiokanaler i FDD är att det behövs två stycken synthesizer på olika frekvenser. H-FDD kan klara sig med en synthesizer som switchas på 100 ms mellan sändning och mottagning. Det är möjligt att basstationerna använder FDD för att få högre dataöverföring och terminalerna H-FDD för att få ner kostnaden. H-FDD används i GSM och TETRA.

Filtren i FDD dimensioneras till samma bandbredd på upplänk och nerlänk. I TDD kan tidsavsnittet lätt ändras, så att man får en osymmetrisk kanal, med hög datahastighet på nerlänken och lägre datahastighet på upplänken.

Att ladda ner filmer och annan underhållning behöver endast en liten upplänk för själva valet, men en hög datahastighet för nerlänken. Men en bredbandig access till Internet innehåller också en hel del symmetrisk trafik. Både hopkoppling mellan småföretag och mellan privata datorer ger symmetrisk trafik.

I många länder, t.ex. Kanada och i stor del av Europa, har man generellt valt FDD till den bredbandiga accessen. I de licensfria banden ska det vara TDD. Mobile WiMAX kommer enbart att använda TDD.

Störningar

Nackdelen med TDD är att en enhets mottagare blir störd av att en annan enhet sänder på samma frekvens. Den störningen kan man komma bort ifrån genom att synkronisera sändning och mottagning för samtliga enheter i området. Men det försämrar naturligtvis flexibiliteten för osymmetriska kanaler.

Det största interferensproblemet är då intilliggande band är TDD respektive FDD. Det behövs då ett skyddsområde i frekvens mellan de två banden. Men då utnyttjas spektrat sämre. Ett bättre alternativ är att intilliggande FDD använder H-FDD på både upplänk och nerlänk, som är synkroniserade med TDD systemet. 50 % användning av spektrat är bättre än 0 %.

Jämförelse: WLAN - WiMAX

WLAN 802.11

QoS med enbart prioritering

Räckvidd ca 100 m

Inget stöd för Mesh

MAC för tiotals användare

Enbart licensfria band

64 punkters FFT

WiMAX 802.16d

Centralt styrd QoS

Räckvidd upp till 50 km

Stödjer Mesh

MAC för tusentals användare

För både licensband och licensfria band

256 FFT tål större delay spread

WLAN är små nätverk avsett för arbetsplats eller privat bruk. WiMAX kan hantera stora nätverk med kvalitet och kapacitet som passar operatörer.

4. WiMAX

	WLAN 802.11	WiMAX 802.16d
Bandwidth	Fixed 20 MHz	Variable 1 - 28 MHz
Subcarriers	52	200
Guard interval	Fixed $\frac{1}{4}$ symbol time	Variable $\frac{1}{4}$ to $\frac{1}{32}$
Spectral efficiency	2.7 bits/s/Hz	3.1 - 3.8 bits/s/Hz
Tx dynamic range	Fixed	Variable 50dB
Duplexing	TDD	TDD , FDD , H-FDD
Spectrum	Unlicensed	Licensed & Unlicensed
PAPR	8 dB	10 dB

Med flera subfrekvenser och variabelt skyddsområde får WiMax ett bättre utnyttjande av spektrat än WiFi (bättre spectral efficiency).

Effektförstärkaren för WiMAX behöver ge högre uteffekt, ha bättre linjäritet och kunna hantera högre PAPR (Peak to Average Power Ratio) än WLAN förstärkaren för WLAN 802.11.

Jämförelse: Fixed - Mobile WiMAX

WiMAX enligt 802.16d använder skilda frekvensband för upplänk respektive nerlänk (FDD). Mobila WiMAX enligt 802.16e arbetar med tidsduplex (TDD) på samma frekvens.

	Fixed WiMAX	Mobil WiMAX
Standard	802.16d -2004	802.16e -2005
OFDM	256 OFDM	128-2048 SOFDMA
Modulation	64QAM	64QAM ner 16QAM upp
Bandbredd	1,75 3,5 7 14 MHz	5 10 MHz
Duplex	FDD	TDD
Applikation	Fast och nomadisk	Mobil med roaming
Kundheter	Diversitet (option) Subkanaler (option) AAS (option)	AAS (krav) MIMO (krav)

AAS (Adaptive Antenna System eller Advanced Antenna System). Avancerade antenner med flera antennelement och signalprocessing kan arbeta efter tre principer.

Diversitet på sändaren

Diversitet med dubbla antenner på mobilen är ganska opraktiskt. Istället sänder basstationen på dubbla antenner. Genom att addera STC-koder (Space Time Coding) kan mobilen detektera de två signalvägarna och utnyttja diversitetsvinsten. Finessen är att komplexiteten har flyttats till basstationen.

Lobformning

Flera antenner kan sammansättas i fas och amplitud så att loben pekar i önskad riktning, men får ett nollställe i riktningen mot en interferens. Det kan ge längre räckvidd och högre kapacitet. Eftersom störningarna undertrycks blir det också högre tillförlitlighet i kanalen. En mottagare kan justera antennen för den önskade signalen. Ett system med TDD kan sen använda samma inställning vid sändningen. Men för system med FDD ser kanalen annorlunda ut på den andra frekvensen. Det behövs då någon form av återkoppling som sänds tillbaks.

MIMO

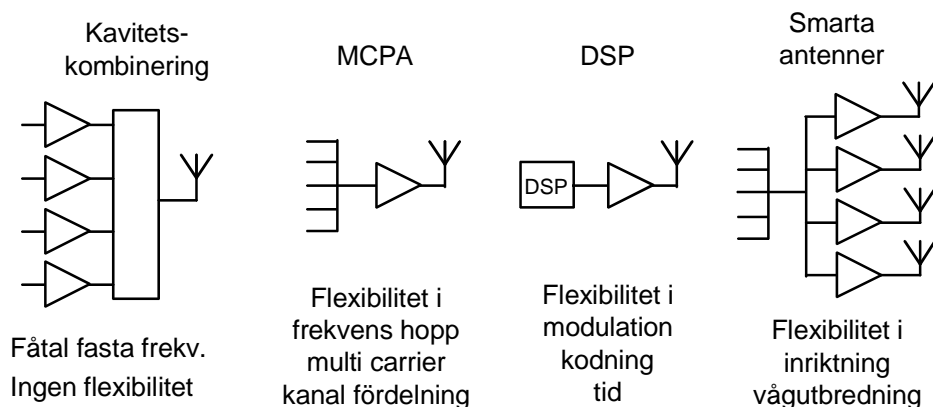
Med MIMO menas att det är flera antenner på både sändaren och mottagaren. Sändaren kodar med Space-Time processing så att antennerna kan överföra flera oberoende dataflöden samtidigt. I det här fallet används antennerna alltså för att få högre kapacitet istället för att få diversitet. I en omgivning med mycket reflektioner och starka signaler kan kapaciteten öka linjärt med antalet antenner.

Antenner för basstationer

1. Smarta antenner

Med smarta antenner menas elektronisk styrning av antennerna för att uppnå högre kapacitet, räckvidd eller datahastighet. Det får man genom att rikta in antennen till högsta signalstyrka eller för att få minsta störningar. Till det åtgår flera antennelement, som samtidigt kan ge längre räckvidd eller flera parallella datakanaler.

Flexibilitet och adaptiv styrning



En tydlig utveckling har varit mot större flexibilitet och adaptivt styrt system. GSM använde från början kombinerings av kanalerna med kaviteter. Det resulterade i fasta frekvenser utan adaptiv flexibilitet. Med MCPA (Multi Carrier Power Amplifier) kombineras kanalerna före effektförstärkaren. Det ger ett bredbandigt system som kan tillåta frekvenshopp och flexibel omplanering av kanalerna. Flera modulationer och kodningar har införts för att bäst utnyttja systemet beroende på datahastighet och sträckdämpning. Resultatet är en mycket stor flexibilitet, men flexibiliteten ligger före antennen. Den enda adaptiva funktionen i antennen är diversiteten i polarisation. För att få större flexibilitet mellan antennerna behövs smarta antenner.

Olika generationers mobilsystem

Då 2:a generationens mobiltelefon infördes valdes modulationen MSK, eftersom CDMA inte var en mogen teknik. När det sedan behövdes mer kapacitet byggdes systemet ut med många små microceller, eftersom smarta antenner inte var en mogen teknik. Sen kom 3G med WCDMA i nytt frekvensband. Det gav så mycket kapacitet att det inte behövdes smarta antenner.

2G var inte förberett för smarta antenner. 3G har med möjligheten i sin specifikation, men det har inte behövts. Senare system som har utvecklats är tänkt att utnyttja någon form av smarta antenner. Fast WiMAX har med det som tillägg. Mobil WiMAX och LTE har som krav att det ska vara smarta antenner.

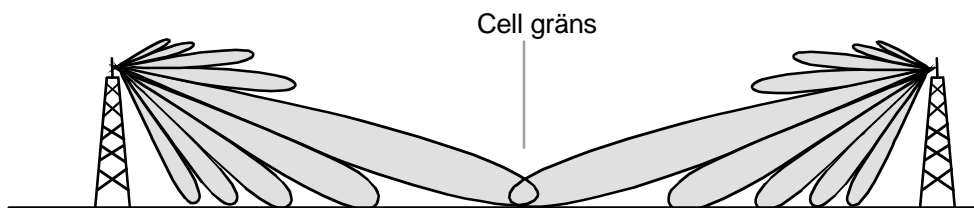
Sektorer

Den viktigaste åtgärden för att få hög kapacitet i macrocellerna har varit att dela upp cellerna i sektorer. Vanligast är uppdelning i tre sektorer. Antennerna ska då belysa sektorer som är 120° breda. Antennen placeras framför en reflektor, som är utformad för att ge önskad belysning i sektorn och låg backlob. Det blir då mindre celler med riktade antennlobar, så att frekvenserna i GSM-systemet kan återanvändas oftare. I ett CDMA-system betyder den lägre störnivån en direkt ökning av kapaciteten.

För att få lång räckvidd ska antennen ha så hög förstärkning som möjligt. I vertikalled är därför antennloben ganska smal. Med flera antennelement ovanför varandra blir loben 4 - 30 grader. Det ger en antennförstärkning på 12 - 20 dB.

Tilt

Antennen ska ge stark signal i hela cellen. Mobilen längst bort vid cellkanten ska också ha stark signal. Men signalen fortsätter in i granncellen. Visserligen är signalen svagare men den betraktas där som en störning som försämrar prestanda i granncellen. Antennloben lutar därför neråt. Den signal som når längre blir reflekterad upp i luften, där den inte gör så stor skada. Signalen som når längre längs marken kommer från huvudlobens övre del, där signalen minskar mycket snabbt ju längre från huvudriktningen man går. Det är alltså fördelaktigt att ha en högt placerad antenn som lutar neråt för att begränsa cellen.

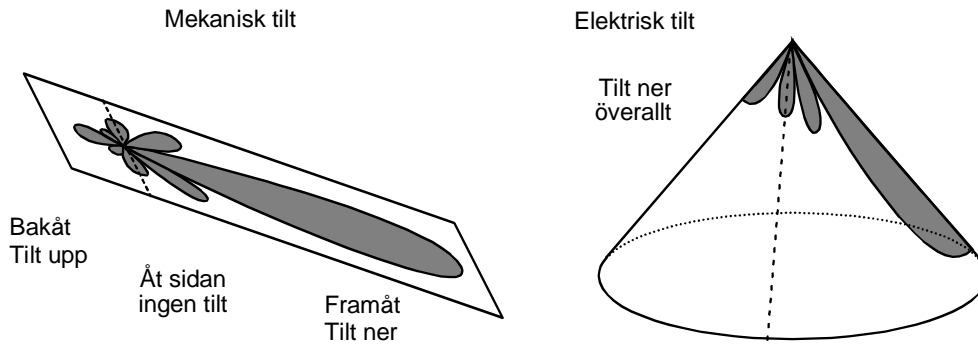


Den del av antenndiagrammet som ger störst problem, är första sidloben ovanför huvudloben. Den kan nämligen vara riktad rakt fram mot granncellen. Med samma amplitud på alla antennelement blir övre sidloben bara undertryckt 13 dB. Med lämplig amplitudfördelning kan övre sidloben undertryckas 18 - 20 dB.

Ett annat problem är de undre sidloberna. Signalstyrkan minskar dramatiskt mellan loberna. Men med lämplig amplitud och fasfördelning till antennelementen kan åtminstone första nollriktningen fyllas ut, så att signalen inte minskar mer än 20 dB.

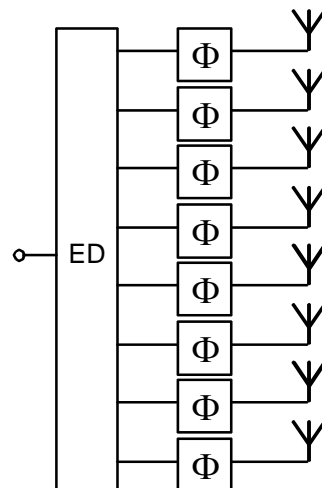
Nackdelen med att forma sidloberna är att antennens gain minskar 0,5 - 1 dB.

Mekanisk tilt innebär att antennen monteras så att den mekaniskt lutar. Elektrisk tilt är en fasstyrning av antennelementen så att lobens riktning ändras. I båda fallen kan huvudloben lutar neråt. Den viktiga skillnaden är hur tilten påverkar övriga antenndiagrammet.



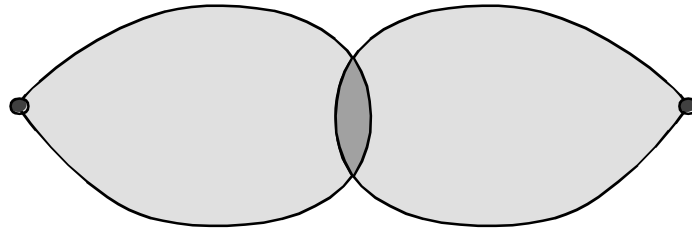
Mekanisk tilt kan liknas med ett antenndiagram som ritats på ett papper som lutar. När huvudloben vinklas ner kommer backloben att vridas upp. Loben rakt åt sidan får ingen tilt alls, eftersom det är där vridningsaxeln går. Elektrisk tilt kan liknas med att rita antenndiagrammet på en kon. Alla lober pekar alltså neråt, till och med backloben.

Elektrisk och mekanisk tilt kan kombineras. I en kraftigt kuperad terräng kan det vara bra med mekanisk tilt som kompenserar markens lutning och sen önskad elektrisk tilt. En annan bra kombination är att använda en kraftig elektrisk tilt neråt för att minska strålningen i sidled, och sen flytta huvudloben rätt med mekanisk tilt uppåt.



Fasskiftarna består ofta av ett flyttbart dielektrika på en ledning. Det kan vara ett stort gemensamt dielektrika eftersom alla antennelement ska påverkas samtidigt. Fördröjningen ökar linjärt för elementen längre ner så att den sammanlagda signalen blir riktad neråt. Dessutom ska elementen få en fasvågning för att undertrycka övre sidloben och fylla ut mellan undre loberna.

Den elektriska tilten är vanligtvis 2° men ska kunna justeras från 0° till 5° . Ju mindre cellen är desto mer är antennen tiltad neråt. I storstäderna, där avståndet mellan sajterna bara är några hundra meter, har antennerna en tilt på ca 6° .

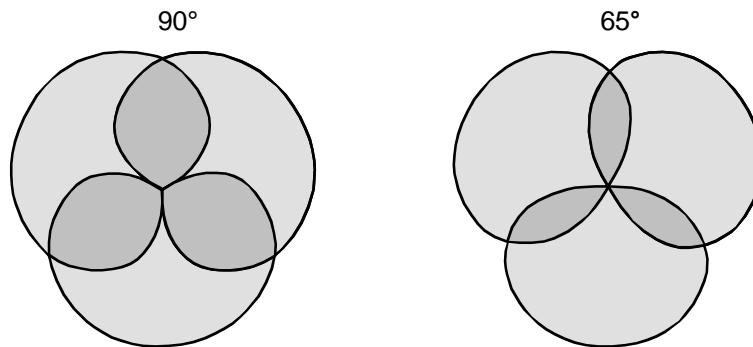


I det överlappande området mellan cellerna kan mobilerna göra hand-over till nästa basstation. Området får inte vara för stort för då används för mycket av resurserna till hand-over. Det får inte vara för litet heller för då uppstår områden med för svag signal vid sidan av huvudriktningen.

Den variabla fasskiftaren kan justeras med en motor. När den är fjärrstyrd kallas den för RET (Remote Electric Tilt). Den fjärrstyrda tilten har blivit ett effektivt sätt korrigera cellerna täckning och hand-over då mobilnätets belastning varierar. Minskning av störningarna mellan cellerna ger i 2G bättre möjlighet att återanvända frekvenserna, och 3G påverkas kapaciteten direkt. Kommunikationen och anslutningen till RET följer en öppen standard från AISG (Antenna Interface Standard Group).

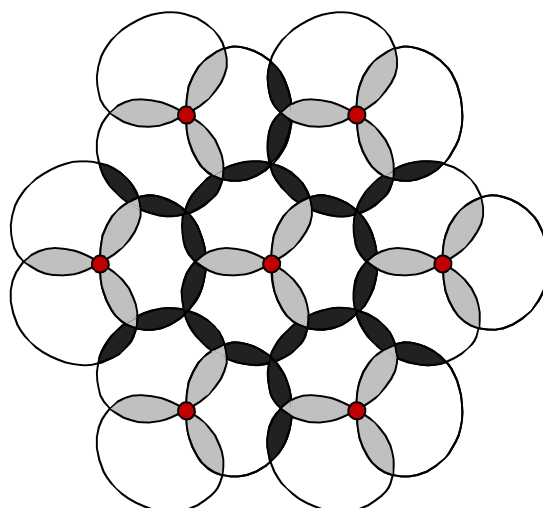
Lobbredd

En sektor på 120° behöver en antennlob som är betydligt smalare. Lobbredd är den bredd där signalen minskat 3 dB, men kommunikationen fungerar över ett betydligt större dynamikområde. Det ger en spridning över en större sektor och en stor överlappning mellan loberna.



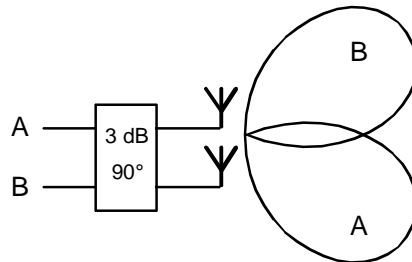
Ofta används 90° lobbredd som en kompromiss mellan täckning och överlapp. I storstäderna används ibland 65° för att få betydligt mindre överlapp utan att förlora så mycket i signalstyrka. Skillnaden i kapacitet är alltså inte så märkvärdig.

Om det behövs större kapacitet kan man istället välja en uppdelning i 6 sektorer med antenner som har 33° lobbredd. Det kan ge 70 - 80 % högre kapacitet.

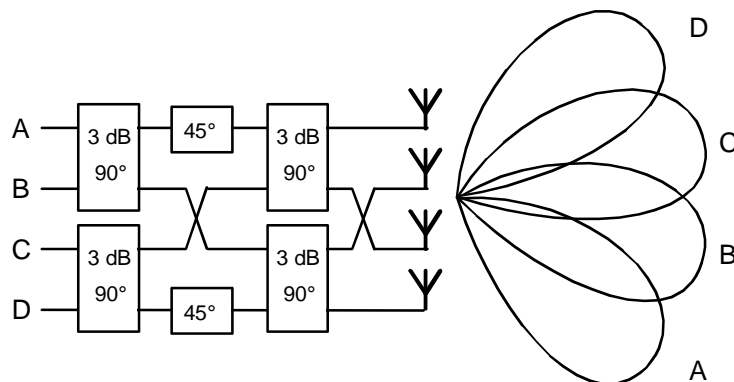


Figuren visar 7 sajter med 3 sektorer. De svarta områdena visar överlappningen mellan sajterna som kan trimmas med tilten. De grå områdena är överlappningen mellan sektorerna, som inte kan justeras lika lätt. Om antennen ska styras i sidled behövs fler antennelement bredvid varandra.

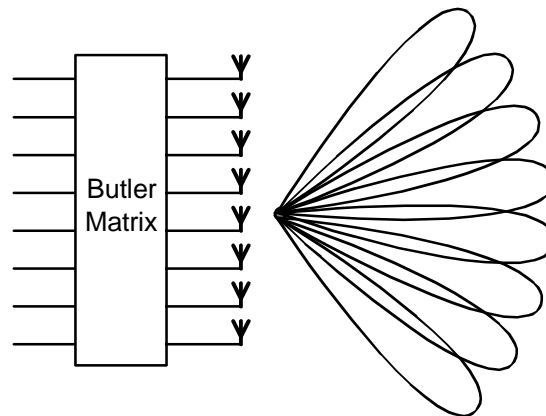
Switchade lober



Två antenner som matas via en hybrid får en fasskillnad som bestäms av hybridens. Det ger en fasstyrning som får loben att riktas åt sidan. Om signalen kopplas till hybridens andra ingång ger fasmåtningen en lob som pekar snett åt andra hållet. Med en switch kan man alltså välja i vilken riktning man vill ha kommunikationen.



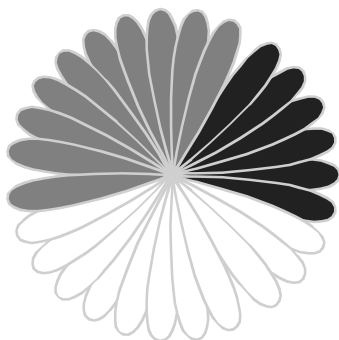
Med fler hybrider och några fasskiftare kan man få en krets som kopplar fyra olika ingångarna till respektive fyra inriktningar av antennen.



Matningsnätet kan byggas ut till önskat antal lober. Kretsen som kopplar ett antal ingångar till motsvarande riktningar kallas Butler-matrix.

En mobil kommer att ge starkast signal i en av portarna. Den porten kommer också att användas för nerlänken. När mobilen förflyttats så att det blir starkare signal i nästa port så kopplas kommunikationen över dit.

I sektoruppdelning får varje sektor en sändare och mottagare (TRx). Med två TRx på olika frekvenser får man högre kapacitet. Normalt används inte mer än 4 TRx. Switchade lober kan betraktas som en uppdelning i många sektorer, men man använder inte fler TRx. GSM fördelar tidsluckorna till olika mobiler. Samtidigt switchas tidsluckan till den rätta loben.



Fler lobar kan kombineras till en sektor. Finessen är att man kan välja vilka portar som ska kopplas ihop, så att sektorns riktning och bredd kan anpassas till belastningen. Dessutom blir det en skarpare gräns till nästa sektor, jämfört med om det varit endast en stor lob. Det betyder ett mindre område som utsätts för hand-over.

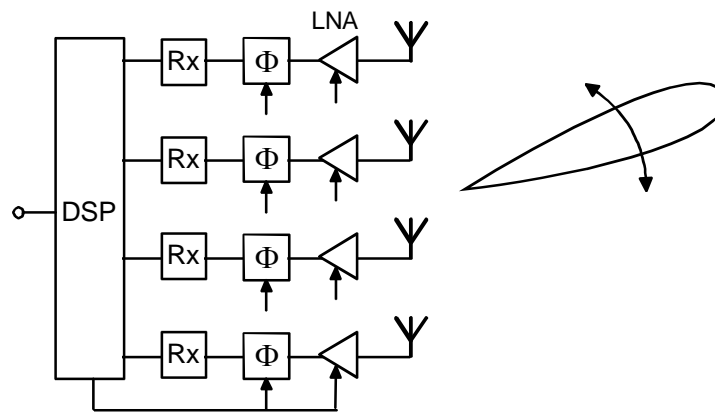
Switchade loper i olika system

System med fyra switchade loper i en 120° sektor har gjorts till GSM för att få högre kapacitet. Tyvärr var det inte från början tänkt att använda smarta antenner till GSM. Det är bara trafikkanalerna som kan switchas med smala loper. Kontrollkanalerna behöver fortfarande en antenn som täcker hela sektorn. Utan kontrollkanal kan mobilen inte synkronisera till cellen. Det är alltså kontrollkanalens breda lob som bestämmer cellens storlek. Med båda polarisationerna till fyra loper och sektorantenn blir det 10 koaxialkablar per sektor som ska upp i antenmasten.

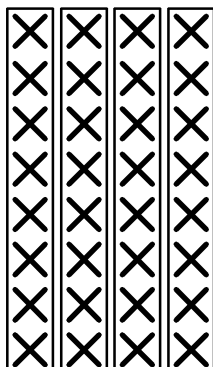
Till 3G används WCDMA som från början var specificerad att kunna använda smarta antenner. Utöver den primära pilotsignalen som sänds över hela sektorn i den gemensamma kanalen, finns en sekundär pilotsignal som kan sändas i respektive lob. Den sekundära pilotsignalen får i den smalare loben högre antennförstärkning. Dessutom blir det samma vågutbredning för både pilot och data som ska sändas.

Istället för att använda Butler-matriser har GSM-systemets kapacitet byggts ut med fler sajter som ligger närmare varandra. Senare kompletterades sajterna med 3G. WCDMA var ett effektivare system än GSM, som tillförde så mycket kapacitet att det inte behövdes några smarta antenner. Till nästa generation (4G) behövs betydligt högre kapacitet för att klara snabb datakommunikation. Till det behövs någon form av smarta antenner.

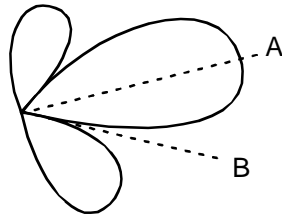
Adaptiva antenner



Men en fasstyrd antenn kan loben riktas in till aktuell mobil. En DSP ställer in fasskiftarna så att signalen från mobilen blir som starkast vid summeringen. När mobilen rör sig så korrigeras fasinställningen så att loben följer efter mobilen. Flera mobiler i sektorn får i WCDMA olika koder (scrambling codes). Men det är bara de mobiler som har överlappande lobor som stör varandra. Mobiler i olika riktningar kan till och med använda samma kod. Att återanvända samma kanal i olika riktningar kallas SDMA (Space Division Multiple Access). Fördelen är att kapaciteten för systemet ökar.



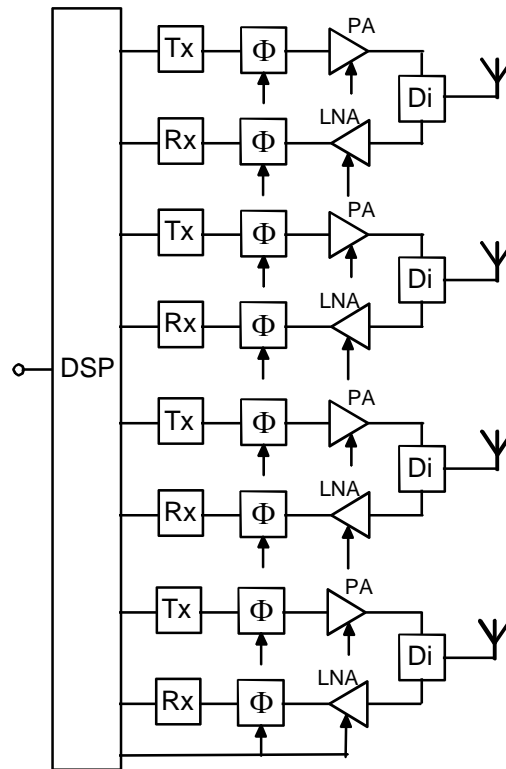
En antenn till basstationer består av ca 6 - 10 antennelement ovanför varandra för att ge en smal vertikal lob. Avståndet mellan elementen är ca 0,9 våglängder. För att få lobstyrning i horisontal led behövs flera sådana antenner bredvid varandra. Det som begränsar antalet antenner är den totala storleken på antennen, komplexiteten för systemet och dess kostnad.



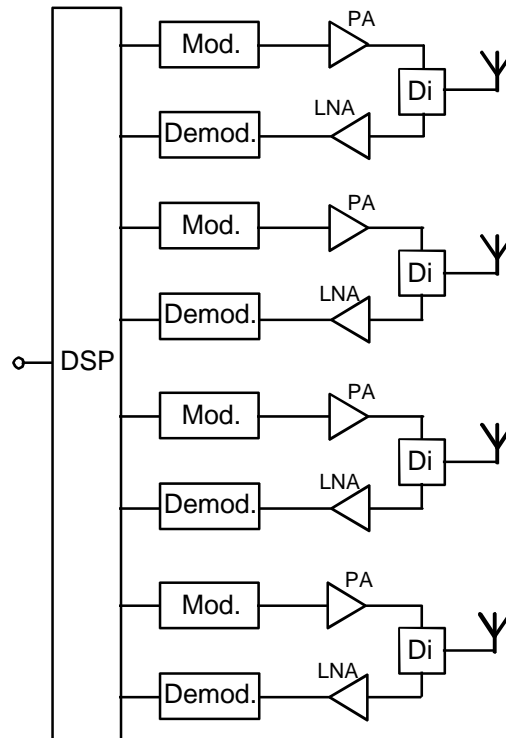
Signalerna från de olika antennerna kan sammansättas i fas så att utsignalen blir maximal. Om det finns en stor störsignal så kan man sammansätta den störningen i motfas så att den blir så liten som möjligt. Störningen hamnar alltså i nollriktningen mellan loberna. Om det bara är ett fåtal starka störningar så kan undertryckningen effektivt förbättra signal/stör förhållandet. I WCDMA kommer de största störningarna från användare med hög datahastighet.

Antalet nollriktningar bestäms av antalet antenner. Med N stycken antenner kan man teoretiskt få $N-1$ nollriktningar. Nackdelen med att sammansätta antennerna för att få många nollriktningar är att den önskade huvudriktningen inte längre är som starkast. Om det finns många störsignaler som är ungefär lika starka, är det bättre att signalprocessorn får optimera så att signal/stör förhållandet blir så stort som möjligt.

Horisontella avståndet mellan elementen är $0,5 \lambda$. Om avståndet är större λ bildas det flera nollriktningar. Ett avstånd kortare än $0,5 \lambda$ ger starkare koppling mellan antennelementen så att nollriktningen påverkas. Antennen kalibreras för att kompensera kopplingen, så att det ska bli en djup nollriktning. Men kalibreringen försvåras av att kopplingen varierar med temperaturen.



Fasskiftarna kan arbeta direkt på RF signalen. Men eftersom fasen följer med vid nerblandning så kan fasen lika gärna justeras på MF. Om man ändå ska blanda ner sig till basbandet så kan man göra all korrigering i signalprocessorn. RF-komponenterna har begränsad noggrannhet och inställningarna blir långsamma. Analog fasskiftare och dämpare har en noggrannhet på 5-6 bitar. Digital multiplicering av koefficienterna kan göras med 16-bitars precision. Det är också lätt att digitalt skapa flera överlappande lober. Adaptiv digital lobformning är alltså den ultimata lösningen. Antennloben kan ställas in till varje mobil separat. Fördelen med lobformning på RF är ett bättre dynamikområde eftersom signalerna adderas koherent före A/D-omvandlaren.

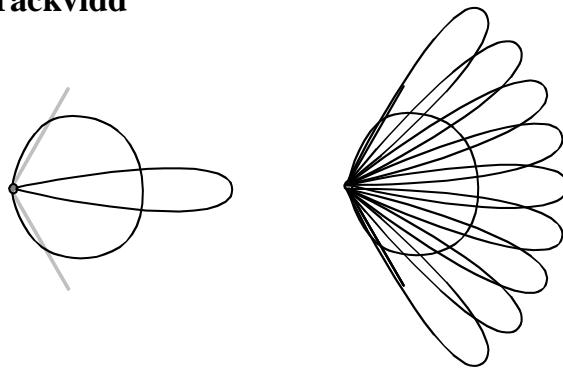


Inställningarna av loben för mottagning kan sen användas för sändningen också. Åtminstone om det är samma frekvens för upplänk och nerlänk som i TDD. Ett system för FDD har andra frekvenser på nerlänken. Det betyder att komponenterna och vågutbredningen påverkar signalen annorlunda. Det är speciellt svårt att ställa in en nollriktning när man inte kan mäta vad som händer. Nerlänken kan förbättras med en noggrann kalibrering eller återkoppling med information från mobilen.

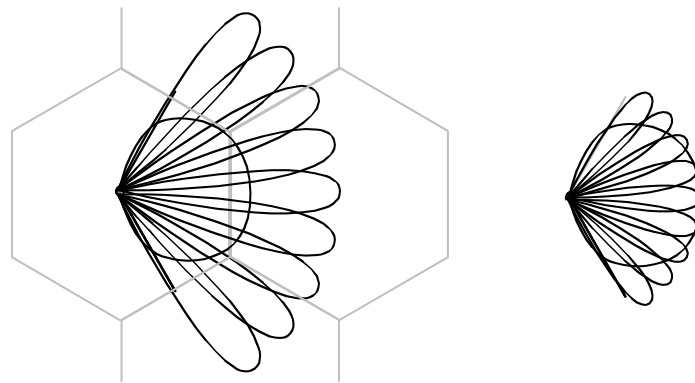
Den primära och sekundära pilotsignalen sänds på kanaler som är gemensamma för alla användare. Det finns också dedikerade pilotsignaler som sänds tillsammans med datatrafiken till respektive användare. Med individuella pilotsignaler kan de olika användarna få olika lobstyrning. Men fortfarande behövs sektorantenn för de kanaler som inte kan använda lobstyrning.

WCDMA är utvecklat för att kunna använda smarta antenner. Enligt WCDMA standarden rapporterar mobilerna regelbundet kvalitén till basstationen. Det gör att basstationen kan korrigera loben för nerlänken så att den blir som bäst framme vid mobilen.

Uteffekt och räckvidd



Ett antennelement ger en bred lob och många element ger tillsammans en smal lob. Oavsett om det är en adaptivt styrd lob eller switchning mellan fasta lober så ger fler antennelement högre antennförstärkning. Dubbelt så många element ger 3 dB högre gain. Med 10 antennelement blir det alltså 10 dB högre signalstyrka åt det hållet. Det ger alltså betydligt längre räckvidd än en sektorantenn. Men behövs det fortfarande gemensam kanal för signalering och pilotsignal så är det sektorantennen som bestämmer cellens storlek.

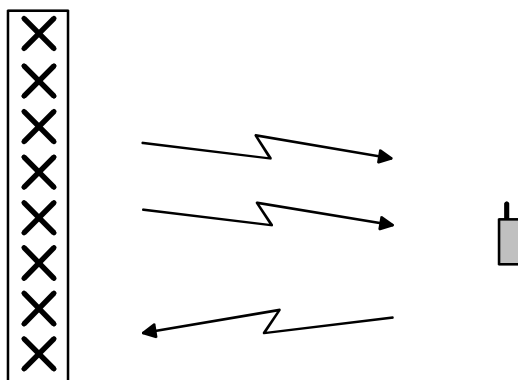


Om smarta antenner införs i ett befintligt cellsystem så betyder den högre förstärkningen att granncellerna störs. Uteffekten behöver alltså minskas lika mycket som antennförstärkningen. Det innebär att det går att använda mindre billigare effektförstärkare. Om antennen består av 10 kolumner som matas med varsitt slutsteg så behöver varje förstärkare endast leverera 1/10 av effekten.

För att få samma signalstyrka som från en sektorantenn med en 100 W förstärkare ska den smarta antennen i exemplet förses med 10 stycken 1 W förstärkare.

Diversitet på sändaren

Basstationerna använder diversitet på mottagaren i form av korspolariserade antenner, som fhas ihop till bästa signal. Men det är opraktiskt med dubbla antenner på mobilernas små handapparater. Istället används basstationens dubbla antenner till sändardiversitet. Det tillkommer alltså ytterligare en sändare med tillhörande effektförstärkare. Genom att förlägga komplexiteten i basstationen kan mobilen vara enkel och billig. Mobilen behöver enbart lite signalprocessing.

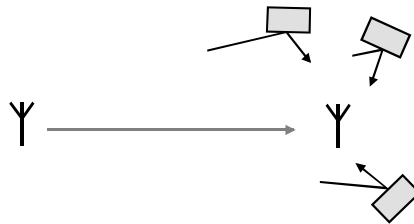


Diversiteten kan i WCDMA ha öppen slinga eller slutna slinga. Den slutna slingan innehåller återkoppling från mobilen så att basstationen kan ställa in de två antennernas fas till bästa signal vid mobilen. De två antennerna sänder med olika pilotsignaler så att mobilen kan mäta signalerna separat. Återkopplingen kan ske i två olika moder. Mode 1 innehåller en databit som representerar fasan. Mode 2 innehåller tre bitar för fasan och en bit för amplituden.

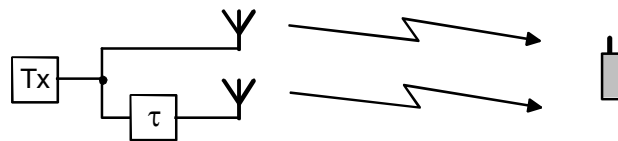
Eftersom fasstyrningen görs med återkoppling behöver inte antennerna kalibreras. En annan fördel med återkopplingen är att mobilen alltid förses med lagom signalstyrka, så att basstationens uteffekt kan minimeras.

Diversitet med öppen slinga behöver separera trafiken från de två antennerna med olika koder. Vanligtvis används en Block-kod eller en fördröjning (som kan betraktas som en enkel Trellis-kod). Det skulle också kunna gå att använda spridningskoder, men det åtgår då onödigt många koder som behövs till att separera kanalerna.

Delay-Diversitet



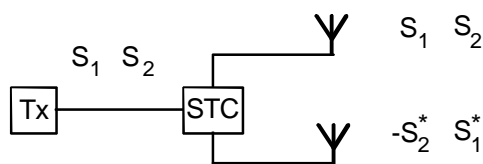
Ett mobilsystem måste kunna hantera vågutbredning med reflektioner. Den reflekterade signalen som är fördröjd hanteras i CDMA med Rake-mottagaren och i OFDM med skyddsområdet i tiden (Cyclic Prefix).



Den ena antennen har försetts med en fördröjning. Samma signal sänds alltså från två olika antenner som blir utsatta för olika fadning. Mobilen adderar de två signalerna på samma sätt som vid flervägsutbredning. Mobilen behöver inte ens veta om att det finns sändardiversitet.

Rymd-Tid diversitet

STC (Space Time Code) är en block-kod som kombinerar olika antenners utbredning med en fördelning i tid.



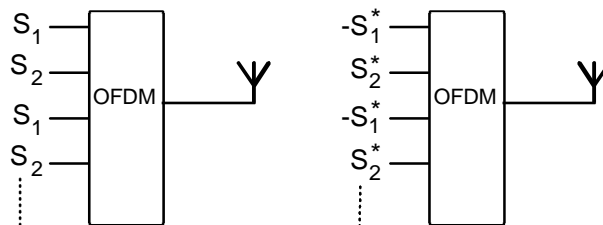
STC arbetar med så små block som två symboler. Den ena antennen sänder symbolerna utan förändring. Den andra antennen sänder komplexkonjugatet av symbolerna samt flyttar om dem i tiden och byter tecken på den ena. Det är en enkel kodning som lätt kan återställas i mottagaren så att de två diversitetsvägarna kan kombineras.

WCDMA standarden innehöll STC redan från början. OFDM symboler tas också i par, för att sen i mottagaren korrigeras och kombineras för varje subfrekvens.

Två antenner ger 3 dB högre gain än en antenn. Med STC-diversitet förbättras systemet ytterligare 1-5 dB.

Rymd-Frekvens diversitet

SFC (Space Frequency Code) kombinerar antenner och frekvenser för att separera de olika diversitetskanalerna. En OFDM-signal har ett stort antal subfrekvenser tillgängliga, så det är lätt att koda block av frekvenser.

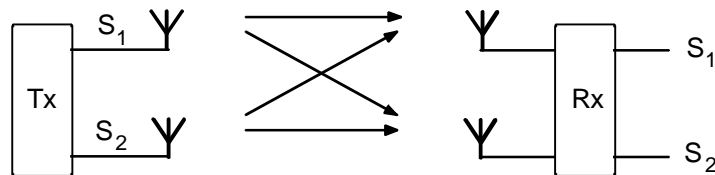


Ett block av symboler i frekvensdomänen OFDM-modulerar direkt den ena antennen. Den andra antennen har block-kodade symboler på motsvarande subfrekvenser.

STC använder två symboler som följer efter varandra i tiden. SFC använder bara en symbol i tiden, och gör kodningen i frekvens istället. Det ger ett snabbare förlopp och påverkas inte om kanalen förändras med tiden.

MIMO

MIMO betyder att kanalen har flera antenner på både sändaren och mottagaren. Med flera antenner kan man få både lobstyrning och diversitet. Men när det är flera antenner på både sändaren och mottagaren kan man dessutom få spatial multiplexing. Ofta används benämningen MIMO när det egentligen är spatial multiplexing som man menar. Spatial multiplexing betyder att det går att sända olika dataflöden från de olika antennerna i samma kanal och ändå sortera upp data från mottagarens antenner.



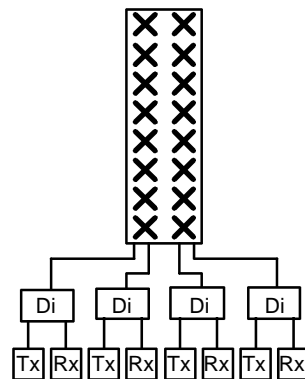
De två signalerna sänds samtidigt på samma frekvens och med samma spridningskod. I mottagaren kommer de alltså att störa varandra. Mottagarens två antenner kombineras därför med interferensundertryckning. Antennernas fas och amplitud justeras så att störningen adderas i motfas. Den ena utgången innehåller då S_1 med S_2 undertryckt, och den andra utgången innehåller S_2 med S_1 undertryckt. Inställningen av mottagaren görs med hjälp av de pilotsignaler som sänds från respektive antenn.

En förutsättning är att det finns mycket reflektioner i omgivningen. De två mottagarantennerna behöver kunna se skillnad på de två signalerna för att kunna demodulera och undertrycka. Inomhus finns det så mycket reflektioner att MIMO fungerar bra. Utomhus i små celler finns det också tillräckligt med reflektioner. Men på långa avstånd blir de olika signalvägarna så lika att MIMO inte kan användas.

En annan förutsättning är att signalstyrkan är tillräckligt stor, så att de olika signalvägarna ger en signal ovanför brusnivån trots att de är olika starka. Vid svaga signaler, det vill säga på långa avstånd, är det bättre att använda antennerna till diversitet eller lobformning för att förbättra signal/brus förhållandet.

4-Branch antenn

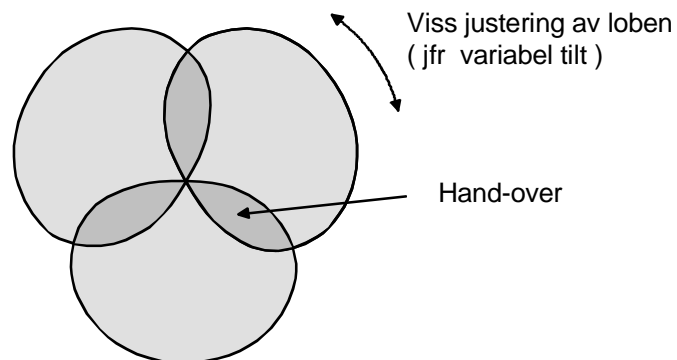
Normalt består basstationens antenn av en kolumn antennelement för att ge önskad lob i sektorn. De två korspolarisationerna har separata utgångar för att kunna ge diversitet.



En 4-Branch antenn består av två kolumner med korspolariserade element. Utöver diversitetsvinsten med korspolariseringen ger en dubbelt så stor antenn 3 dB högre antennförstärkning. Om kolumnerna hade varit placerade ett par meter från varandra, så hade de fyra kanalerna gett ännu högre diversitetsvinst. Men det är också viktigt att antennen är så kompakt som möjligt.

Utöver diversiteten från polarisationen utnyttjar systemen diversitet från frekvens, tid, macrodiversitet (fler sajter) och flervägsutbredning (Rake mottagaren). Diversiteten är till för att minska signalbortfallet vid fading. Men ju fler typer av diversitet desto mindre blir förbättringen. Diversitetsvinsten från antennerna är lite större för mobiler som rör sig långsamt, eftersom den snabbt rörliga mobilen får mer vinst från interleaving, dvs tidsdiversitet.

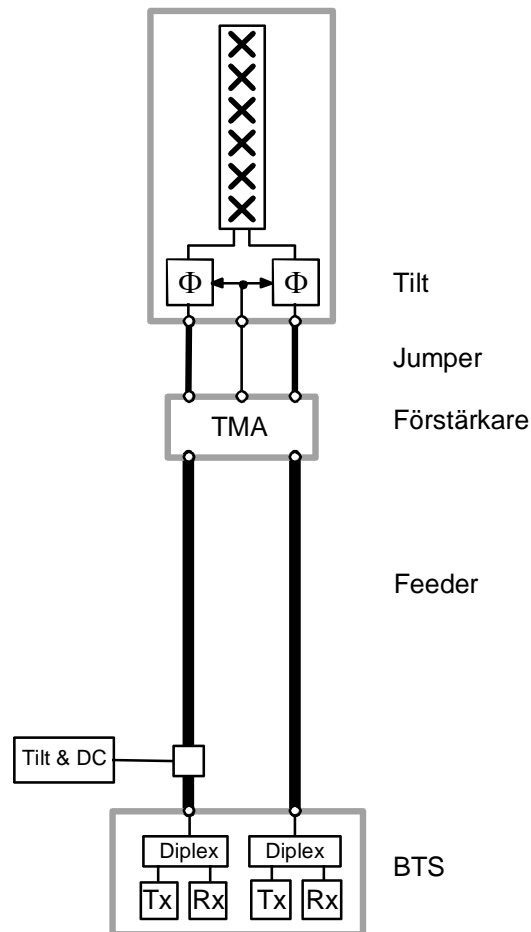
Två intilliggande element som har samma polarisation ger ett samverkande fält. Det kan inte användas till diversitet, men det kan användas till lobstyrning.



Med två antenner blir det inga smala lober att styra till olika mobiler. Men det ger en viss justering av det överlappande området mellan sektorerna som är utsatt för hand-over. Fäststyrningen av loben kan göras på basbandet. Det betyder att lobjusteringen kan regleras individuellt till varje mobil.

De fyra mottagarkanalerna fasas ihop till bästa signal. Det spelar egentligen ingen roll om signalvinsten kommer från diversitet, lobformning eller lobstyrning. De fyra sändarna kan ha varsin effektförstärkare för att sen effektivt kombineras i luften. Korspolariseringen kan användas till sändardiversitet för de mobiler som befinner sig långt bort, och MIMO för de mobiler som befinner sig i närområdet. De två kolumnerna kan användas till att flytta mobilerna i det överlappande området till den sektor som har minst trafik. Systemet får högst kapacitet då sektorerna är jämnt belastade.

Matning av antenn



Basstationens utrustning monteras i ett rum inomhus. Därifrån går tjocka koaxialkablar (feeder) upp till masttoppen. Eftersom effektförstärkaren sitter nere vid basstationen får dämpningen i kabeln inte vara mer än ca 2 dB. Tjockleken på kabeln väljs beroende på längden, så att förlusterna inte ska bli större. Uppe vid antennen sitter en dubbel lågbrusförstärkare (TMA - Tower Mounted Amplifier), för att förbättra räckvidden på mobilens uteffekt. Mellan förstärkaren och antennen sitter en lite flexiblare koaxialkabel (jumper).

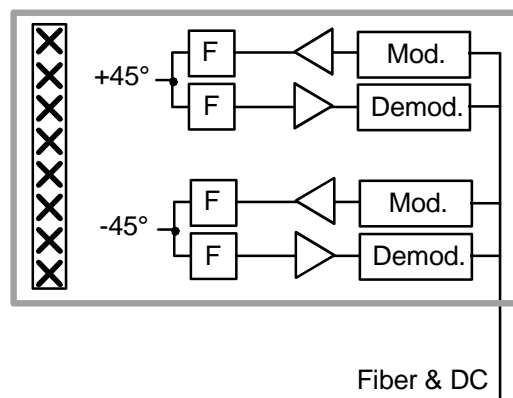
Tiltens fasskiftare består av ett dielektrika som flyttas intill en ledning. Tilten kan fjärrstyras med en liten motor som sitter i antennen. Styrningen sker genom TMA och feeder för att sen kopplas ut genom ett T-stycke (bias-T) vid basstationen. Strömförsörjning och övervakning av TMA går också samma väg genom feedern.

Styrning av tilt och övervakning av TMA har standardiserats av AISG (Antenna Interface Standards Group). Det gör att systemet fungerar även om det kopplats ihop med komponenter av olika fabrikat.

Sändare och mottagare kombinerat med antennen

RRH - Remote Radio Head

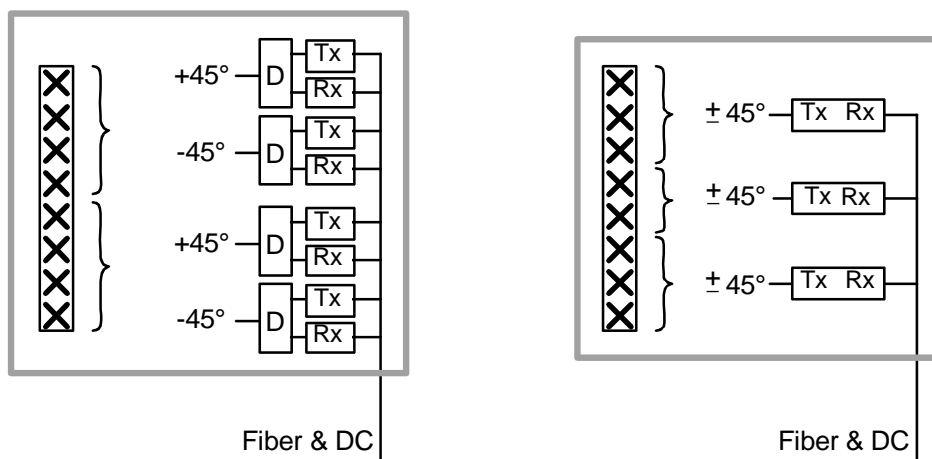
Det är idag självklart att både TMA och antenn ska sitta uppe i masten. Med en mogen teknik för effektförstärkaren (MCPA - Multi Carrier Power Amplifier) är det dags att flytta upp resten av RF-kretsarna till antennen. Koaxialkablarna och filtren som behövs för att kombinera ihop flera band kan ge en dämpning på ca 5 dB. Det betyder att mer än hälften av den dyrbara effekten har gått förlorad innan signalen har nått antennen. Den förlusten kan elimineras genom att kombinera sändaren och mottagaren med antennen.



Det behövs fortfarande filter med höga krav på filterflankerna och låga förluster. Men det blir bara 1 filter efter effektförstärkaren. Lågbrusförstärkaren (LNA - Low Noise Amplifier) kan med fördel kombineras med tillhörande demodulator. En effektförstärkares olinjäritet kan korrigeras på basbandet. MCPA och modulator kombineras då till en linjäriserad sändare. Mellan basstation och radiohuvud sker kommunikationen via fiber, som är betydligt enklare att installera än med den tjocka koaxialkabeln.

Gränssnittet mellan radiohuvudet och basstationens digitala del specificeras av CPRI (Common Public Radio Interface). CPRI specificerar endast WCDMA. En annan industrigrupp som kallas OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative) arbetar på en betydligt mer omfattande specificering av basstationens olika delar. Målsättningen är att specificera gränssnitten mellan de olika delarna, för både WCDMA, GSM/Edge och WiMAX, så att basstationernas olika delar kan tillverkas på den öppna marknaden.

Radiohuvud med styrning av tilt

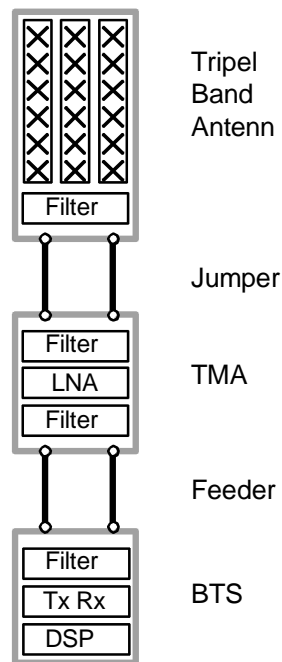


Om kolumnen med antennelement delas upp i grupper, så kan grupperna fasstyrs var för sig. Det betyder att antennens tilt kan justeras direkt på basbandet. Formningen av loben, med undertryckt övre sidlob och utfyllningen mellan sidloberna neråt, blir naturligtvis bäst om alla elementen fasstyrs var för sig. Men det blir många filter och radiodelar.

En finess med att styra tilten från basbandet är att olika mobiler kan ges olika tilt. Det är bara de mobiler som befinner sig på cellkanten som behöver minsta tilten. Många mobiler befinner sig närmare och kan ha mer tilt neråt. Det resulterar i mindre störning i granncellen. Det kan alltså minska kravet på övre sidloben. Utfyllnaden neråt blir inte heller så viktigt om tilten kan justeras till bästa signal.

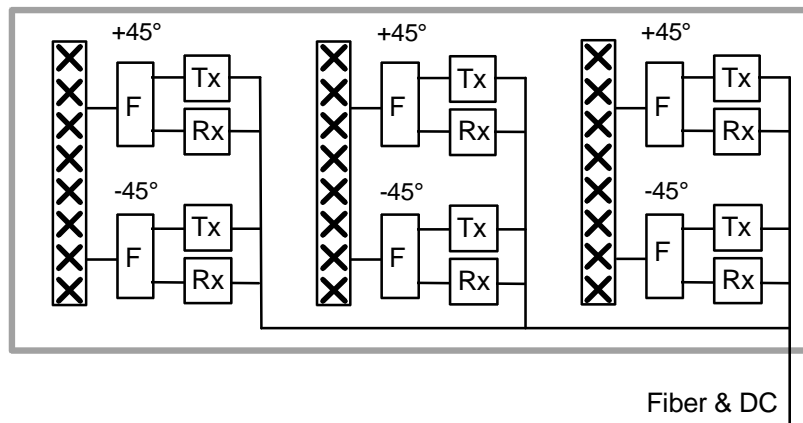
En annan fördel med tilt på basbandet är att olika operatörer som delar på en gemensam antenn, kan var för sig välja olika tilt för att optimera sina system.

System för multiband



En trippelbands antenn innehåller egentligen tre separata antenner. De olika banden behöver nämligen kunna tiltas var för sig. De tre frekvensområdena kombineras sen till två koaxialkablar, en för $+45^\circ$ och en för -45° polarisation. I förstärkarenheten delas signalen upp i olika band och för duplex. Mottagningen behöver ju en lågbrusförstärkare (LNA). Därefter kombineras de igen för att det inte ska bli så många feeder-kablar, eftersom koaxialkablar för höga effekter är dyra och besvärliga att installera. I basstationen måste sen banden delas upp igen till respektive sändare och mottagare.

Radiohuvud för multiband



Om Tx och Rx integreras med antennerna behövs inte så många filter. Det betyder lägre förluster. Dessutom behövs inte någon fasskiftare på RF. Det minskar också förlusterna.



Radiohuvudet innehåller tre ganska olika systemdelar, det vill säga antenn, filter respektive den aktiva delen. De delarna ska sen integreras på lämpligt sätt.

Översikt

En smart antenn är en kombination av flera antennelement och signalbehandling. Variabel tilt har blivit ett viktigt sätt att optimera systemet.

Många element kan kombineras till ett antal fasta lober eller till en styrbar lob som följer mobilen. Den styrbara loben har också nollriktningar som går att styra för att undertrycka störningar. Nackdelen med många element är att antennen blir stor och systemet blir komplicerat.

Sändardiversitet kan ske i slutna slingor med återkoppling från mobilen, eller i öppna slingor med olika koder på antennerna. Till sändardiversitet används enkla rymd-tid koder eller rymd-frekvens koder. Sändardiversitet är speciellt viktigt för de mobiler som inte får så mycket annan diversitet, dvs mobiler som rör sig långsamt i en omgivning som inte ger reflektioner.

MIMO utnyttjar en omgivning med mycket reflektioner för att skapa parallella datakanaler. Det kallas spatial multiplexing. MIMO används för att uppnå hög datahastighet. Om datahastigheten inte är hög, så är det bättre att sända i en enkel kanal. Det ger då lägre frame-error-rate. Finns det dubbla antenner, så kan de istället användas till sändardiversitet. MIMO är till för att hantera tillfälliga toppar i datatrafiken. Om cellens totala kapacitet inte räcker till är det bättre att använda fler sektorer eller fler sajter.

Två antenner som ger statistiskt oberoende signaler kan användas till diversitet. Antenner som ger koherenta signaler kan användas till lobstyrning. En 4-Branch antenn kan kombinera båda teknikerna, utan att antennen behöver bli så mycket större. Den 3 dB högre antennförstärkningen ger dessutom en längre räckvidd.

Sammanfattning

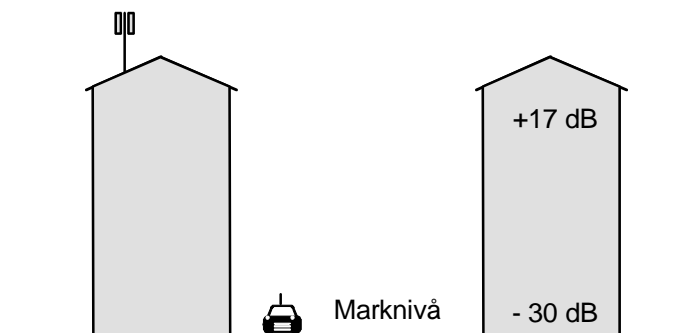
Fler antenner	+	signalbehandling	⇒	Smart antenn
Variabel tilt		Optimerar systemet		
Switchade lober		Ett antal fasta lober		
Adaptiv antenn		En fasstyrd antenn		Följer mobil Undertrycker störning
Sändar Diversitet		Sluten slinga		Återkoppling från mobil
		Öppen slinga		STC Space-Time Code SFC Space-Frequency Code
MIMO		Spatial multiplexing		Parallell data
4-Branch antenn		Diversitet Lobformning		Räckvidd
RRH		Mer elektronik i antennen		

2. Mobiltelefon inomhus

Mobiltelefonen var från början avsedd att ge mobil kommunikation utomhus. Idag behöver vi mobil kommunikation även inomhus. 70 % av alla samtal från mobiltelefon sker inomhus. Problemet är att signalen dämpas då den passerar väggarna. En betongvägg med armeringsjärn dämpar signalen ca 27 dB. Egentligen behöver vi större signal inomhus än utomhus, eftersom det är främst inomhus vi vill använda tjänster med hög datahastighet.

Det går att få inomhustäckning från närliggande basstation utomhus eller med en särskild picobas inomhus. Ett annat sätt är att ta en del av macrocellens kapacitet och leda in den i byggnaden med hjälp av en repeater. Med distribuerade antenner får man god täckning överallt i byggnaden. Ett företag kan använda mobiltelefon kombinerat med WLAN som egen telefonväxel. En bra lösning för mobiltelefon i hemmet är en mycket liten nanobas som kombineras med bredbandig Internet.

Närliggande basstation



En macrocell kan i viss mån ge täckning inomhus. I de övre våningarna kan signalen till och med vara 17 dB högre än vad den är i markplanet utomhus. Nere vid marknivå är signalen svagare och inomhus ytterligare 30 dB lägre. En närliggande microcell förbättrar situationen, men det är fortfarande problem med att få tillräcklig inomhustäckning. Garageplan och andra våningar under marknivå får ingen täckning alls.

Ett enkelt sätt att få bättre inomhustäckning är att öka uteffekten på macrocellens basstation. Men de övre våningarna har problem med att de lätt får mottagning från flera macroceller (pilot pollution). Det ger högre störnivå och många hand-over (oscillerande hand-over och många soft hand-over). Dessutom resulterar högre signalnivå i WCDMA att macrocellen får lägre kapacitet och mindre räckvidd.

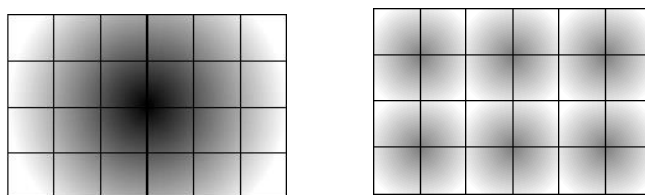
Picobas

En picobas är en basstation som är mindre än en microbas. Uteffekten är några hundra mW. Räckvidden blir då bara några tiotal meter. Den arbetar på endast en frekvens och har bara en utgång. Antennen kan till och med vara inbyggd i lådan, som monteras på väggen eller i taket. Typiska områden för picobas är kontor, köpcentrum, vänthallar på flygplatser och liknande byggnader med många mobilanvändare som rör sig långsamt.

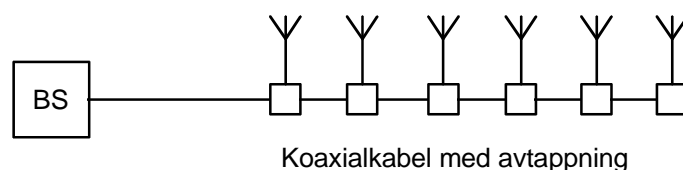
Picobasen ger täckning i områden som inte kan nås av utomhusceller. Denna extra kapacitet finns inomhus, där behovet av högre datahastighet är störst. Dessutom avlastas macrocellen så att det finns mer kapacitet till mobiler i rörelse på långa avstånd.

DAS – Distribuerat Antenn System

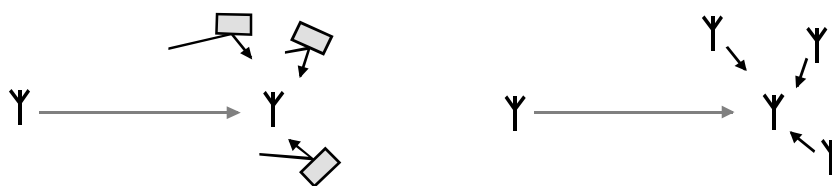
Istället för att bara ha en antenn som ska stråla genom väggarna, kan man koppla ihop flera antenner som är utspridda i olika rum.



Om man bara använder en antenn så behövs det hög effekt i mitten för att det ska bli tillräcklig nivå i rummen längre bort. Med distribuerade antenner blir det jämnare signalnivå och man slipper den extra höga effekten i vissa rum.

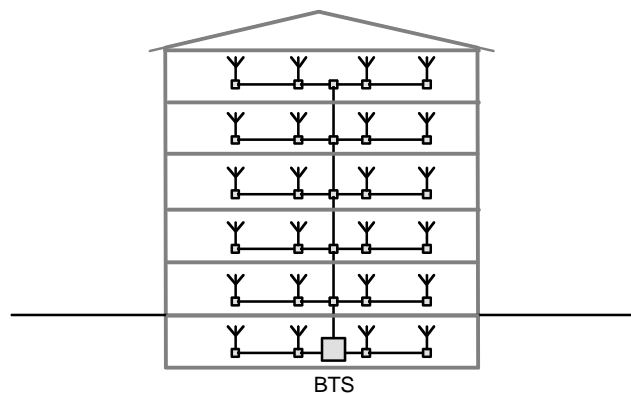


Signalen distribueras med en koaxialkabel. Avtappningen görs lagom mycket så att alla antennerna får samma uteffekt. När man rör sig genom de olika rummen använder man sig av den eller de antenner som är närmast. Det sker ingen hand-over mellan rummen. Mobilen ser en eller flera antenner samtidigt.



Mobilen innehåller en equalizer som justeras automatiskt vid flervägsutbredning. Samma typ av sammansättning av signaler sker då flera antenner sänder samma signal samtidigt. Eftersom mottagarna redan har en adaptiv equalizer kan man alltså använda ett enkelt nät med flera enkla antenner. De senast utvecklade systemen som använder OFDM är speciellt utformade för att hantera flervägsutbredning, dvs DAS.

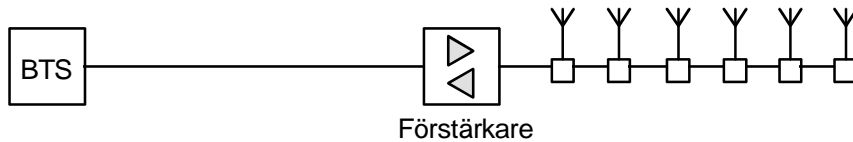
DAS med stort nät



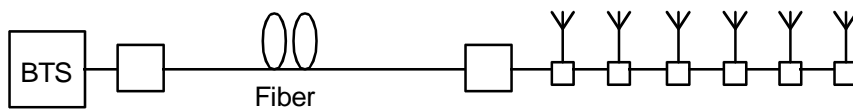
En basstation med distribuerade antenner kan ge en jämn täckning i hela huset. Till och med våningarna under mark och garageplatserna längst ner får täckning. Nätet kan dessutom användas av två separata operatörer. Koaxialkablarna täcker stort frekvensområde. Antennerna kan också göras bredbandiga. Nätet kan då användas till olika frekvensband och olika system (GSM 900, GSM 1800, WCDMA och WLAN). Fördelning med koaxialkabel har använts i många byggnader på grund av att kablar är billiga och tillförlitliga.

Nackdelen med ett stort koaxialnät är att kabelförluster och effektdelning minskar signalstyrkan. I en stor byggnad kan det behövas en microbas eller rent av en macrobas för att få den önskade uteffekten. Men det är inte bara områdets storlek som avgör valet av basstation utan också hur stor kapacitet som behövs. Som jämförelse kan en macrobas ge mer än 20 Erlang, en microbas ca 10 Erlang och en picobas mindre än 2 Erlang. En järnvägsstation kan behöva 5 - 10 Erlang.

Aktiv DAS

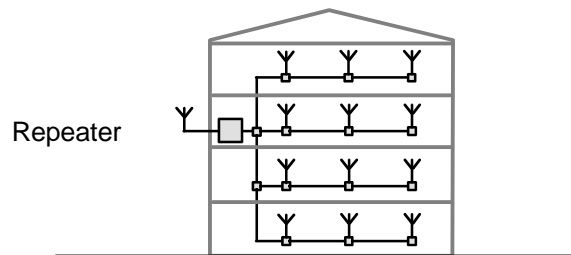


Om kablarna är långa kan det behövas en förstärkare för att kompensera dess förluster. Men om man vill ha flera band så behövs det flera förstärkare, som är separerade med filter.



Om man överför signalen med fiberoptik så är det inga problem med avstånden. Man kan till och med ansluta husen intill. En optisk fiber är dessutom enklare och billigare att installera än en tjock koaxialkabel. Många moderna fastigheter har redan fiber dragen. En fördel med optiska fibrer är att signalnivån blir jämn i systemet. Det gör att systemet blir lättare att ändra och bygga ut.

Repeater



Men en antenn utanför byggnaden kan man koppla till macrocellen. Signalen förstärks och sprids inne i byggnaden. På så sätt har man fått täckning i områden som macrocellen annars inte skulle nå. Fördelen med repeater är förbättrad täckning, utan att själva macrocellen behöver förändras. En annan fördel är att det inte behövs någon kostsam transmission mellan byggnaden och MSC.

Repeatern behöver förstärka signalen 60 - 90 dB. Det gör att repeatern blir begränsad till en eller två frekvensband. Den kan vara ansluten till en enstaka antenn eller till DAS beroende på var kapaciteten behövs. Eftersom repeatern är en förstärkare behövs en isolation mellan dess ingång och utgång som är minst 15 dB större än förstärkningen. Den används därför i de områden som annars helt saknar täckning, till exempel utrymmen under marknivå, där trafiken är för låg för att det ska löna sig med en egen basstation.

Nackdelen med en repeater är att den inte tillför någon kapacitet. Den flyttar endast kapacitet från macrocellen till byggnaden.

De byggnader som har en macrobas kan samtidigt ha ett behov av picoceller. Det är en fördelaktig kombination eftersom macrobasen enkelt kan dela kapaciteten mellan macrocellen och picocellen. Alternativt kan macrobasen fördela en hel cell för inomhusbruk. Det långa avståndet kan kompenseras med en repeater eller med optisk fiber. En stor fördel är att båda cellerna delar på samma transmission till MSC.

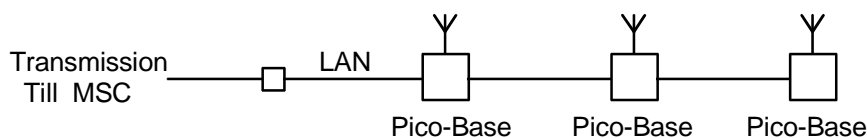
Läckande kabel

En koaxialkabel med slitsar läcker till omgivningen (leaky feeder). Den kan användas för att sprida signalen i en lång tunnel. Men strålningen är för svag för att ge spridning inomhus åt olika håll. Däremot kan den användas i områden som kräver låg signalnivå, till exempel i sjukhus och flygplan.

Picoceller

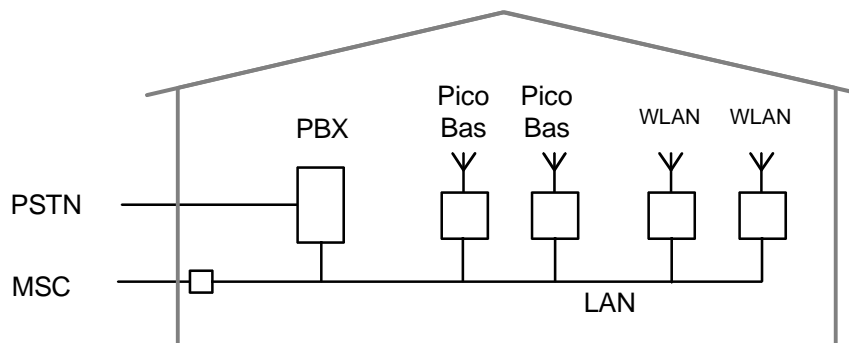
De flesta operatörer för WCDMA har två eller tre frekvenser. Inomhusceller och utomhusceller kan alltså byggas hierarkiskt med olika frekvenser. Men ändå väljer de att använda samma frekvens. Fördelen är att en mjuk hand-over är mycket enklare för systemet, än att göra hand-over till en ny frekvens. Nackdelen är att cellerna stör varandra. Men byggnaderna har en viss isolation och picocellerna arbetar på låg effektnivå. Macrocellens kapacitetsförlust på grund av störning från picocellen blir alltså mycket liten. Läckaget ut ur byggnaden är så lågt att området utanför domineras av macrocellen. Picocellens påverkas däremot mer av macrocellens störning, men kapaciteten som picocellen ger är ändå betydande.

Flera picobaser



En byggnad kan förses med ett flertal picobaser för att få högre kapacitet. Men varje picobas behöver anslutas till mobilsystemets switch-center (MSC). Det betyder att det behövs ett nätverk i byggnaden oavsett var man placerar basstationerna. Fördelen med picobaser är att nätet kan vara mycket enkelt, eftersom kapaciteten är så låg. Trafiken sker med Ethernet protokollet. Om byggnaden redan har ett LAN installerat, är det bara att montera basstationen på lämplig plats och ansluta till närmaste uttag.

Företagsnät



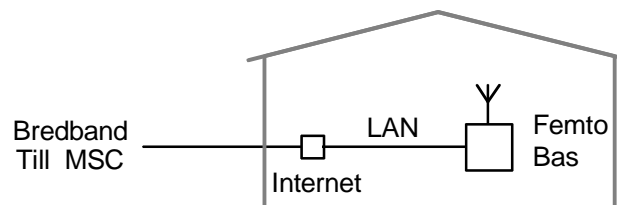
Ett företag kan koppla ihop picobaser med den egna företagsväxeln (PBX – Privat Branch Exchange). Signalering görs fortfarande till mobilnätets switchcenter (MSC) men samtalstrafiken kopplas lokalt. Det blir alltså en avsevärt mindre transmission till MSC, som resulterar i betydligt lägre kostnad för lokalsamtalen. Hand-over görs mellan olika picobaser om man förflyttar sig i byggnaden. Om man går utanför huset sker en hand-over till den omgivande macrocellen, med normal mobiltaxa.

Företagets växel (PBX) kan också anslutas till fasta telenätet (PSTN). Företaget får då både det fasta och det trådlösa nätet integrerat. Med datorer och Internet anslutet till samma LAN blir det ett komplett kommunikationssystem. Men mobilnätet har naturligtvis egna skydd mot angrepp från Internet.

Ett alternativ kan vara att låta samtalstrafiken gå över WLAN. Men då krävs att alla har de lite dyrare mobiltelefonerna som hanterar båda systemen. Med picobaser kan man använda alla mobiltelefoner.

Femtobas

I Europa görs 30-40 % av mobilsamtalen från hemmet. Ett problem är att kostnadseffektivt nå fler bostäder från macroceller och microceller.



En femtobas är en basstation som är speciellt utformad för att passa till hemmabruk. Uteffekten är mycket låg (10 - 100 mW) så att den enbart täcker bostaden. Den har dessutom bara en kapacitet för att klara 4 - 6 samtidiga samtal. Det gör att den blir mycket liten, och kan tillverkas till kommersiellt pris. Anslutningen till närmaste basstation sker med den befintliga bredbandsuppkopplingen, till exempel DSL, fiber eller HFC (kabel-TV)

Mobiloperatören har med femtoceller fått ett större nät till en mycket låg kostnad. Det är kunderna som avgör var det behövs extra täckning. Speciellt de nya tjänsterna med större bandbredd kan behöva extra täckning. Kunden köper själv utrustningen och gör till och med installationen själv. Med macroceller är transmissionen, dvs. sammankopplingen till switchcenter och andra basstationer, en mycket stor kostnad. Med femtobas är det kunden som betalar anslutningen till Internet. Kunden betalar dessutom apparaternas strömförbrukning och ser till att allt fungerar som det ska.

Den låga kostnaden för operatören gör att det kan bli betydligt billigare att ringa från mobilen då man är hemma. Mobiltelefonen fungerar alltså som en sladdlös telefon inom hemmet. Men när man går utanför hemmet gör systemet automatiskt en hand-over till närmaste macrocell.

Telefoner med både GSM och DECT (dual-mode) blev aldrig någon succé. Det blev för dyrt och klumpigt att bygga ihop de två systemen i en handapparat. På senare tid har mobiltelefon kombinerats med WLAN på ett smidigare sätt. Det kan vara ett alternativ att använda WLAN för att ansluta mobiltelefonen. Men det är fortfarande två olika system (dual-mode) som kostar mer än enkla mobiltelefoner.

Både med picobas på mobilbandet och med WLAN anslutning sker signalering till närmaste basstation via en tunnel på Internet. Basstationen vet då att man befinner sig i den hemcellen så att samtalen kan kopplas dit. Fördelen är att man alltid kan nå på samma mobilnummer och att man får hand-over och roaming även till hemcellen.

Sammanställning över olika celler

Celltyp	Macro	Micro	Pico	Femto
Diameter	2 - 20 km	0,4 - 2 km	10 - 200 m	10 - 30 m
Uteffekt	20 - 40 W	< 6 W	< 300 mW	tiotals mW
Antal samtal	1000	400	80	5
Antenn	Ovanför hustak	Nedanför hustak	Inomhus ev. DAS	Inomhus
Användning	Snabbt rörliga mobiler	Stor kapacitet på gator och köpcentra	Kontor och butiker	Hemmet

Fjärde Generationen

1. Utbyggnaden från 3G mot 4G

Utbyggnaden för mobiltelefon har delats upp i tre steg. Först var det viktigast att få en så stor täckning som möjligt. Andra utbyggnaden var för att få högre kapacitet. Den tredje utbyggnaden handlar om att få hög datahastighet och snabb åtkomsttid (latency). Det behövs för att få bredbandiga mobiltjänster som till exempel att söka på Internet (web browsing), strömmande video, mobila spel och nerladdning av musik. Vid utbyggnaden för telefonsamtal skulle alla samtal behandlas lika. När det gäller datatrafik ska olika tjänster ha olika datahastighet och olika åtkomsttid.

Grundversionen av tredje generationens mobilsystem kallas Release-99 av 3GPP. Standarden som blev klar 1999 introducerade WCDMA med kanalbredden 5 MHz, variabel spridningsfaktor och snabb effektreglering.

HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ger hög datahastighet på nerlänken. HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) ger snabbare upplänk. När båda modifieringarna är införda kan systemet istället kallas HSPA.

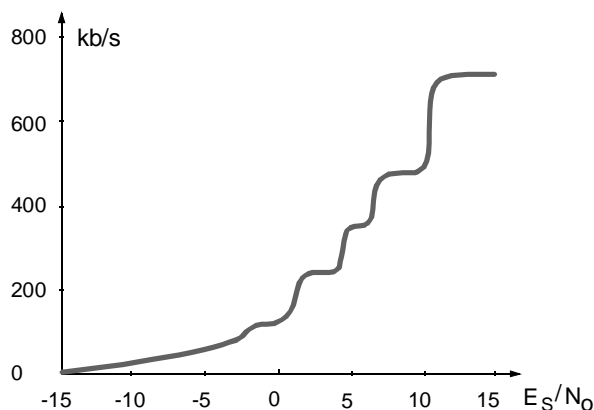
Nästa steg i utvecklingen går under arbetsnamnet LTE (Long Time Evolution). Det är en så betydligt större förändring, att det nya systemet också har kallats 4G.

HSDPA

HSDPA har ersatt den variabla spridningsfaktorn och effektregleringen med tre nya tekniker, AMC (Adaptive Modulation and Coding) och paketstyrning vid basstationen samt återsändning från basstationen vid datafel (HARQ). Fortfarande kan HSDPA fungera tillsammans med Release-99 på samma frekvens.

AMC (Adaptiv modulation och kodning)

HSDPA (3GPP Release-5) har infört modulationen 16-QAM för att uppnå högre datahastighet. Förutsättningen är att man befinner sig nära basstationen där signalstyrkan är tillräckligt stor. WCDMA Rel-99 minskar amplituden till de användare som har bättre mottagning. Men regleringen är begränsad till 20 dB eftersom en ytterligare minskning endast får en marginell inverkan på kapaciteten. De närliggande mobilerna får alltså en större signalstyrka, som kan användas till högre modulationstyp. På längre avstånd med lägre signalstyrka, används istället QPSK som förut. Dessutom används felrättande koder från Code-Rate 1/4 till 3/4. Här betyder 3/4 att 3 symboler från källan ger sammanlagt 4 kodade symboler. Högre Code-Rate används därför i närheten av basstationen för att få högre datahastighet. Lägre Coding-Rate används där signalstyrkan är liten, för att bättre hantera felen från brusstörningar.



Olika modulation tillsammans med olika kodning ger en datahastighet som ökar med signal/brus förhållandet. De olika stegen i kurvan visar övergångar mellan olika modulationer och Code-Rate. Om man dessutom utnyttjar kanalkoder blir kurvan ännu jämnare. Dynamikområdet i signal/brus förhållandet är ca 20 dB. Med 15 kanalkoder blir dynamikområdet istället ca 32 dB (och 15 ggr högre datahastighet).

När dämpningen i vågutbredningen varierar, kommer WCDMA Rel-99 att variera amplituden, för att alltid få samma datahastighet. Men en högre effekt för vissa användare ger en totalt sett högre störnivå. Det ger hela systemet en lägre kapacitet.

Release-5 är optimerat för hela systemet istället för en enskild användare. För datatrafik, som kan tolerera ett visst jitter i trafiken, är det effektivare att kontrollera Eb/No genom att justera datahastigheten och hålla uteffekten konstant. På cellranden, det vill säga vid maximala avståndet, kan man uppnå en datahastighet på 384 kb/s. Om HSDPA inte är infört blir motsvarande datahastighet 64 kb/s. HSDPA ger alltså högre datahastighet överallt, men den blir ännu högre ju närmare basstationen man befinner sig.

Förbättringen man uppnår genom att sända mer till den som för tillfället har bättre mottagning kallas multi-user-diversity.

HARQ

HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) innebär att när mottagaren får ett bitfel som inte kan korrigeras (FEC) så ber han att få det sänt en gång till (ARQ). Den första sändningen sparas för att sen kombineras med nästa sändning. Det ger tillsammans högre redundans så att bitfelen lättare och snabbare ska kunna korrigeras. Även om båda sändningarna ger fel i transmission, så kan de tillsammans få ett felfritt datapaket (soft combining). Om nästa sändning har försetts med andra paritetesbitar kallas den kombineringen incrementell redundans.

Snabb trafikplanering

Trafikplanering för datapaketet sköts av basstationen (Node B) istället för den gemensamma nätverksstyrningen (RNC - Radio Network Controller). Genom att flytta ut intelligensen kan trafikhanteringen skötas mycket snabbare.

Varje användare rapporterar sin aktuella signalkvalite till basstationen 500 gånger per sekund. Basstationen använder den informationen för att bestämma vilken användare nästa 2 ms frame ska sändas till. Dessutom bestämmer basstationen hur mycket data som ska sändas. Användare med bra signalkvalite på nerlänken får då mer data. Naturligtvis ska användare med dålig mottagning också få en rimlig tilldelning, men användarna med god mottagning får högre datahastighet.

Soft hand-over utnyttjar kommunikation till två olika basstationer, då man befinner sig i gränsområdet mellan två celler. Men nu har trafikplaneringen har flyttats ut till basstationerna, där trafiken optimeras helt oberoende av varandra. Slutresultatet är att soft hand-over inte kommer att utnyttjas i den förbättrade delen av systemet.

Kanalkoder

Aktuellt frekvensband fördelas med olika kanalkoder (HS-DSCH) som har spridningsfaktorn 16. Det finns 16 koder, av vilka 15 används till HSDPA. När basstationen beslutat vilka användare som ska få nästa 2 ms frame, fördelar den också vilka kanalkoder som respektive användare ska få. Den informationen sänds på en separat kanal. En viss användare kan bli tilldelad flera koder för att på så sätt få mer data överförd.

QPSK med 5 tilldelade koder kan komma upp i en datahastighet på 1,8 Mb/s. 16QAM med 5 koder får så hög datahastighet som 3,6 Mb/s. En förutsättning är förstås att kundenheten är av den kategori som kan hantera parallella kanalkoder. Kundenheten signalerar sin kategori till basstationen. Om den kan hantera 10 eller 15 kanalkoder blir datahastigheten 7,2 Mb/s respektive 10,7 Mb/s.

HS-DSCH

I WCDMA Rel-99 får varje användare en egen transportkanal, DCH (Dedicated Channel). Det passar för telefonsamtal, som ju har en ganska konstant datahastighet. Datatrafik med paketdata behöver extra hög datahastighet endast under korta tider. Det är då effektivare att dela på en gemensam kanal, HS-DSCH (High Speed Downlink Shared Channel). Med delad resurs kan kapaciteten öka 50 - 100 %. Ett visst antal av de 16 kanalkoderna blir reserverade till den delade kanalen.

HSUPA

HSUPA, som ingår i Release 6 av 3GPP specifikationerna, består av liknande modifieringar som HSDPA. En uppdelning av sändningen i korta intervall (TTI - Transmission Time Interval) resulterar i betydligt mindre fördröjning. HARQ på upplänken ger också kortare fördröjning.

Den snabba trafikplaneringen i basstationen ser till att mobilerna sänder mer data då upplänken har bra signalkvalite. Eftersom en mobil kommunikation ser en snabbt varierande vågutbredning, betyder de korta fördröjningarna att trafikplaneringen ökar systemets totala kapacitet på upplänken.

Datahastigheten på nerlänken kommer också att öka då fördröjningen i upplänken minskar. Prestanda för TCP (Transmission Control Protocol) bestäms av den totala fördröjningen fram och tillbaks.

Modulationen i upplänken har begränsats till BPSK och QPSK. HSUPA kommer inte att använda 16QAM på grund av att den modulationen behöver högre uteffekt. Upplänken kan istället använda flera kanal-koder för att överföra mer information. Nerlänken använder kanal-koderna för att separera olika användare, men på upplänken är användarna separerade med scrambling-koderna.

I upplänken används fortfarande snabb reglering av effekten. Det behövs ett så stort dynamikområde som 70 dB för att kompensera sträckdämpningen. Alla mobiler ska ha samma effektnivå framme vid basstationen. Mobilerna behöver därför justera sin uteffekt beroende på avståndet till basstationen. Dessutom ska HSUPA fungera tillsammans med mobiler av Release-99 också.

Datahastigheten på upplänken kan inte bli lika hög som på nerlänken, eftersom upplänken är effektbegränsad. Beroende på tillgängliga koder delas mobilenheterna in i olika kategorier, med datahastigheter på 0,73 Mb/s till 5,76 Mb/s.

Jämförelse

Nerladdning av 3 MB videoklipp	GPRS	343	sek
	EDGE	125	
	UMTS	67	
	HSDPA	12	
RTT - Round Trip Time	GPRS	500	ms
	EDGE	150	
	UMTS	200	
	HSDPA	100	
	HSUPA	50	

HSPA ger högre datahastighet, snabbare åtkomsttid och högre kapacitet. Det behövs för att få bredbandiga mobiltjänster som t.ex. söka på Internet, strömmande video, mobila spel och musik. Användarna kan i genomsnitt få en datahastighet på 1 Mb/s i en makrocell och 5 Mb/s i en microcell.

Evolved HSPA

EHSPA är en vidareutveckling enligt specifikationen 3GPP Release 7. Med mottagardiversitet på mobilen, MIMO och lobformning ska datahastigheten kunna bli 42 Mb/s på nerlänken och 11 Mb/s på upplänken. Den specifikationen finns med i 3GPP Release 8 som blir klar 2008, så att utbyggnaden kan starta under 2009.

2. LTE

LTE (Long Time Evolution) är projektnamnet för nästa generations mobilsystem. Enligt 3GPP kallas standarden Release-8. Den innehåller ett luftgränssnitt som också har kallats HSOPA (High Speed OFDM Packet Access). Modulationen som är OFDM, är alltså helt inkompatibelt med CDMA. Uppgraderingen av UMTS är alltså mer lik övergången från GSM till WCDMA. Det ger ett system med betydligt bättre prestanda och flexibilitet än WCDMA. Men det är fortfarande ett system inom familjen 3G. Ibland kallas det Super-3G (S3G) eller Evolved UTRA (E-UTRA).

Bandbredden ska kunna vara 1,25 2,5 5 10 15 eller 20 MHz. Med bandbredden 20 MHz kan man komma upp till 100 Mb/s i nerlänken och 50 Mb/s i upplänken. Flexibiliteten i bandbredd behövs för att passa olika operatörer, som har fått olika bandbredder tilldelade.

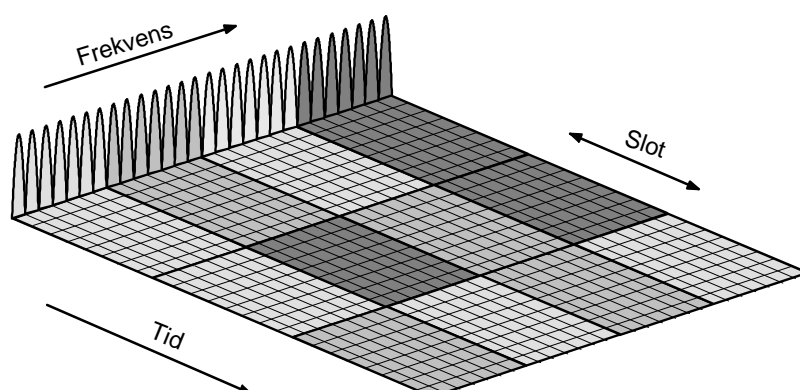
Specifikationerna stöder både FDD och TDD. Om det finns två parade frekvensband används FDD. TDD kan användas på de frekvensområden som inte har parade band.

Cellernas storlek är upp till 5 km för önskade prestanda, och upp till 30 km med lägre prestanda och sämre utnyttjande av spektrat.

Flera antenner kommer att behövas på både basstationen och mobilenheten. Specifikationen innehåller stöd för 2 respektive 4 antenner.

All trafik kommer att vara paketswitchad med IP. Den kretskopplade taltrafiken ersätts helt med Internet-telefonins VoIP (Voice over IP).

OFDM signalens uppdelning



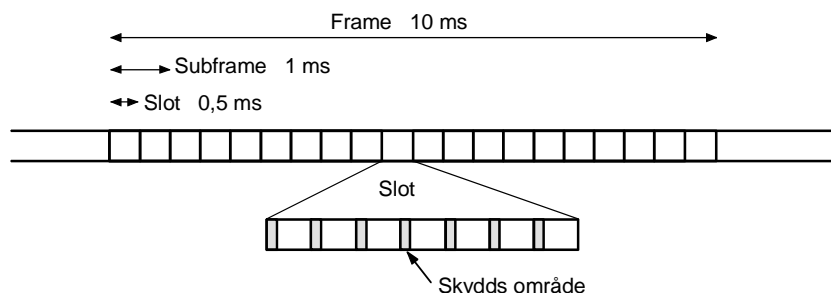
OFDM signalen består av ett stort antal subfrekvenser, som delas in i grupper med 12 subfrekvenser. Sändningen sker under minst en slot, som är 0,5 ms lång (TTI - Transmission Time Intervall). Det blocket, med 12 subfrekvenser under en TTI, kallas PRB (Physical Resource Block) eller RU (Resource Unit).

Varje subfrekvens har en bandbredd på 15 kHz. En PRB blir alltså 180 kHz bred. Hur många PRB man får plats med beror på OFDM signalens totala bandbredd.

Bandbredd MHz	1,25	2,5	5	10	15	20
Antalet PRB	6	12	25	50	75	100
FFT storlek	128	256	512	1024	1536	2048

Subfrekvenserna är alltid separerade med 15 kHz. Den totala bandbredden bestäms av hur många subfrekvenser som används, dvs storleken på FFT. En mobil behöver kunna ta emot alla 2048 subfrekvenserna. Men basstationen blir begränsad till operatörens tilldelade frekvensområde på aktuellt band. Den minsta bandbredden består av 72 subfrekvenser. Varje subfrekvens är modulerad med QPSK, 16QAM eller 64QAM beroende på vågutbredningen för tillfället.

Två slot bildar tillsammans en subframe. En hel radioframe som är 10 ms lång innehåller 10 subframe, det vill säga 20 slot.



En slot innehåller OFDM-symbolerna med tillhörande skyddsområden (cyclic prefix). Längden på OFDM-symbolerna bestäms av subfrekvensernas delning på 15 kHz och blir alltså 66,7 μ s.

Med ett skyddsområde på 4,7 μ s klarar man reflektioner i omgivningen (delay spread) för de flesta situationer. Om det är stor spridning i tiden, behövs ett större skyddsområde. Men med stort skyddsområde får inte alla symbolerna plats i en slot. Det finns alltså två alternativ:

Skyddsområde	Antal symboler / slot
4,7	7
16,7	6

Nackdelen med stort skyddsområde är alltså att mindre resurser används till själva informationen. I stora celler som begränsas av brus istället för distorsion kan det till och med vara bättre att välja det kortare skyddsområdet.

Den största användningen av det längre skyddsområdet kan bli för TV-utsändningar. I det fallet sänder samtliga celler samma sak samtidigt (Single Frequency Network). Skyddsområdet kan då behövas för att hantera avvikelser i sändningstiderna.

Med Latency menas den tid det tar för 32 byte att gå fram och tillbaka, dvs ett ping. Med ett typiskt 3G nät tar det 120 ms, men med LTE blir bara det 20 ms.

Fördelning av resurserna

(Scheduler)

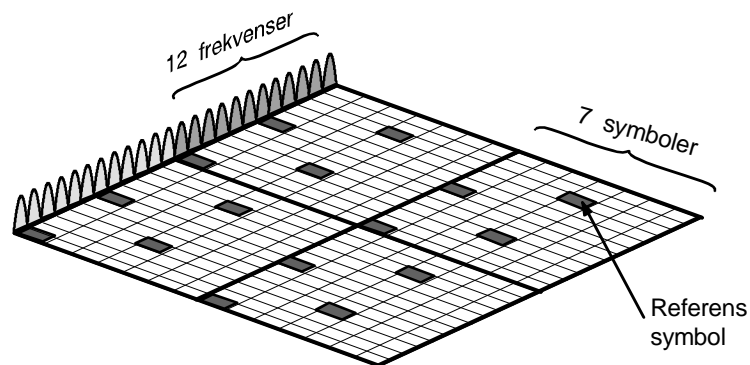
Systemets resurser ska dynamiskt fördelas mellan användarna. HSPA fördelar resurserna med tider och koder. LTE fördelar resurserna med tider och frekvenser.

Fördelningen av resurserna sker en gång per ms med en upplösning av 180 kHz (PRB). Det betyder att fördelningen hänger med på ganska snabba variationer av kanalen.

Om kanalens kvalitet (vågutbredning) tas med vid fördelningen av resurserna kan systemet få betydligt högre kapacitet. LTE ger 2-3 gånger högre datahastighet än 3GPP Release 6 (dvs HSPA). Jämfört med HSPA har LTE dessutom möjlighet att byta frekvens dynamiskt. Det är speciellt fördelaktigt för de användare som rör sig med låg hastighet.

Pilotsignaler

Den koherenta demodulatoren i mottagaren behöver pilotsignaler som referens. Pilotsignalerna överförs i LTE på vissa frekvenser under vissa tider.



Varje informationsblock (PRB) är uppdelat i 12 subfrekvenser och 7 OFDM-symboler (en slot). I det blocket ligger fyra referenssymboler utspridda.

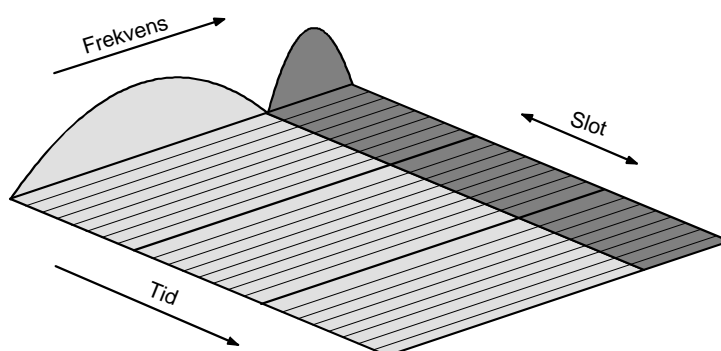
Det komplexa värdet på referenssymbolen varierar för de olika positionerna. Värdet följer en viss sekvens, som är olika för olika celler. Det finns 510 olika sekvenser som kan användas till att identifiera de olika cellerna.

Frekvensen för pilotsignalen kan ligga still för efterföljande subframe, eller också kan frekvensen varieras (frekvens hopp). Med olika hoppmönster i olika celler förhindras att referenssignalerna kontinuerligt kolliderar med varandra.

Utöver pilotsignalerna så används de första symbolerna i varje subframe till systemets kontrollsignaler. I ett resursblock (PRB) finns det totalt $7 \times 12 = 84$ symboler.

Upplänk med SC-FDMA

Upplänken skiljer sig från nerlänken eftersom effektförbrukningen i mobilenheten måste hållas så låg som möjligt. OFDM har ganska hög topp-effekt i förhållande till medeleffekten (PAPR). Det ger sändaren dålig verkningsgrad. Mobilen bör istället använda en bredbandig modulation på endast en bärvåg (Single Carrier). För att ytterligare begränsa topp-effekten används bara QPSK och 16QAM.



Den totala bandbredden delas upp i ett antal bredbandiga kanaler, som fördelas till de olika mobilerna. Upplänken använder alltså multipel access med frekvensduplex (FDMA).

Bandbredden som tilldelas beror på hur mycket data som ska sändas och hur mycket som behövs för de andra mobilerna. Men bandbredden som kan utnyttjas bestäms också av signalnivån. Beroende på uteffekt från mobilen och avståndet till basstationen, väljer systemet en lämplig bandbredd. De flesta applikationer med paketdata kan ha mycket data att överföra ibland, men under vissa tider är det väldigt lite eller ingen data alls att överföra. Tilldelningen av lämplig bandbredd behöver alltså vara dynamisk för varje tidsintervall (slot).

Modulatore utnyttjar den FFT som ändå finns tillgänglig i mobilenheten. Den bredbandiga modulationen överförs först till frekvensdomänen. Signalen placeras där på rätt undergrupp av subfrekvenser. Sen transformeras signalen tillbaks till tidsdomänen så att den kan konverteras till en analog RF-signal.

Upplänken är också uppdelad i subfrekvenser med avståndet 15 kHz, som sen grupperas i resursblock med 12 subfrekvenser. Den tilldelade bandbredden för upplänkens nästa subframe bestäms alltså av antalet resursblock. Det ger en mycket stor flexibilitet i valet av bandbredd, men minsta antalet är 6 block

Skyddsområde i tiden

På motsvarande sätt som OFDM kan en SC-FDMA transmission betraktas som en linjär summering av diskreta subfrekvenser. Flervägsutbredningen hanteras alltså på samma sätt, med ett skyddsområde i tiden (cyclic prefix).

En OFDM signal innehåller ett antal subfrekvenser som är modulerade helt oberoende av varandra. Det ger signalen en hög toppeffekt (PAPR). En bredbandig modulation på endast en bärvåg, kan visserligen betraktas som ett stort antal spektraldelar, men de subfrekvenserna har inte modulerats oberoende av varandra. Slutresultatet är att toppeffekten inte blir lika hög. Effektförstärkaren kan arbeta ett par dB närmare kompressionspunkten.

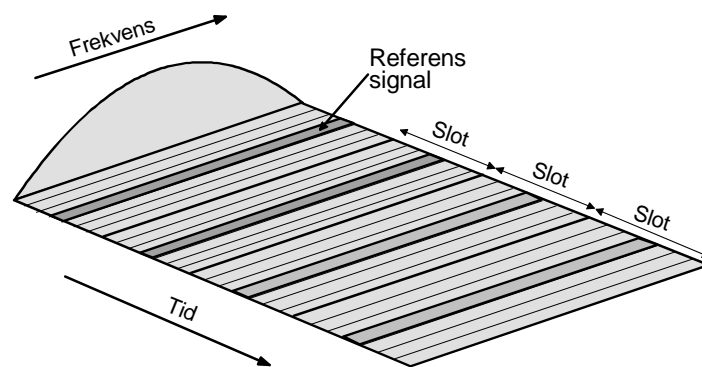
Effektreglering

Upplänken använder effektreglering för att kompensera vågutbredningens förluster. Men regleringen kan vara långsam eftersom de olika mobilerna är separerade i frekvens och tid. Det är bara CDMA-system som behöver snabb reglering av effekten, eftersom det är amplituden efter korrelatorn i det fallet som separerar signalerna.

Mobiler i granncellen

Inom cellen stör inte de olika mobilerna varandras signaler. Men de mobiler som ligger i cellens ytterkanter kan störas av mobilerna i granncellen. Möjligen kan granncellens basstation införa restriktioner för vissa frekvenser. Det ger mindre störning, det vill säga en möjlighet till högre datahastighet. Men granncellen får ju mindre resurser så det är en fördelning som bara kan användas lokalt på vissa platser.

Referens till koherent demodulering



Upplänken behöver också en referenssignal för att kunna göra koherent demodulering vid basstationen. Var fjärde symbol i varje slot innehåller en referens, som är modulerad till samma bandbredd som de övriga symbolerna. För att inte olika cellers referenssignaler ska störa varandra, kan de innehålla olika sekvenser.

Uppmätning av upplänken

(Channel Sounding)

Om mobilen väljer att sända på de frekvensband som för tillfället är av god kvalitet, kan man få högre datahastighet och lägre interferens i granncellerna. Nerlänken mäts med en bredbandig signal från basstationen. Mobilen rapporterar sen kvalitén till basstationen.

När det gäller upplänken har ju mobilerna bara fått tilldelat ett smalt frekvensområde. Men eftersom kanalen inte behöver mätas upp varje subframe, så kan mobilerna turas om att sända en bredbandig referenssignal.

Referenssignalen behöver inte innehålla varje subfrekvens. Det räcker med ett visst antal som är utspridda över hela bandet. Det betyder att olika mobiler kan sända samtidigt, fast fördelade på olika frekvenser.

Referenssignalerna är modulerade med en viss kod, som dessutom kan vara olika tidsförskjutna för olika mobiler.

Korrigerig av avståndet

Mobilerna som sänder samtidigt är separerade i frekvens. En förutsättning för att mottagaren ska kunna separera de olika signalerna, utan att de stör varandra, är att de finns samtidigt i FFT-fönstret. De får alltså inte avvika mer än skyddsområdet (Cyclic Prefix). De mobiler som befinner sig längre bort från basstationen, behöver tidigarelägga sin sändning i proportion till avståndet. Varje mobil får några gånger per sekund order om att öka eller minska tidsförskjutningen.

Frekvensband

LTE är inte utvecklat för ett speciellt frekvensband. Ett naturligt alternativ kan vara att så småningom byta ut GSM till det betydligt effektivare LTE. Det gäller alltså både 900, 1800 och 1900 MHz bandet. Dessutom har det tillkommit ett nytt band vid 2600 MHz som kan användas till mobiltelefon. Ett framtida system kan också få utnyttja de frekvenser som blir lediga, eftersom TV-kanalerna kan buntas ihop mycket effektivare än då det var analoga utsändningar.

Det är samma radiosystem men de olika frekvensbanden kan få olika specifikationer när det gäller maximala uteffekten och störningar utanför sitt band.

FDD eller TDD

Eftersom frekvensen väljs för varje tidsavsnitt, kan systemet också välja att sända på samma frekvens för både upplänk och nerlänk. Sändning och mottagning blir då istället fördelade till varsin subframe. Systemet kan välja antalet subframe till upplänk respektive nerlänk. Överföringen kan alltså ställas in till valfri asymmetri. Men det måste då gälla samtliga celler i området, för att inte mobilerna ska störa varandra.

En restriktion vid TDD är att första och sjätte subframe alltid ska användas till nerlänk. Orsaken är att just de innehåller synkronisering av LTE.

Eftersom det är samma teknik som används, är det alltså ganska enkelt att få en handapparat att fungera i både FDD-mode och TDD-mode.

3. Sammanfattning

UMTS mobilsystem

2:a Generationen	GSM		13	kb/s
	GPRS		20 - 40	
	EDGE		200 - 400	
3:e Generationen	WCDMA		384	
	HSDPA	DL	5 - 15	Mb/s
	HSUPA	UL	2 - 5	
	EHSPA		25 / 10	
4:e Generation	LTE		100 / 50	

HSUPA förbättrade datahastigheten även på cellkanten. LTE ger 2-3 gånger högre datahastighet än HSPA.

	3GPP spec.	Spec. år	Start år	Teknologi
WCDMA	Release 99	2000	2001	CDMA
HSDPA	Release 5	2002	2006	16QAM
HSUPA	Release 6	2004	2007	16QAM
EHSPA	Release 7	2007	2009	64QAM & MIMO
LTE	Release 8	2008	2010	OFDM

Det är 3GPP (3rd Generation Partnership Project) som skriver specifikationerna. 3GPP är ett samarbete mellan standardiseringsorganen i olika världsdelar. Målsättningen är att få tekniska specifikationer inom telekommunikation som är globalt lika.

Transmission (Backhaul)

Transmission av trafiken mellan basstationerna sker med både kopparkabel, mikrovågslänk och optiska fiber. 60 % av alla basstationer för 2G är anslutna med mikrovågslänkar. Kostnaden för transmissionen är så stor som 15 % av en 3G sajts totala kostnad. Men när datahastigheten till kunderna ökar så ökar också kraven på transmissionen. HSDPA behöver kopplas ihop med 15 Mb/s, och LTE behöver så mycket som 150 Mb/s.

Det är tillåtet att använda WiMAX som länk mellan basstationerna. Om det finns kapacitet över kan det kombineras med BWA på lämpliga platser.

Jämförelse mellan teknologier

Certifiering för grundläggande funktioner av mobil WiMAX startade under år 2007. Under 2008 sker certifiering av de mer avancerade delarna som: MIMO , AAS (Adaptiv Antenn) , AMC (Adaptiv modulering och kodning) , IPv6 , viss QoS , full hand-over samt "Sleep Mode Support".

När produkterna börjar säljas är de endast något bättre än HSPA. Mobil WiMAX kan användas på de frekvensband som tilldelats i USA.

	WiMAX	LTE
Nerlänk	OFDMA	OFDMA
Upplänk	OFDMA	SC-FDMA
Duplex	TDD	FDD

HSPA, 1xEV-DO och IEEE802.16e-2005 är alla väl optimerade i det fysiska lagret. De ligger 2 - 3 dB från teoretiska gränsen (Shannon). När både WiMAX och LTE har infört MIMO, mottagardiversitet på mobilen och adaptiv antenn på basstationen så har vi fortfarande två ganska likvärdiga fysiska lager till 4G.

Det som skiljer är då andra saker som tillgänglighet, kostnader, täckning, roaming och handapparater.

Trend inom kommunikation

Den trend vi har sett de senaste åren är att stora företag har slagits ihop. Motiveringen har varit att kombinera trådlös och fast kommunikation. De stora företagen har alltså redan börjat positionera sig för nästa generation av kommunikation. Telefon, TV och Internet som varit helt separata områden börjar kombineras. Mobiltelefonen kommer alltså att integreras med de andra teknologierna för kommunikation.

Konvergens med andra nät

1. DVB

DVB (Digital Video Broadcasting) avser utsändning av digital-TV (DTV) och högupplöst digital-TV (HDTV - High Definition TV). Om sändningen sker från TV-stationer på marken (Terrestrial) får den tillägget DVB-T. Sändning från satellit kallas DVB-S och genom kabel-TV nätet DVB-C. En planerad TV-sändning till mobiltelefoner kallas DVB-H (Handheld).

TV-kanalerna är på ca 8 MHz. Signalen i DVB-T är OFDM-modulerad med 6817 delfrekvenser till en datahastighet på 24 Mb/s. Det räcker till att sända HDTV, eller flera vanliga DTV-program på samma kanal. I sändaren respektive mottagaren används en FFT på 8k punkter eller 2k punkter.

Alternativet med 2k punkters FFT ger färre subfrekvenser, men med större avstånd mellan subfrekvenserna. Det gör att den tål större doppler, och alltså är lämpligare vid höga hastigheter. För att få samma datamängd blir istället symbolerna kortare. Det är också bra vid höga hastigheter, eftersom uppmätningen av kanalen sker oftare och kan därför kompensera för snabba variationer.

Med 8k punkters FFT varar symbolerna fyra gånger längre. Det får då plats ett större skyddsområde som kan hantera motsvarande större celler. Om man ska täcka stora områden kan man dessutom använda SFN (Single Frequency Network). Samma information sänds då samtidigt i alla celler på samma frekvens. Det behövs alltså ingen frekvensplanering, och det blir frekvenser lediga för andra program.

Frekvensområdena för TV

	Band	Frekvens MHz	Kanal	
VHF	I	47 - 68	2 - 4	
	II	87,5 - 108	FM radio	
	III	174 - 230	5 - 12	
UHF	IV	470 - 621	21 - 39	DVB-T
	V	622 - 790	40 - 69	DVB-T

Frekvensområdet 174 - 230 MHz kommer att kunna användas när grannländerna har släckt ner sina analoga TV-stationer. De frekvenserna ska vara skyddade från störningar fram till senast år 2015. Området 790 - 862 MHz ska användas till andra applikationer än TV-sändning, troligtvis mobila applikationer. TV-sändningarna ska begränsas till 470 - 790 MHz, med 8k FFT och 64 QAM. Men eftersom varje kanal kan innehålla flera program samtidigt så finns det gott om plats för nya program, specialprogram och lokala program. När MPEG-4 införs kommer det att få plats med ännu fler program per kanal.

Returkanal

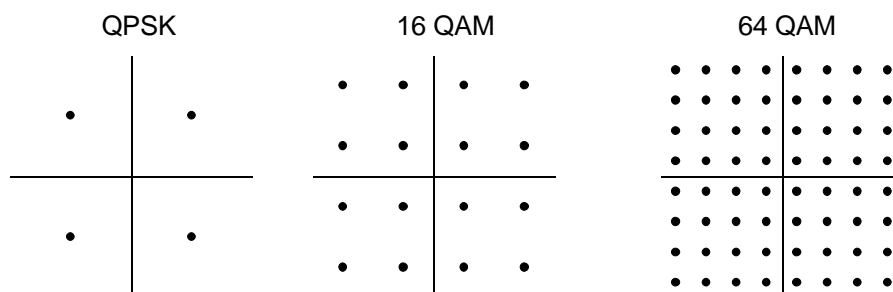
TV var från början endast utsändning av program. Men det har blivit allt viktigare med en returkanal för att få interaktiva program. Man ska kunna påverka programmet, köpa varor eller rösta. Problemet är att en liten sändareffekt hos kunden ska ta sig fram samma vägsträcka som den höga effekten i TV-sändaren. Det resulterar i en mycket låg datahastighet och ett stort antal simultana användare.

Fördel

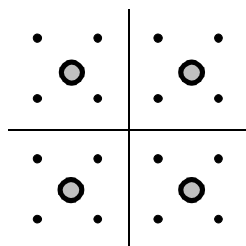
DVB medför att frekvensområdet utnyttjas oerhört mycket effektivare. Det får plats flera program på samma frekvens. De digitala signalerna stör inte varandra lika mycket som de tidigare analoga sändningarna. Frekvenserna kan alltså återanvändas oftare. Med samma program i flera celler kan man också använda samma frekvens. OFDM medför också att man slipper se dubblerade spökbilder från ekon i omgivningen. Man kan använda mycket enkla antenner om signalstyrkan räcker.

Problemet med returkanal har inget med DVB att göra. Det beror istället på att TV-systemet har byggts med ganska stora celler.

Hierarkisk modulation

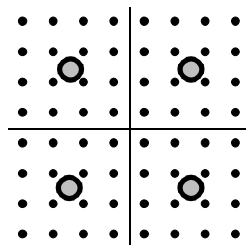


64QAM kan överföra mer information för varje symbol. QPSK får längre räckvidd eftersom den kan arbeta på lägre signalnivåer (S/N). Hierarkisk modulation är en kombination för att samma utsändning ska kunna utnyttjas till olika målgrupper.



De stora ringarna representerar QPSK som är den viktiga grundinformationen. På den konstellationen har extra information av lägre prioritet överlagrats. Slutresultatet är de små svarta prickarna som representerar 16QAM. Det ger en hög datahastighet till de mottagare som kan ta emot 16QAM.

En enklare mottagare, eller en mottagare där signalstyrkan inte tillåter användning av 16QAM, kommer att demodulera QPSK istället. De stora ringarna har enbart ritats ut för att representera de fyra kvadranterna. Det som sänds är de fyra svarta prickarna i respektive kvadrant. QPSK mottagaren ser det som att kvadrantens tillstånd blivit lite diffust utsträckta. Nackdelen är alltså att QPSK har fått lite sämre känslighet, som får kompenseras på annat sätt i systemet.

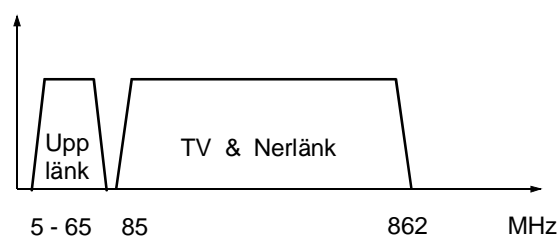


Alternativt kan QPSK hierarkiskt kombineras med 64QAM för att få ännu högre datahastighet från tilläggsinformationen.

Alla användare kan alltså få den grundläggande informationen från en robust QPSK. Användare i en fördelaktigare situation kan dessutom få tilläggsinformationen från 16QAM. En statiskt placerad TV-apparat får sin signal från en utomhusantenn, och kan alltså utnyttja hög kvalitet. En mobil TV-apparat med enkel antenn tar emot en lägre kvalitet, som passar den mobila skärmen som normalt är mindre.

2. HFC Hybrid Fiber Coax

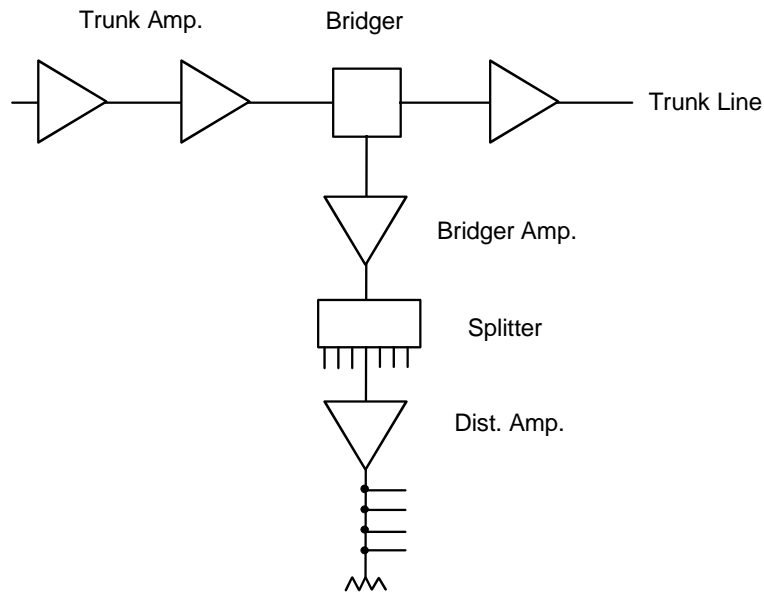
Kabel-TV utnyttjar idag till stor del fiber i transmissionen. Koaxialkabel används endast den sista delen med spridningen till kunderna. Benämningen HFC stämmer därför bättre överens med systemets uppbyggnad.



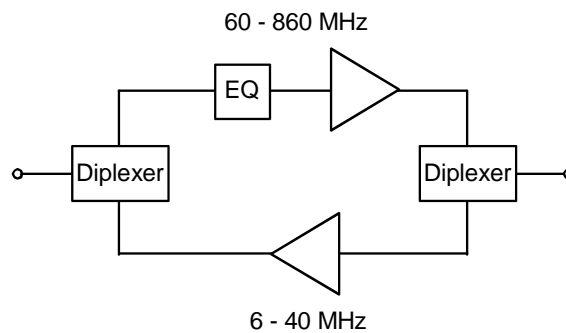
Den större delen av frekvensområdet används till TV-sändningar och Internets nerlänk. Upplänken använder frekvenserna 5 - 65 MHz i Europa. Men de allra lägsta frekvenserna (<15 MHz) är så störda av impulsbrus att de har begränsad användning. Mellan de två banden finns ett skyddsområde för att trafiken i de olika riktningarna ska kunna separeras med filter. Gränserna kan vara lite olika för olika system. På FM-bandet finns det starka signaler som kan störa trafiken i kabeln. Dessutom får frekvensområdet 108 - 136 MHz inte användas i vissa länder. Ett mer praktiskt frekvensområde sträcker sig därför från ca 150 MHz till 450 eller 550 MHz. Vanligtvis används området 550 - 750 MHz till datatrafikens nerlänk. Helst bör hela området upp till 862 MHz utnyttjas, för att så många kunder som möjligt ska få bredband.

De analoga TV-kanalerna har i Europa 8 MHz bandbredd. Nerlänken för digital kommunikation moduleras med 64QAM i kabeln och 256QAM i fibern. Det kan ge en datahastighet på ca 40 Mb/s. Upplänken är mer begränsad eftersom samtliga kundenheter sänder brus till centralenheten. Modulationen blir därför i de flesta fall begränsad till QPSK. Det ger en datahastighet på ca 10 Mb/s i en motsvarande kanal. Men vanligtvis är kanalbredden max 3,2 MHz. Ytterligare en begränsning i datahastigheten är att de tillgängliga kanalerna ska fördelas till samtliga användare med hjälp av tidsmultiplex. Maximala datahastigheten till kunden är idag som för DSL, dvs 24 Mb/s nerlänk och 1 Mb/s upplänk.

Kabelnät



Koaxialkablarna har förluster som måste kompenseras med förstärkare. Dessutom ger uppdelningen i flera signalvägar en effektdelning som också måste kompenseras med förstärkare.



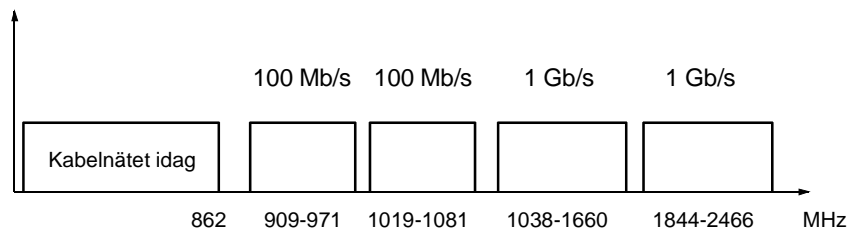
Upplänken behöver också förstärkare, fast åt andra hållet. De mycket låga frekvenserna kan ganska enkelt separeras med filter. Förstärkaren för det stora frekvensområdet upp till 860 MHz kan förses med en equalizer, för att kompensera för nätets frekvensgång.

Nackdel

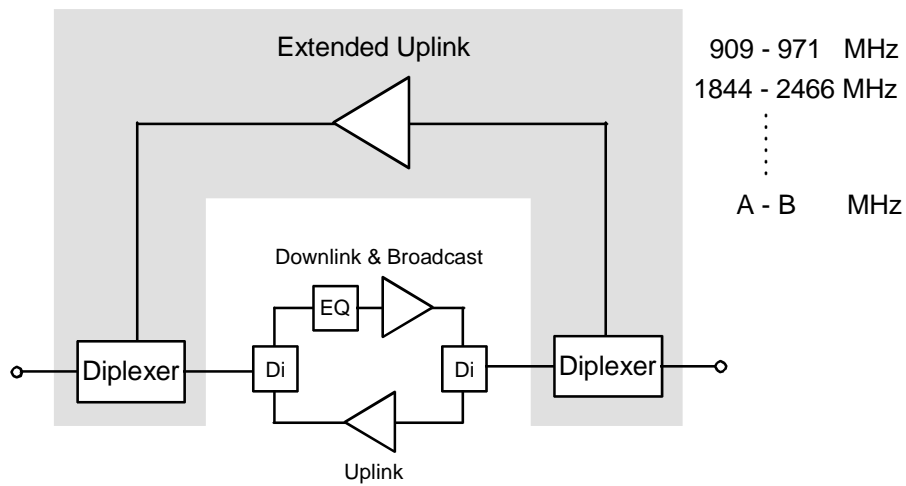
En klar nackdel är den mycket smalbandiga upplänken, som ska fördelas mellan samtliga kunders bredband, ”set-top boxar” och telefoni.

Nästa generation

Jämfört med andra teknologier har HFC en extremt stor bandbredd. Själva koaxialkabeln fungerar bra upp till 3 GHz eller mer. Här finns alltså en mycket stor oanvänd resurs.



Ett förslag är att utöka först med två band som hanterar 100 Mb/s ”Fast Ethernet”, och sen med två band för ”Gigabit Ethernet”. De nya banden ska användas till både upplänk och nerlänk. Det behövs alltså nya förstärkare, med tillhörande diplexer, till de nya returkanalerna.

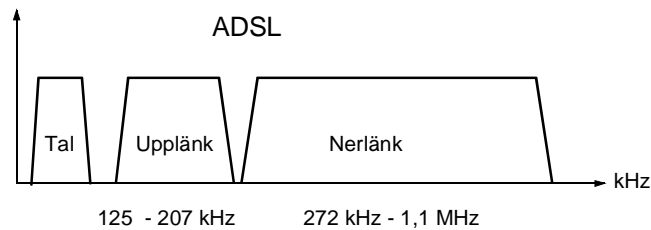


DVB-C

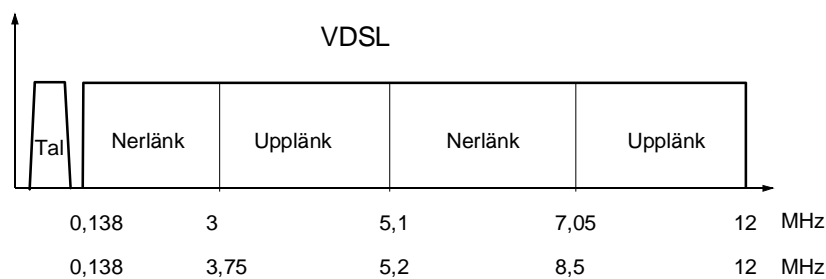
Nästa generation kommer att innehålla digital kabel-TV. När all trafik är digital kan nätet optimeras på ett effektivare sätt. Fördelningspunkterna kan bytas ut mot mer intelligenta enheter med lagring och switchning. Det efterföljande nätet blir då effektivare utnyttjat. Dessutom behöver tidskritiska applikationer som telefoni prioriteras till högre kvalitet (QoS). Eventuellt kan en del distribuerade förstärkare elimineras, men på trunkledningen behövs fortfarande förstärkning åt båda hållen.

3. DSL

DSL (Digital Subscriber Line) är en teknik för digital kommunikation på telefontrådarna. Taltrafiken sträcker sig bara upp till ca 4 kHz, men telefontrådarna kan användas betydligt högre upp i frekvens.



ADSL (Asymmetric DSL) använder frekvenserna 125 kHz till 1,1 MHz. De olika banden separeras med filter. Det gör att samtal och Internet kan köras samtidigt. Systemet kallas asymmetriskt därför att bandet för nerladdning har valts större än för uppladdning. Vissa modem, som har ekoutjämning, kan till och med sträcka sig upp till 2,2 MHz.

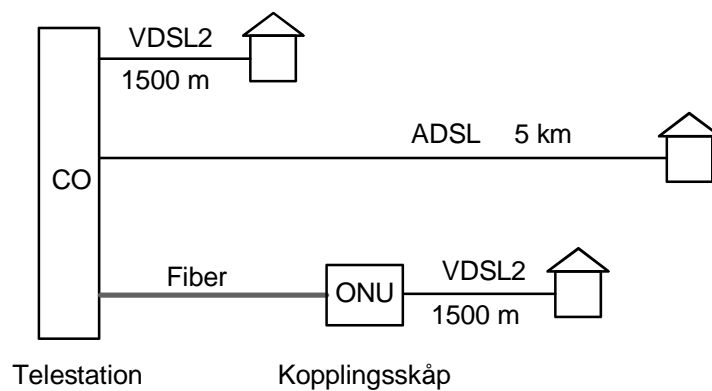


VDSL (Very High Speed DSL) använder frekvensområdet upp till 12 MHz. Det innebär att datahastigheten kan bli betydligt högre än för ADSL. Det finns två olika frekvensplaner beroende på om det ska vara mer symmetriskt eller mer asymmetriskt.

VDSL2 utsträcker frekvensområdet ända till 30 MHz. Det ger betydligt högre datahastighet, om ledningarna inte är för långa.

Datahastigheten beror på hur stor bandbredd som är användbar, och det beror på avståndet till närmaste telestation. Det går att få 50 Mb/s nerladdning på ett avstånd upp till 760 m. Avståndet 1 km ger 30 Mb/s, 2 km ger 15 Mb/s och 3 km 10 Mb/s.

Modulationen är OFDM för att bäst kunna hantera telefontrådarnas besvärliga frekvensgång. Men i den här typen av system kallas den istället DMT (Discrete Multi Tone). VDSL använder 4096 subfrekvenser, som är separerade ca 4 kHz. Det finns också en systemprofil som har subfrekvenserna separerade 8 kHz. De separata subfrekvenserna är modulerade med QPSK eller 64QAM beroende på signalkvaliten på respektive frekvensområde.



De flesta abonnenter befinner sig längre bort från telestationen (CO - Central Office) än vad som är lämpligt för VDSL2. Många operatörer har därför börjat dra optiska fibrer längre ut mot kunderna. En omvandlare till VDSL2 (Optical Network Unit) placeras då i ett kopplingskåp i aktuellt område.

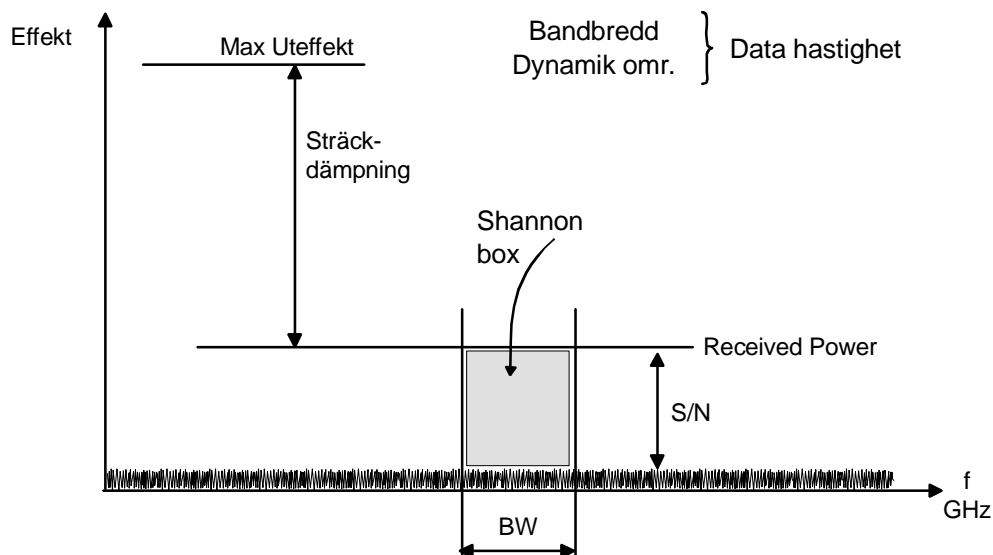
Ett annat sätt att öka datahastigheten är att bonda, eller som det också kallas bundla. Det innebär att man utnyttjar oanvända trådpar, dvs parallell datatrafik, för att få högre datahastighet på långa avstånd. Det kan vara en ledningsdragnings som var överdimensionerad, eller att abonnenter har lämnat den fasta telefonen och gått över till mobiltelefon.

Datahastigheten begränsas inte av en dålig kopparkabel. Det är istället den överhörningen från andra DSL-förbindelser som ger störningar. Kortare kabel ger mindre förluster, dvs signal/stör förhållandet blir bättre så att det går att få högre datahastighet. Med kretsar som undertrycker störningarna kan man få högre datahastighet på längre avstånd.

4. Sammanfattning

Informationspaketets begränsning

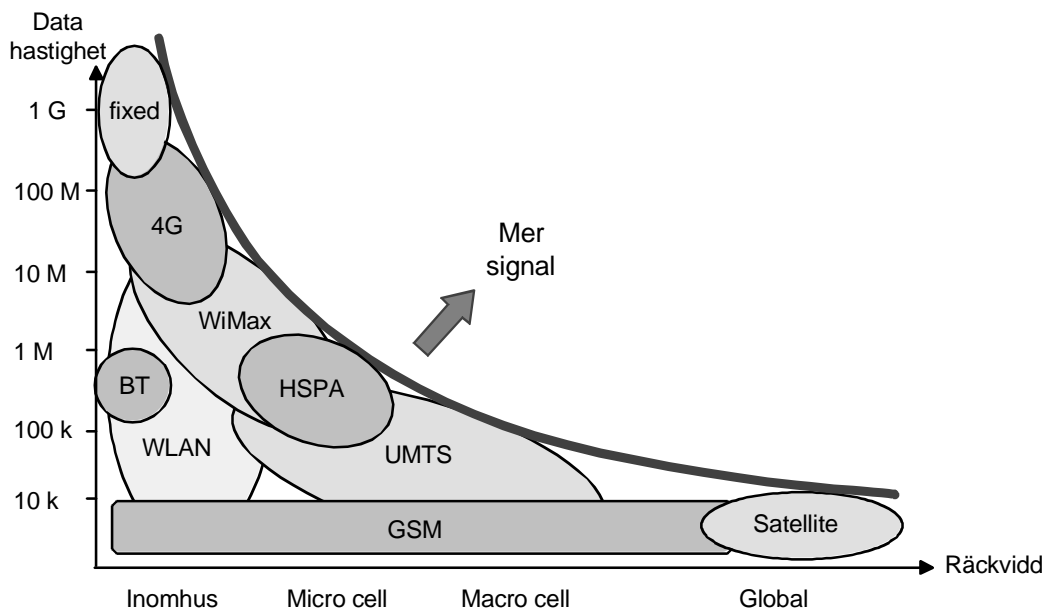
Information överförs genom att en bärvåg moduleras i frekvens och amplitud. Den moduleras i frekvens (fas) så att den utnyttjar den tillgängliga bandbredden. Vill man ha högre datahastighet får man fylla på i amplitud istället. Det är mycket stränga krav på att man inte överskrider sin tilldelade kanalbredd.



Men det går inte att fylla på amplituden hur mycket som helst. Sändaren har en max tillåten uteffekt. Sträckdämpning mellan sändare och mottagare får inte vara större än att hela signalen får plats ovanför bruset. I det område med begränsad bandbredd och amplitudvariation får det plats en viss mängd information enligt Shannon.

Om man vill ha längre räckvidd så blir det mer sträckdämpning. Då blir dynamikområdet ovanför bruset mindre. Det får alltså plats mindre amplitudmodulation (information) och datahastigheten blir lägre.

Konvergens mellan olika tekniker



Olika system har optimerats för olika räckvidd och datahastighet. Inget system är bäst på allt. Utvecklingen går istället mot kundenheter med flera moder. En kundenhet med multimode kommer alltså att förflytta sig fram och tillbaks längs Shannons begränsningslinje.

Den enda möjlighet att passera begränsningslinjen är att tillföra mer signal. Men uteffekten är strängt reglerad. Ett annat alternativ är parallell dataöverföring. En operatörs frekvensband är uppdelat i ett antal frekvenskanaler, som fördelas mellan användarna. Frekvenserna kan i sin tur vara uppdelade i tidsluckor och bandspridningskoder, för att hantera fler samtidigt användare. Det går alltså att få flera parallella överföringar om en viss användare får tillgång till fler frekvenser eller fler tidsluckor eller fler kanalkoder. Ytterligare ett sätt är att förse både sändare och mottagare med dubbla antenner (MIMO). Om det är en mycket reflekterande omgivning, blir sammansättningen i de två antennerna så olika, att de kan användas som parallella kanaler.

Mobiltelefons tekniska utveckling strävar efter bredband. De fasta näten för bredband vill med WLAN och WiMAX uppnå större mobilitet. En trend inom industrin är att de stora företagen för trådlösa nät respektive fasta nät går samman eller köper upp varandra. Det är för att positionera sig inför framtiden, som alltså består av en konvergens mellan fasta och trådlösa nät. Eftersom de olika näten erbjuder samma grundtjänster (trippeltjänsterna), så behöver de olika näten kunna samarbeta så smidigt som möjligt. På så sätt kan kunden få sin tjänst på bästa sätt beroende på situationen.

Trippel tjänster

Trippel tjänsterna är telefon, TV och Internet. Från början var det tre separata teknologier. De olika operatörerna kan nu, med den tekniska utvecklingen, börja leverera alla tre tjänsterna. En förutsättning är att transmissionen har tillräcklig bandbredd, dvs datahastighet.

DSL Internet	Mobil telefon Telefon	HFC TV	DTV-T TV
Telefon TV	Internet TV	Internet Telefon	Retur kanal ?

Gemensamt för leverantörerna av bredband är att datahastigheten, som idag är upp till ca 10 Mb/s ska ökas till 100 Mb/s. Det behövs för att kunna ladda ner filer samtidigt som TV:n är på och vi pratar i telefon med strömmande video. Det är väl inte för att titta på den som pratar, utan för att samtalet blir effektivare när man ser det man pratar om. Företagen behöver en effektiv uppkoppling till de anställda som befinner sig på distans.

Internet blir också allt mer symmetrisk. I början var det tänkt som nerladdning från stora databaser och distribution av underhållning. Nu är det allt mer vanligt att olika företag kopplar ihop sig med sina leverantörer och kunder. Det bildas en att större mängd små servrar. Privatpersoner skapar också eget material som de vill dela ut.

För att inte bli onödig behöver de olika teknologierna kunna ge motsvarande datahastigheter och utnyttjande av sina resurser.

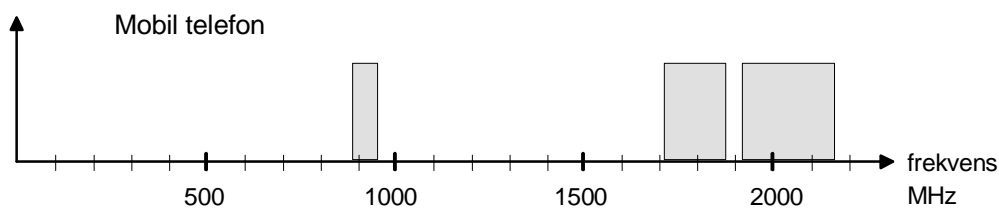
WiMAX

WiMAX är en trådlös access som är under uppbyggnad. I Europa sker uppbyggnaden på 3,5 GHz bandet. Det är ett bra alternativ i de områdena där DSL och HFC inte riktigt når fram (trådlös kabel). WiMAX kan ge en datahastighet på 10-50 Mb/s på 20 km avstånd. VDSL når bara 1 km med den hastigheten. Men WiMAX ska sen dela den transmissionen på flera simultana användare, precis som HFC-operatören.

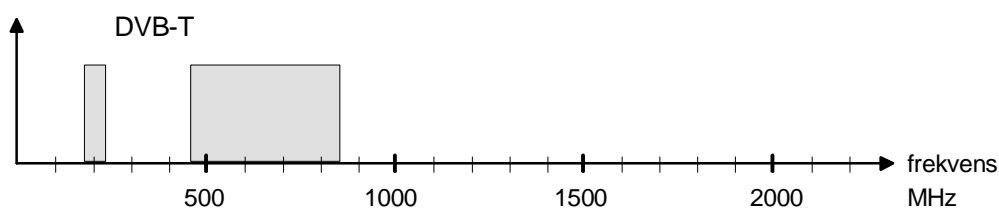
Operatörer för hot-spot kan erbjuda WiMAX till kunder som vill ha nomadisk anslutning av bredband över ett större område. WLAN har mycket kort räckvidd. WiMAX kan användas för att sammankoppla ett stort antal hot-spot eller för att sända direkt till användaren.

Mobiltelefon har också marknadsförts som en applikation. Men det gäller då främst de operatörer som inte redan har mobilfrekvenser med GSM/WCDMA utrustning.

Resursernas utnyttjande

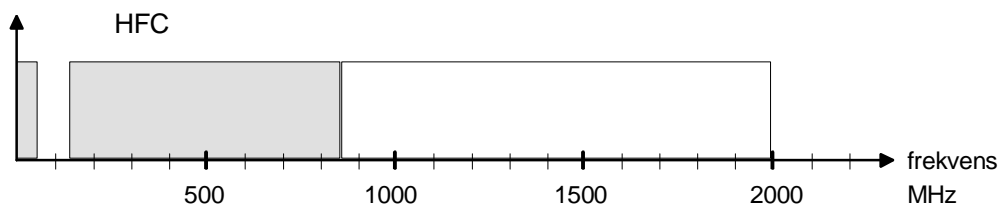


Mobiltelefonen representerar den teknik som haft den största utvecklingen. Den tillgängliga resursen är ganska små frekvensband på mikrovåg. För att få stor kapacitet (samtidiga användare) behövs små celler, så att frekvenserna kan återanvändas på många platser. För att få stor täckning blev det många utspridda basstationer.

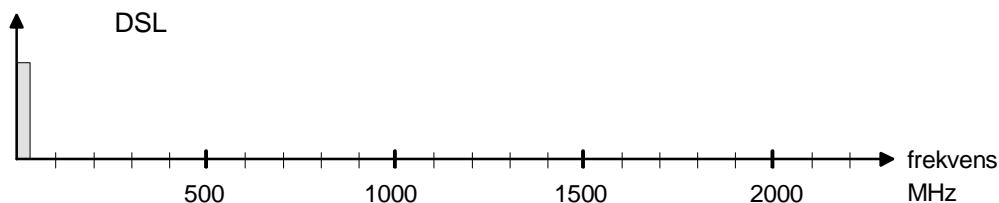


DVB-T operatörerna fick på ett tidigt stadium en mycket stor resurs, större delen av MHz området. Det gamla analoga systemet hade så stora problem med störningar mellan sändarna att frekvenserna fick delas upp till 12 celler innan en frekvens kunde återanvändas. Idag kan frekvenserna återanvändas betydligt effektivare. Dessutom får det plats flera samtidiga program på varje kanal. Och när MPEG4 kompressionen införs får det plats ännu fler. Det är nu dags att fundera över hur frekvenserna bäst ska utnyttjas.

TV behöver en interaktiv returkanal. Problemet är att cellerna är mycket stora. Ett alternativ är en mycket långsam returkanal. Ett annat alternativ är att bygga ut med flera mindre celler. Det blir då ett system som börjar likna WiMAX, fast på MHz området. Frekvenserna kan också fördelas så att stora TV-sändarna fungerar som paraplycell för vissa program, och de små cellerna för att ge hög kapacitet och returkanal. Samtidigt kan de också användas som access till Internet.



HFC operatörerna har ännu mer outnyttjade resurser. Visserligen distribueras det fler TV-program genom kabeln, men det är fortfarande med ineffektiv analog signal. Till att börja med behöver HFC gå över till DVB-C. Det friställer ännu mer resurser. Internet behöver öka datahastigheten till 100 Mb/s för användarna. I praktiken behövs ännu högre hastighet eftersom datahastigheten ska delas mellan alla användare i kabeln. Det största problemet är att upplänken fått en mycket liten del av kabelns bandbredd. Det räckte till interaktivitet och som kontrollkanal, men upplänken för Internet behöver en nästan lika stor bandbredd som nerlänken. Frekvensbanden behöver alltså omorganiseras med nytt frekvensområde för upplänken. Frekvenserna ovanför 700 MHz, upp till en eller ett par GHz, behöver också utnyttjas. I det området har kabeln och de fördelade komponenterna en besvärligare frekvensgång. Man kanske behöver införa OFDM. HFC har dessutom bara en operatör i kabeln. Det har också ansetts som en nackdel, som blivit fördel för DSL.



DSL har gett nytt liv åt telefontrådarna, som många sett som en utdöende teknik. Datahastigheten är hög i närheten av telestationerna, men tyvärr avtar hastigheten dramatiskt med avståndet. Man har därför börjat flytta fram positionerna med fiber fram till kopplingskåp närmare kunderna. Om det är opraktiskt med fiberdragning kan man istället använda WiMAX.

Ett annat sätt är att använda ytterligare ett trådpär, där det finns ett sånt ledigt. Två parallella kanaler ger dubbla hastigheten. En fördel med DSL är att det är en full resurs, inte en delad resurs som HFC. Kunden har alltid sina trådars fulla resurs. Men de flesta använder inte DSL, och de som har DSL använder den bara ibland. Det är alltså en mycket dåligt utnyttjad resurs, endast 10-20 % av teleledningarna används till DSL. Genom att parallellkoppla samtliga trådpars datakanaler får DSL användarna högre datahastighet trots att den är delad.

Den största begränsningen av datahastigheten är överhörningen mellan olika trådpär. Med interferensundertryckning eller MIMO kan datahastigheten ökas markant.

Nya kombinationer

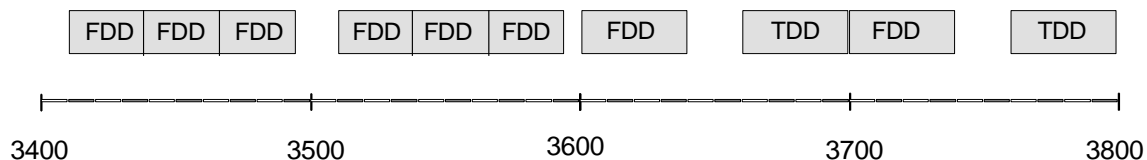
Konvergeringen mellan de olika teknikerna till kommunikation innebär mer än trippeltjänsterna. Mobiltelefon, DSL, HFC och DVB-T kombineras för att ge den lämpligaste överföringen för varje tillfälle. De kombineras också för att ge support till varandra. Mobilsystemet kan få transmission (backhaul) via HFC. Femtobasar kan anslutas via DSL. DVB-T kan integreras med de andra systemen istället för att bygga en egen returkanal. WiMAX på 3,5 GHz kan fungera som ett eget nät för BWA eller så kan det användas som en trådlös kabel för att förlänga DSL och HFC. WiMAX kan också användas för att koppla ihop basstationerna för mobiltelefon.

En möjlig utveckling är att kundenheter och mobiltelefoner förses med möjligheten till multihopp. De skickar då kommunikationen vidare, för att nå dolda områden.

Ett personligt mininät med elektroniska apparater kan via mobiltelefon kopplas till en applikation på Internet. Det kan till exempel vara apparater för meddelanden, klocka, penna, kamera eller en enhet för spel. Mobiltelefonen kommer då att ha funktionen som en router eller accessnode. Mininätet kan då ha kontakt med Internet trots att det rör sig snabbt i bil eller tåg.

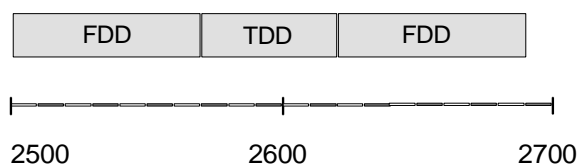
DVB-T ger ett effektivt utnyttjande av frekvenserna. Med MPEG4 kan kanalerna staplas ännu tätare. Det blir då frekvensområden lediga för andra applikationer. Bandet vid 700 MHz är mycket attraktivt för mobiltelefon och trådlösa bredbandstjänster. På grund av vågutbredningens lägre dämpning blir det längre räckvidd och bättre inomhustäckning än de tilldelade högre frekvenserna.

Nya frekvenser



3,4 - 3,6 GHz är avsett för fast eller nomadisk BWA, men det går att få tillstånd att använda systemet för mobilt bruk också. I Europa ska bandet använda FDD med 100 MHz duplexavstånd. Upplänken är 3410 - 3494 och nerlänken 3510 - 3594 MHz, med 28 MHz band.

3,6 - 3,8 GHz ska vara teknikneutralt och tjänsteneutralt. Istället för en gemensam standard ska det finnas regler för samexistens, t.ex. att effekttätheten för vara högst 122 dBW/MHz/m² vid gränsen mellan två skilda områden. Men operatörerna kan få välja andra regler under förutsättning att de kommer överens. Två frekvensområden är avsedda för TDD, och två områden ska använda FDD med 100 MHz duplexavstånd. TDD har fått 20 MHz band vid 3660 - 3700 och 3760 - 3800 MHz. FDD-banderna på 17,5 MHz har upplänk 3600 - 3640 och nerlänk 3700 - 3740 MHz.

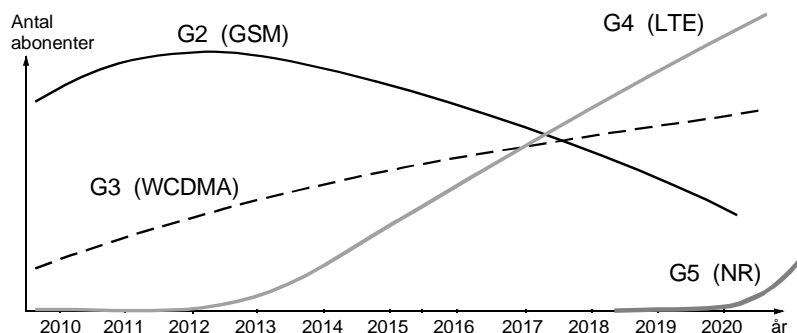


2,5 - 2,69 GHz innehåller också områden för både TDD och FDD. Upplänk för FDD på 2500 - 2570 och nerlänk på 2620 - 2690 MHz, med 5 MHz band. Området för TDD är 2570 - 2620 MHz.

Femte Generationen

1. Olika generationer

4G har under åren förbättrats väsentligt, men nu är det dags för en större förändring för att klara mer krävande applikationer. 5G använder också OFDM men med större flexibilitet. Dessutom kommer överföring att kunna ske på mm-våg med mycket hög datahastighet. 4G kommer fortfarande att finnas kvar parallellt med 5G. Även om den snabba datatrafiken går på mm-våg så sker signalleringen genom 4G.



GSM var en standard som utvecklades gemensamt av flera länder och företag. Målsättningen var att enheter från olika företag ska kunna fungera tillsammans i ett system. Det var så framgångsrikt att efterföljande generationer också har utarbetats som världsstandarder. Men GSM har redan börjat stängas ner för att ge plats för de effektivare systemen.

När G2 byggdes gällde det att i första hand få så stor täckning som möjligt. Men mobiltelefon blev så uppskattad att det behövdes mer kapacitet. Då gjordes cellerna allt mindre, så att frekvenserna kunde återanvändas oftare. GSM använder FDD för att separera sändning och mottagning med filter. De stora cellerna behövde ju höga uteffekter och mottagarna behövde lågbrusiga förstärkare. Nu har cellerna blivit så små i tätorter att det går att använda TDD som switchar mellan sändning och mottagning. Det ger andra fördelar, speciellt när det gäller smarta antenner. G4 och G5 är specificerade för att använda både FDD och TDD.

2. Applikationer

Mobilsystemen har haft en utveckling mot allt högre prestanda för att klara fler digitala applikationer.

1G	Analog	1980	Ej standard
2G	GSM	1991	Samtal och SMS. Nedstängning av nät har börjat
3G	WCDMA	2001	Samtal och surfning på internet
4G	LTE	2009	Paket-switchade samtal (VoIP) och bredbandig internet
5G	NR	2019	Snabbare nät och stor kapacitet för uppkopplade saker

Det finns tre olika slags applikationer, som ställer olika krav på systemet.

Stor bandbredd (eMBB – enhanced mobile broadband)

Har bandbredder som klarar från 100 Mb/s upp till 20 Gb/s. Med de datahastigheterna kan man överföra HD-video, virtual reality (VR) och förstärkt verklighet (augmented reality). Vid förstärkt verklighet blandas den direktsända videon med datorgenererad information, till exempel ljud, bild, video eller text. Dessutom ska 5G fungera under transporter på upp till 500 km/tim.

Hög tillförlitlighet och låga fördröjningar (URLLC – ultra reliable and low latency communication)

Applikationer där maskiner ska fjärrstyras behöver extra hög tillförlitlighet och snabb respons. Det kan vara robotar i industrin eller i gruvor, eller självkörande bilar.

Massvis med uppkopplade saker (mMTC – massive machine-type communication)

Miljontals saker per km² kommer att bli anslutna till 5G för att göra enkla mätningar eller styrningar. Det kan vara privata saker som cyklar och smarta hem. Städer kan effektiviseras som smarta städer. Industrin har alltid behov av effektivisering. De uppkopplade sakerna behöver överföra mycket små datamängder, dessutom rör de sig inte så mycket och de är inte så tidskritiska. Konceptet har utvecklats under 5G standarden, men i praktiken kommer uppkopplingen att gå genom 4G.

3. Frekvensband

Tre olika frekvensområden kommer att användas till 5G.

3,4 – 3,8 GHz Mobil-bandens förlängning uppåt

700 eller 600 MHz TV-frekvenser som blivit lediga.

26,5 – 27,5 GHz På mm-våg kan man använda mycket stora bandbredder.

Frekvensgränserna kan variera lite för olika länder, men i princip har vi tre frekvensband för tre olika användningsområden. Det första frekvensbandet som byggs ut är 3,4-3,8 GHz för att få högre datahastighet och ytterligare kapacitet. Hela området 1-6 GHz ger bra kombination av täckning och kapacitet. Frekvenserna vid 700 MHz (600 MHz i Amerika) ger längre räckvidd och tar sig lättare in i byggnader, men har mindre bandbredd. De är därför speciellt lämpade för uppkopplade saker (IoT). 700 MHz bandet är också bra för att få täckning på landsbygden. 26 GHz bandet kan ge datahastigheter på över 10 Gb/s men med kort räckvidd. Det finns även fler lediga band på mm-våg som kan användas till mobil kommunikation.

4G använder sammanslagning av frekvenser (CA – carrier aggregation) för att få större bandbredd till en enskild användare. Med 2, 4 eller 8 frekvenser kan det bli ganska hög datahastighet på nerladdningen. 4G har även specifikationer för 2 frekvenser på upplänken.

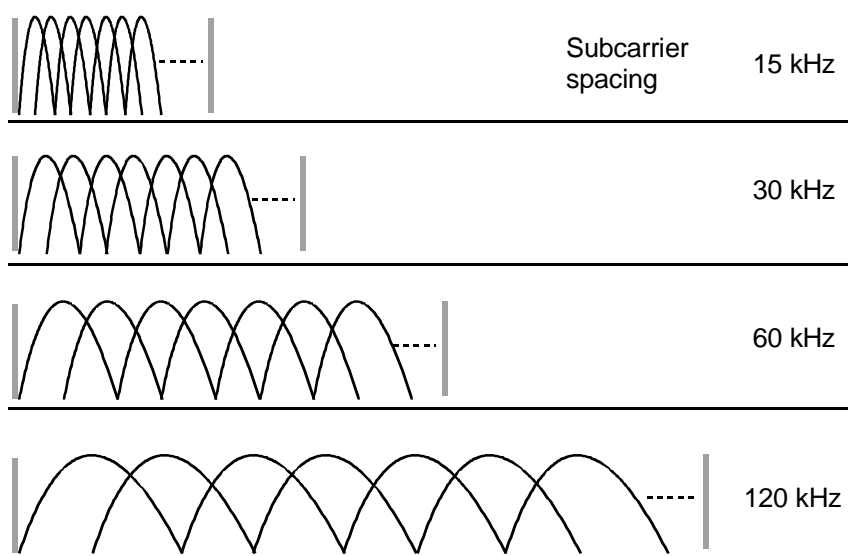
5G kan naturligtvis också använda sammanslagningar (CA). Men 5G kan också använda kompletterande frekvenser på lägre band till upplänk (SUL – supplementary uplink). När den mobila enhetens uteffekt på 3,5 GHz inte räcker fram till basstationen, kan istället sändning på ett lägre frekvensband ge tillräcklig räckvidd. Både CA och SUL kan ske på FDD-band trots att 5G använder TDD.

Dual-Connectivity (DC) innebär att användaren är ansluten till båda systemen samtidigt. Beroende på omständigheterna väljer systemet den väg som är lämpligast. Signalering och positionering kan ske på 4G och dataöverföring på 5G.

EN-DC (E-UTRA New Radio Dual Connectivity)

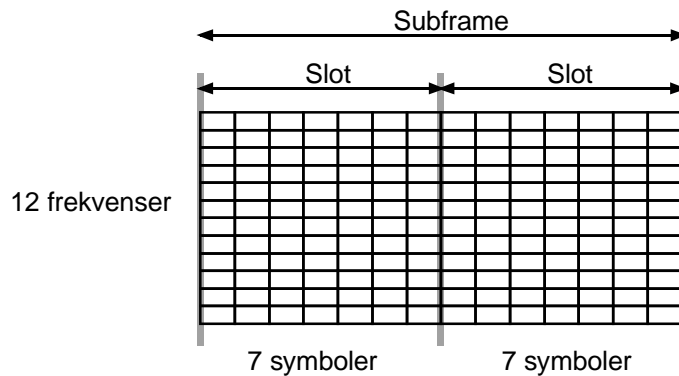
4. Modulation

Gränssnittet mot luft som utvecklats för 5G kallas NR (New Radio) och är i viss mån likt 4G. 5G kan använda OFDMA till både nerlänk och upplänk. Alternativt kan SC-FDMA användas till upplänken. Varje subfrekvens är, precis som för 4G, modulerad med QPSK, 16QAM eller 64QAM. Men om signalnivån tillåter så kan 5G till och med använda 256QAM.

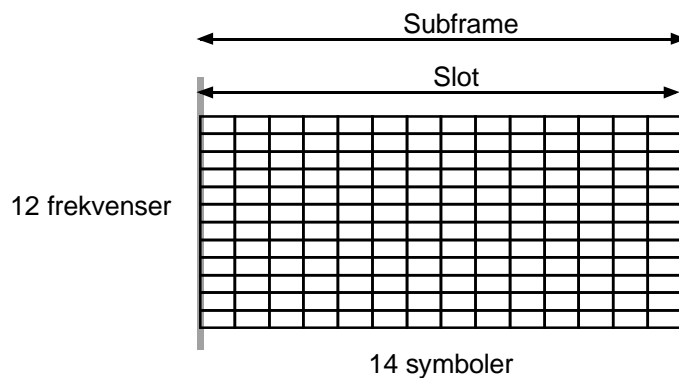


5G har möjlighet att välja olika avstånd mellan subfrekvenserna. 15 kHz som används av 4G minimerar skyddsområdet i tid (Cyclic Prefix). Det är bra med 15 kHz på mobilbanden lägre än 3 GHz om man vill ha stor täckning. Men ju högre frekvensband desto större problem får man med fasbrus. Så på mm-våg väljer man istället det största avståndet 120 kHz. 30 kHz och 60 kHz är lämpligt för mindre celler i städer, då man behöver snabb åtkomsttid (latency) och större bandbredd.

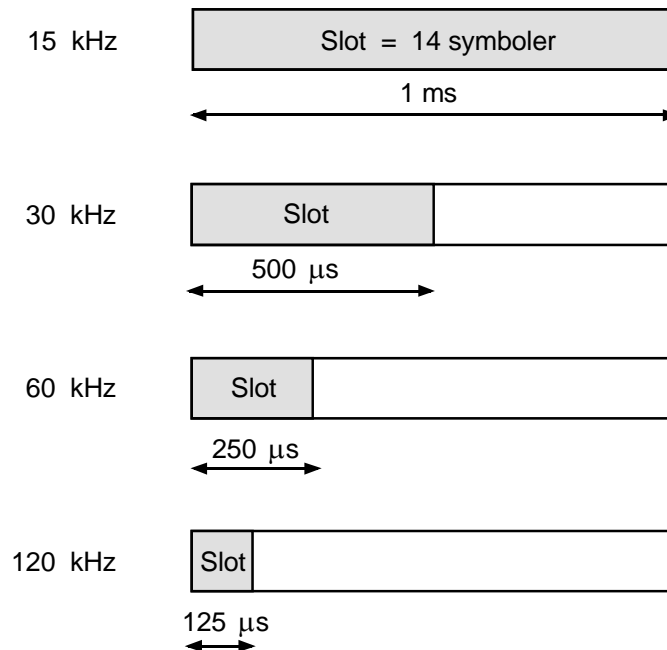
5. OFDM signalens uppdelning



4G har resurs-block (PRB physical resource block) som består av 12 subfrekvenser och 7 symboler. Längden på PRB kallas en slot. En subframe består av två slot.



5G har resurs-block som är 14 symboler långa och 12 subfrekvenser breda. När 5G har samma avstånd mellan subfrekvenserna, dvs 15 kHz, så fyller alltså en slot helt upp en subframe. Om 5G väljer 30 kHz avstånd mellan subfrekvenserna, så finns det plats för dubbelt så stor bandbredd. Det behövs då bara hälften så lång slot för att överföra samma resurs.



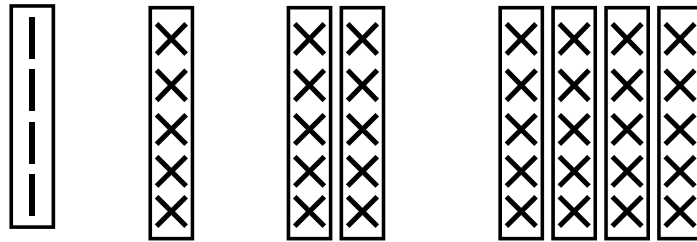
5G kan välja 15, 30, 60 eller 120 kHz. Det ger då motsvarande allt kortare slot med 14 symboler.

Hög tillförlitlighet och snabb åtkomst

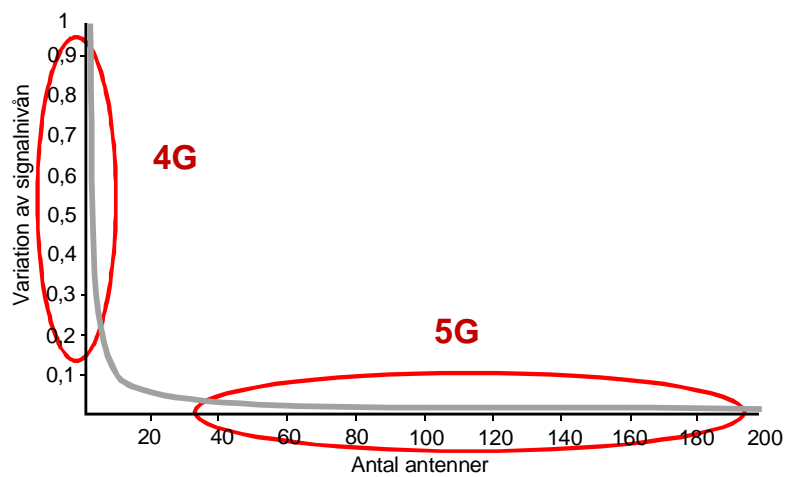
För att få snabb åtkomst ska man välja en kort Slot, dvs en med stort avstånd mellan subfrekvenserna. Det finns också en viss möjlighet att använda en Mini-Slot, som bara innehåller 2, 4 eller 7 OFDM-symboler. Ett annat sätt att bättra på tillförlitlighet och snabbhet är att 5G kan dela upp hela transportblocket (TB) i ett antal små grupper (TBG). När ett fel uppstår räcker det då att återsända endast en liten grupp. Användare kan samtidigt vara uppkopplad via flera olika länkar. För URLLC är det bäst att bara sända informationen i en oberoende kanal under en Slot.

5G behöver alltså optimeras på olika sätt, med målsättningen att komma ner till 1ms åtkomsttid (latency) samt hög tillförlitlighet.

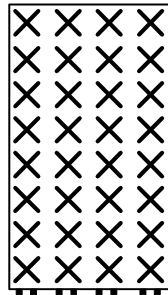
6. Massive MIMO



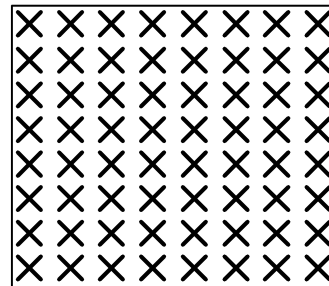
Antennerna bestog från början av vertikalt monterade dipoler. Problemet var att en multipelreflektion och en direkt signal kunde vara lika stora och i motfas. Signalerna tog ut varandra och gav ett djupt dipp i transmissionen. Med två korspolariserade dipoler var det inte sannolikt att båda skulle vara utfasade samtidigt. Det blev ett mindre dipp. Med två korspolariserade kolumner får man ytterligare diversitet så att dippet blir ännu mindre. Ju fler antenner desto mindre blir dippet.



4G använder sig av antenner med ett fåtal kolumner. 5G kan använda massiva antenner med ett stort antal antennelement. Det resulterar i att 5G kan slippa de snabba variationerna i vågutbredningen då mobilerna rör sig.



4G 2 eller 4 kolumner
MIMO
 $D > 1,5 \lambda$

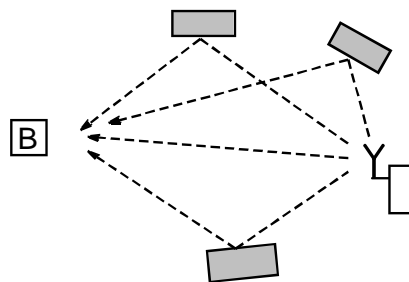


5G 64 antenner
Massiv MIMO
 $D > 0,5 \lambda$

4G använder flera kolumner för att i närområdet få parallella kanaler, på samma frekvens, med hjälp av MIMO. Vid kommunikation på långa avstånd (vid cellkanten) används kolumnerna till diversitet. Kolumnerna behöver vara åtskilda minst $1,5 \lambda$ för att de ska uppleva olika vågutbredning. Massiv MIMO är en sammansättning av ett mycket stort antal antennelement, som alltså ger en smal antennlob. Genom att justera fasen på respektive antennelement kan man styra antennloben i lämplig riktning. En fasstyrd antenn ska ha ett avstånd på $0,5 \lambda$ för att få bästa styrning.

Massiv-MIMO är en fasstyrd antenn som kan rikta antennloben åt olika håll. Samma frekvens kan alltså användas samtidigt till två separata mobiler i olika riktningar (SDMA – Space Division Multiple Access).

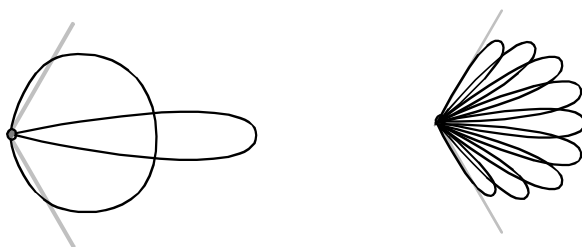
När mobilen sänder så mäter basstationen fasen på de olika antennelementen. Vid TDD sker sändning och mottagning på samma frekvens. Det betyder att sändaren ska göra motsvarande faskorrektion på respektive element vid sändning, för att signalerna ska sammansättas i fas framme vid mobilen.



När mobilen sänder, och det finns multipelreflektioner, blir det en viss sammansättning framme vid basstationens antennelement. Men det gäller fortfarande att de faslägen man mäter upp ska man också använda vid sändning. Det är alltså in meningen att skapa en snygg lob från sändaren, det handlar istället om att skapa en snygg sammansättning framme vid mobilen.

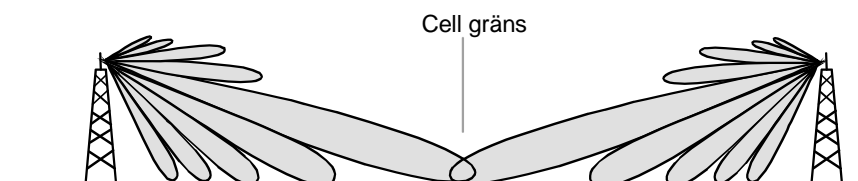
Högre gain och smalare lob

Jämfört med en sektorantenn med en kolumn, så har en antenn med 8 kolumner teoretiskt 9 dB högre gain. Den högre effekten får inte gå in i granncellen och störa.

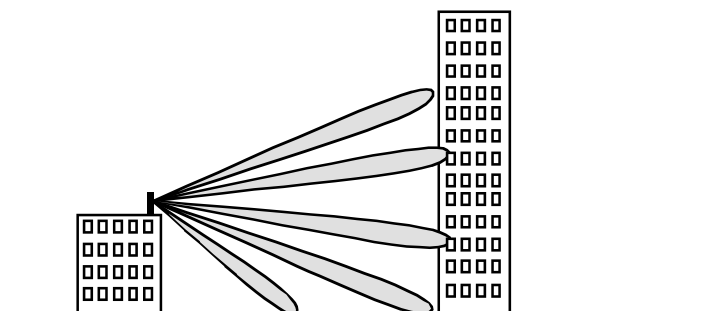


Först måste alltså uteffekten minskas så att loben håller sig inom egna cellen. Sen ska den effekten fördelas till respektive antennelement. Med 64 antennelement blir det ganska låg effekt per slutsteg. Det är en väsentlig skillnad mellan ett linjärt slutsteg på 20 W och ett på låg effekt.

Vertikal styrning

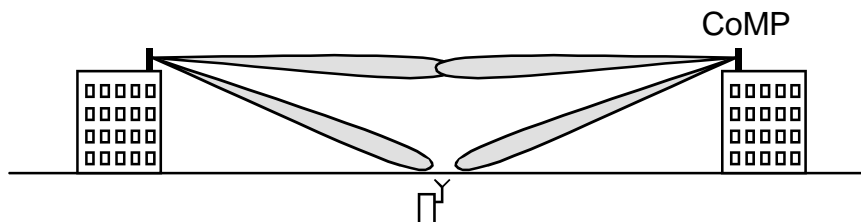


Basstationer har normalt lober som pekar lite neråt för minska störningen i intilliggande celler. En viss del av effekten fördelas till de undre sidloberna för att ge god täckning inom den önskade cellen.



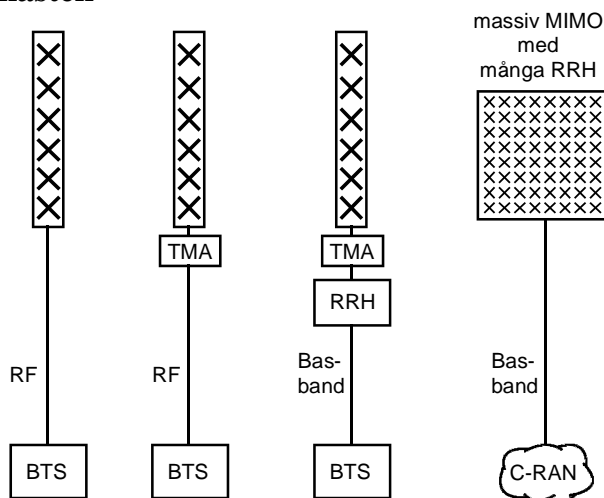
5G i områden med höghus kan med fördel använda massiv-MIMO för att styra loben vertikalt. Med riktad lob kan man få bra täckning högt upp i höghusen. Loben styrs alltså både horisontellt och vertikalt för att få kommunikation med önskad mobil.

Integration av access/backhaul



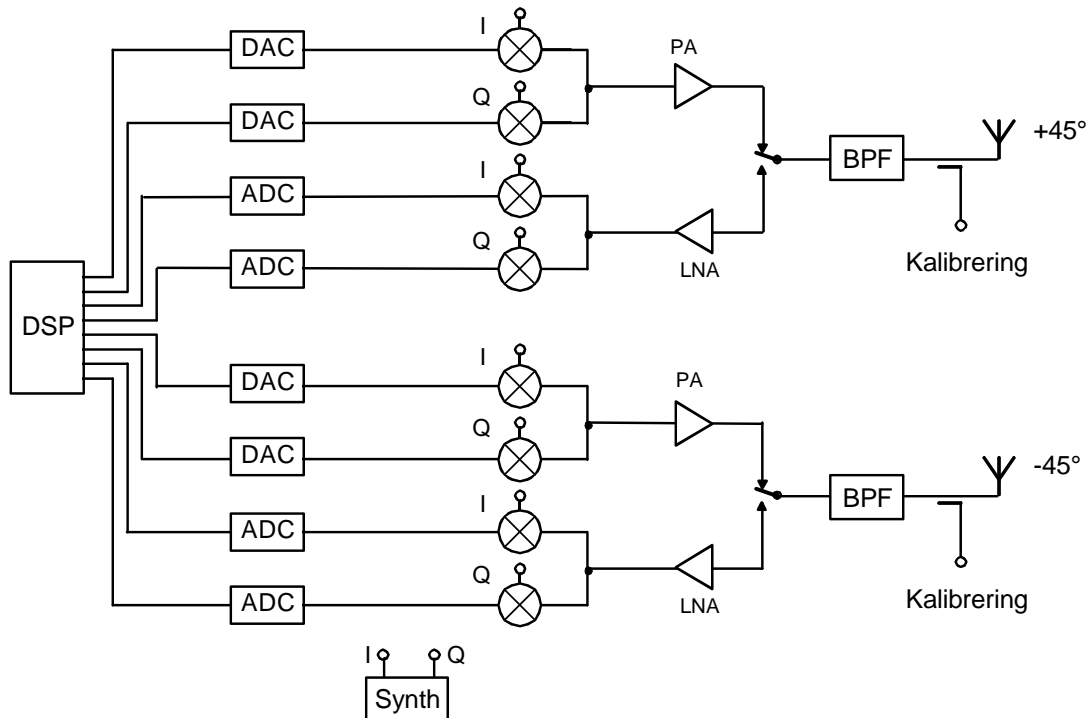
Basstationen använder mobilbanden för att trådlöst kommunicera med mobilerna. Det kallas access. Kommunikationen med stamnätet kan gå på fiber eller radiolänk och kallas backhaul. Med 5G kan samma teknik och samma frekvens som används till access, också användas för att koppla ihop basstationer dvs backhaul. På så sätt får mobilerna på cellkanten bättre täckning genom att kommunicera genom två olika vägar. Det kallas CoMP (Coordinated Multi Point).

Elektronik i masten



Ursprungligen satt all elektronik inomhus. Det var för besvärligt med reparation då elektroniken satt uppe i masten. Men på 90-talet var tekniken så tillförlitlig att en TMA kunde placeras intill antennen. Den innehåller filter och förstärkare med lågt brus, så att täckningen för upp-länken blir lika stor som för nerlänken. När tekniken för effektförstärkare blev mogen, kunde all elektronik flyttas upp i masten. Det blev lite större lådor som inte fick plats vid antennerna utan en bit längre ner på masten. Men en stor del av förlusterna i koaxialkabeln slapp man. 5G som kan använda massiv-MIMO får en helt annan uppbyggnad. Hårdvara och mjukvara har helt separerats. Mjukvaran kan placeras i ett moln (Cloud Radio Access Network). Varje element i antennen kan förses med både sändare och mottagare.

Blockschema för antennenheten

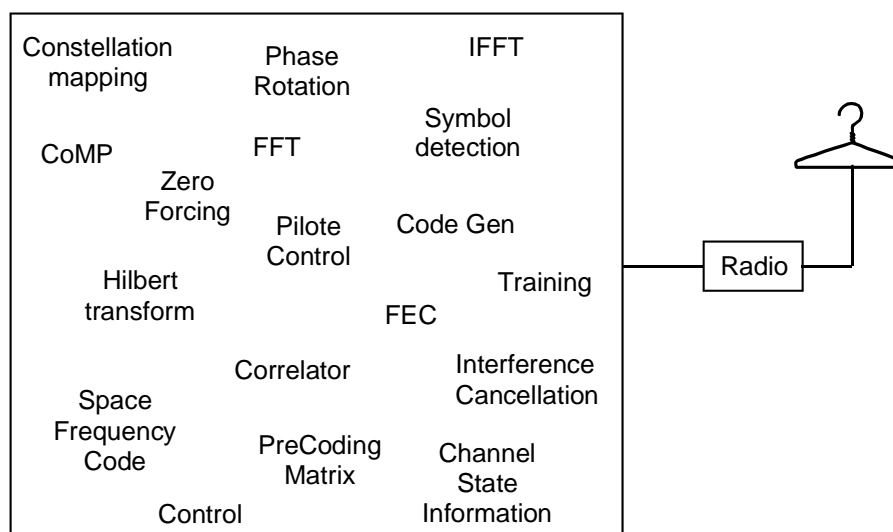


Bakom varje korspolariserade antennelement sitter en sändare och en mottagare för respektive polarisation. Själva antennerna består vanligtvis av en patch eller korsade dipoler. Filter är fortfarande lika viktigt eftersom störsignaler försämrar prestanda.

Massiv-MIMO använder med fördel TDD. Cellerna i storstäderna är ganska små, och effekten fördelas till många slutsteg. Det behövs då inget filter för att separera sändning och mottagning, det räcker med en switch.

Modulation och demodulation sker direkt mellan RF och Basband med hjälp av IQ-mixer. Till det behövs naturligtvis en synth på rätt frekvensband. RF-kretsarna är analoga men systemets övriga signalbehandling är digital. Mellan RF-kretsarna och övriga systemet sitter A/D och D/A omvandlarna, som placeras i antennenheten.

I mottagaren, bakom varje antennelement, mäts signalens fas för en känd testsekvens. Eftersom man sänder på samma frekvens (TDD) så ska alltså sändaren justeras till motsvarande fasläge. Det ger då maximal signal till just den mobilen. Andra mobiler i andra riktningar får andra inställningar. Men kretsarna i sändarkanalerna och mottagarkanalerna kan ha olika faszgång. Därför behöver kanalerna kalibreras genom en extra kalibreringsport.



Den som arbetar med de digitala processerna har en helt annan världsbild. Ett mobilsystem består av en massa transformatorer och algoritmer, kontrollkretsar och styrningar, koder och databaser. All intelligens ligger i mjukvaran. Till den trådlösa överföringen behövs sen en radio och en antenn, som kan vara ganska enkel och banal.

7. Mobil access på mm-våg

Med mm-våg menas de våglängder som mäts i millimeter. Det motsvarar frekvenser högre än 26 GHz. Det första mobilbandet ligger på 26,5 - 27,5 GHz. Men forskningen inom mobil access fortsätter på allt högre frekvenser.

På mm-våg blir alla komponenter betydligt mindre, och de blir svårare att tillverka. Det behövs nya tekniska kretslösningar. Men även antensystemen, som är besvärligt stora på de lägre mobilbanden, blir små och smidiga på mm-våg.

Den största fördelen med mm-våg är att man kan använda mycket stora bandbredder, flera GHz. Det kan ge en extremt hög datahastighet, över 10 Gb/s.

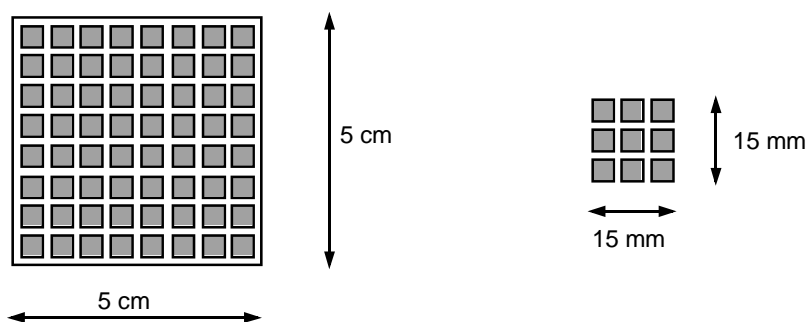
Nackdelen är att det blir en kort räckvidd. Högre frekvens betyder mindre dimensioner på transistorerna. Det ger lägre överslagsspänning, dvs lägre uteffekt. Dessutom har vågutbredningen högre dämpning. Ett regnväder kan ge totalt 1-2 dB på 3,5 GHz men på 28 GHz blir dämpningen 10-30 dB/km. Men små celler, med en räckvidd på 200 m, ger bara ett par dB extra dämpning.

På låga frekvenser går det att få förbindelse trots att det är skymd sikt. Men på mm-våg är diffraktionen svag. Då signalvägen blockeras behöver man istället utnyttja reflektioner och uppkoppling till fler basstationer.

På 1800 MHz dämpas signalen ca 15 dB när den tränger in i en byggnad. På 28 GHz är dämpningen 20-40 dB. Det är alltså inte rimligt att få täckning inomhus från en basstation utomhus.

Antenn på mm-våg

På mm-våg behövs en antenn med hög antennförstärkning (gain). Det ger en smal lob som snabbt måste kunna riktas in mot mobilen. Det behövs alltså fasstyrning och målföljning. Dessutom behövs parallella kanaler att hoppa mellan för att klara skuggning och reflektioner. 5G på banden lägre än 6 GHz ska klara många mobiler samtidigt. De ska alltså klara SDMA (space division multiple access). Men i de små cellerna på mm-våg är det bara ett fåtal mobiler som samtidigt kräver extremt stor bandbredd. Det behövs då inte digital fasstyrning på basbandet, det räcker med analoga fasskiftare på RF.



På 30 GHz är våglängden 10 mm. En 8x8 array blir då ca 5 cm i fyrkant. Det är alltså mycket små enheter som ska placeras ut några meter över gatunivån eller inomhus i gallerior och mässhallar.

En mindre array blir så liten att den till och med kan få plats i en handapparat, för att ge en viss styrning mot basstationen.

Med smala lobar blir det förstås svårare för mobil och basstation att hitta varandra. Men 5G kommer att ha ett nära samarbete med 4G. Signalleringen sker på 4G och den stora datamängden överförs av 5G på mm-våg.