



Teknisk Utveckling

**Examensarbete vid
Kunglig Tekniska Högskolan**

Mikrovågslänkar för programinsamling

**Sveriges Radio Teknisk Utveckling
Stockholm 2005**

Urban Eriksson

Handledare SR: Lars Jonsson
Handledare Examinator KTH: Jens Zander

Sammanfattning

Inom Sveriges Radio används sedan många år tillbaka digitala system för att överföra ljud från mikrofonen hem till lyssnaren. Hela länkkedjan är dock inte digital idag, men arbetet med att förbättra kontributionen och distributionen pågår ständigt. Som ett resultat av detta arbete kommer Sveriges Radio digitalisera de system som används för att överföra ljudet från en reporter utanför radiohuset, så kallad OB-sändning (Outside Broadcasting). Idag används analoga FM-länkar i simplex mellan reporterfordonet och mottagarstationen i t.ex. en högmast. I framtiden vill Sveriges Radio ha en dubbelriktad dataförbindelse på minst 2 Mbit/s som kan överföra både linjära ljud och DTS surround i 5.1 format från bil till radiohuset. Det är hur och om denna förbindelse är möjlig att etablera som behandlas i examensarbetet. Svårigheten med att digitalisera en mobil länk av den här typen är att sändningen inte sker mellan två fasta punkter, utan ändras från dag till dag. Länken skall kunna hantera data med hög driftsäkerhet trots att det inte råder fri sikt mellan sändare och mottagarantennerna och täcka ett geografiskt område som motsvarar dagens analoga nät. Av ekonomiska skäl finns det begränsningar i hur många terminalmottagare som kan sättas upp och bekostas av Sveriges Radio. I examensarbetet har vi därför att ta ställning till vilken typ av digital kommunikation som är lämplig för ändamålet och om det idag finns sådan utrustning som kan uppfylla dessa krav.

För att undersöka vilket system som lämpar sig bäst har vi analyserat vilken typ av modulation, frekvens, effekt och antennkonstruktion som lämpar sig bäst för ändamålet. Detta har gjorts genom teoretiska beräkningar, simuleringar, bänktester och praktiska prov i ett testområde i Norrköping.

Resultatet av arbetet visar att det nuvarande analoga HF-systemet har mycket bra täckningsegenskaper. Ett digitalt system har svårt att matcha täckningen i ytterkanterna av ett sändningsområde men kan med rätt teknik erbjuda förbättrade egenskaper inom ett näst intill lika stort område. Det faktum att Sveriges Radio skall kunna sända från platser som inte har fri sikt till mottagaren gör att det är nödvändigt att använda en robust modulation. Tester visar att känsligheten för t.ex. flervägsutbredning ökar markant vid ökat antal modulationsnivåer. QPSK och 16 QAM är de modulationsmetoder som visar sig fungera bäst vid svåra förhållanden, där QPSK är den mest robusta. Den kräver tyvärr nästa dubbelt så mycket bandbredd som 16 QAM varför valet till stor del beror på frekvenstilldelning i framtiden. Effektmässig går det att med precisionsparkering alternativt diversitet att använda i princip samma uteffekt som det analoga systemet. Men p.g.a. höga linjaritetskrav går det inte att använda befintliga slutsteg. Däremot visar tester att det går att använda befintliga antensystem om frekvenstillstånd erhålls i 400 MHz bandet.

Arbetet i examensarbetet visar även att det går utmärkt att använda digital utrustning för att sända flerkanalsljud mobilt. Med Layer II kodning kan även stereo sändas från avlägsna platser och med relativt liten bandbredd, 250 kHz. Tyvärr finns det idag ingen befintlig utrustning som klarar alla de krav som ett system bör ha för att vara en ersättare av dagens analoga system.



Abstract

Förord

Examensarbetet har utförts på Sveriges Radio Teknisk Utveckling och är ett första steg för ett eventuellt framtida digitalt HF system. Jag vill rikta ett stort tack till min handledare på Sveriges Radio Lars Jonsson som bidragit med stor kunskap inom HF området samt idéer och handgriplig hjälp vid de praktiska proven. Jag vill även rikta ett stort tack till Jens Zander, professor på KTH, som varit min handledare och examinator. Tack även till Ola Kejving, Bertil Svensson och Nils Olofsson som ingår i referensgruppen för HF teknik inom Sveriges Radio. Ett tack även till PG Stenman och Lennart Elfgren på Sveriges Radio Östergötland som bistod med hjälp i Östergötland. Till sist ett tack till Jonas Jolhammar som parallellt med detta examensarbete arbetat med ett länksystem mellan terminal och radiohuset men som även varit mig behjälplig i arbetet.

Urban Eriksson

Stockholm april 2005

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|---------------------------------------------|----|
| 1 | Inledning | 7 |
| 1.1 | Bakgrund..... | 7 |
| 1.2 | Problemdefinition | 8 |
| 1.3 | Allmänna krav på förbindelser..... | 8 |
| 1.4 | Tekniska krav..... | 8 |
| | Avgränsningar..... | 10 |
| 1.5 | Tidigare arbeten och erfarenheter | 10 |
| 2 | Analoga system..... | 12 |
| 2.1 | Allmänt | 12 |
| 2.2 | Sveriges Radios befintliga utrustning | 12 |
| 2.2.1 | Sändare..... | 12 |
| 2.2.2 | Sändarantenn..... | 12 |
| 2.2.3 | Mottagarantenn | 13 |
| 2.2.4 | Mottagare | 13 |
| 2.2.5 | Kontributionen | 15 |
| 2.3 | Beräkning av täckning | 15 |
| 2.3.1 | Frekvensegenskaper..... | 15 |
| 2.3.2 | Påverkan av ytvåg..... | 17 |
| 2.3.3 | Fri rymddämpning | 17 |
| 2.3.4 | Simulering av täckning | 18 |
| 2.3.5 | Fädningsmarginal..... | 20 |
| 2.3.6 | Praktiska erfarenheter | 20 |
| 3 | Digitala system..... | 21 |
| 3.1 | Översikt digitala sändningsteknologier..... | 21 |
| 3.1.1 | Mikrolänk med fast frekvens och bärvåg..... | 21 |
| 3.1.2 | FDMA | 21 |
| 3.1.3 | TDMA..... | 21 |
| 3.1.4 | FH-system..... | 22 |
| 3.1.5 | OFDM..... | 22 |
| 3.1.6 | WiFi | 22 |
| 3.1.7 | Polling protokoll | 23 |
| 3.2 | Modulation..... | 23 |
| 3.2.1 | PAM..... | 23 |
| 3.2.2 | ASK..... | 24 |
| 3.2.3 | FSK | 24 |
| 3.2.4 | PSK | 24 |
| 3.2.5 | QAM | 25 |
| 3.3 | Frekvens..... | 25 |
| 3.4 | Bandbredd | 26 |
| 3.5 | Digitalt signal brus förhållande..... | 27 |
| 3.6 | Bitfelssannolikhet | 29 |
| 3.6.1 | Definition bitfel..... | 29 |
| 3.6.2 | Bitfel för PSK | 30 |
| 3.6.3 | Bitfel för QAM | 31 |
| 3.6.4 | Bitfel vid linjärt PCM-ljud..... | 31 |
| 3.6.5 | Bitfel vid bitreducerat ljud..... | 32 |
| 3.7 | Fädning | 32 |

| | | |
|--------|------------------------------------------|----|
| 3.7.1 | Riceanfädning | 32 |
| 3.7.2 | Rayleighfädning..... | 34 |
| 3.7.3 | Tidstillgängligheten | 34 |
| 3.7.4 | Skuggfädning..... | 35 |
| 3.7.5 | Simulering av fädning..... | 36 |
| 3.8 | Diversitetssystem | 39 |
| 3.8.1 | Rumsdiversitet | 39 |
| 3.8.2 | Frekvensdiversitet | 39 |
| 3.8.3 | Tidsdiversitet..... | 39 |
| 3.8.4 | Polarisationsdiversitet..... | 39 |
| 3.8.5 | Sammanvägningsmetoder | 40 |
| 3.8.6 | Tidstillgänglighets förbättring | 40 |
| 3.9 | Felskydd..... | 40 |
| 3.10 | Datapaketering..... | 41 |
| 3.10.1 | PDH..... | 41 |
| 3.10.2 | SDH..... | 41 |
| 3.10.3 | Ethernet..... | 41 |
| 4 | Systemdimensionering..... | 43 |
| 4.1 | Länkbudget | 43 |
| 4.1.1 | Linjärt stereo ljud..... | 43 |
| 4.1.2 | Komprimerat Layer II - stereo ljud | 45 |
| 4.1.3 | DTS-kodat 5.1 surroundljud | 45 |
| 4.2 | Länkbudget justeringar | 46 |
| 4.3 | Modulationsval | 48 |
| 4.4 | Kanalstruktur..... | 48 |
| 5 | Utrustning | 51 |
| 5.1 | Marknadsundersökning..... | 51 |
| 5.1.1 | 4 RF..... | 52 |
| 5.1.2 | MDS..... | 52 |
| 5.1.3 | Stratex | 53 |
| 5.1.4 | Val av testutrustning | 53 |
| 5.2 | Bänktester Aprisa XE | 53 |
| 5.2.1 | Systemuppställning..... | 53 |
| 5.2.2 | Mätresultat | 53 |
| 5.2.3 | Problem..... | 54 |
| 5.3 | Länkbudget Aprisa XE | 55 |
| 5.4 | Simulering av täckning | 56 |
| 5.5 | Fältmätningar..... | 56 |
| 5.6 | Ekonomisk kalkyl | 59 |
| 6 | Resultat | 60 |
| 7 | Slutsatser..... | 62 |
| 8 | Referenser | 63 |
| 9 | Appendix..... | 64 |
| 10 | Bilagor..... | 66 |
| 10.1 | Q-funktionen..... | 66 |
| 10.2 | Marknadsundersökning..... | 67 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

När Sveriges Radio sänder från en plats utanför radiohuset måste ljudet transporteras från sändningsplatsen till radiohuset. Idag används analoga radiolänkar med FM modulation, 75 kHz deviation. Sändningarna sker både i mono och i stereo, men länkarna är i mono varför dubbla uppsättningar av sändare och mottagare är nödvändigt vid stereosändning. Räckvidden för en sändare är naturligtvis beroende av terrängen och varierar från ca 5 km upp till 5-6 mil vid gynnsamma förhållanden. Den första utrustningen som användes i radions barndom sände på 45 MHz. Den låga frekvensen gjorde att utrustningen i vissa fall var känslig för störningar, t.ex. O-avstörd el-utrustning. För att undvika dessa störningar började Sveriges Radio själva utveckla sändare och mottagare i ett högre frekvensband på 330 och 350 MHz. Sändarna består av en drivenhet med 2.5 W uteffekt och ett slutsteg som max levererar 25 W. Dessa benämndes "Mottagare 56800", "Sändare 57000" och "Effektsteg 55400". Systemen utvecklades på 70 talet och hade mycket bra prestanda som senare ska visa sig stå sig mycket bra även idag. Men utvecklingen av nya digitala radiosystem för utsändning till allmänheten gör att antalet tjänster och funktioner blir allt fler. Introduktionen av DAB, Internetradio och Sattelitradio möjliggör för lyssnarna att ta emot mer än bara 2 analoga stereo kanaler och dessutom olika former av tilläggsdata till de digitala ljudkanalerna. Idag finns det i ca 700 000 svenska hushåll en surroundanläggning med möjlighet att återge 5.1 ljud, d.v.s. 6 enskilda digitala kanaler. De flesta använder idag denna anläggning främst i samband med filmvisning. Men idag produceras allt mer musikmaterial med formatet 5.1 för bättre musikupplevelse. Att radion faktiskt ligger efter TV i utsändningen av surroundljud kan tyckas märkligt och har säkerligen flera förklaringar. En förklaring kan vara svårigheten att överföra 5.1 ljudet från konsertarenan hem till radiohuset. De analoga HF-länkarna som idag används är i praktiken oanvändbara för att överföra mångkanalsformatet då det skulle krävas 6 sändare och mottagare samt 6 skilda frekvenser. Det skulle förvisso vara möjligt att använda samma system som i den analoga utsändningskedjan med stereoöverföring med hjälp av pilotton. Detta skulle reducera antalet sändare och mottagare till 3. Den bästa lösningen är hittills dock att digitalt koda de 6 kanalerna vid sändningsplatsen i DTS-formatet. En 5.1 kodad DTS bitström kräver då en digital förbindelse med en data hastighet på minst 1.536 Mbit/s överfört i 16 bitar 48 kHz. Det bör dock i detta sammanhang nämnas att flera hastigheter är möjliga, från 192 kbit/s upp till 1.535 Mbit/s. Inom kontributionen anses det inte lämpligt att gå under 1.536 Mbit/s av kvalitetsskäl.

Förutom de nya ljudformaten med flera kanaler ställs allt högre krav på ljudkvaliteten även vid ett vanligt reportage. En digital ljudöverföring har generellt ett signal brus avstånd, SNR, på ca 120 dB och en frekvensgång på 20 – 20000 Hz beroende på antalet bitar och samplingsfrekvens. Det finns därför en önskan om att kunna börja använda den digitala tekniken även vid mobil sändning och på så vis öka ljudkvaliteten och antalet tjänster.

1.2 Problemdefinition

Uppgiften i examensarbetet är att undersöka vilka digitala tekniska lösningar som finns idag och som kan vara aktuella i framtiden för att antingen ersätta eller komplettera dagens analoga HF system för mobil ljudkontribution. Arbetet kommer dock främst utgå från att det nya digitala systemet skall vara en ersättare av det analoga systemet och därmed ha samma täckningsområde.

En digitalisering av radioförbindelserna möjliggör även att andra tjänster kan överföras från studion ut till reportern. En mycket efterfrågad tjänst bland journalister har varit att kunna ha en uppkoppling mot intranätet för att där kunna ta del av information men även kunna skicka över text och bildinformation. Denna extra möjlighet skall därför ingå i den tekniska lösning som arbetas fram i examensarbetet.

Konkret innebär det att exjobbet skall leda till att föreslå vilken typ av utrustning som är lämplig att använda för framtidens mobila kontribution från sändande fordon till mottagarterminaler. Här ingår bl.a. att föreslå vilken typ av modulation, frekvens, bandbredd, uteffekt och ljudformat som är bäst att använda. Arbetet skall sedan ligga till grund för vidare utredningar inom Sveriges Radio i förnyelsen av mobil sändningsutrustning. Nedan redovisas vilka tekniska krav som ställs på utrustningen.

1.3 Allmänna krav på förbindelser

Förbindelser som används för programinsamling inom Sveriges Radio ställs det höga tillförlitlighets krav på. Kraven kommer p.g.a. att radion ingår i totalförsvaret och har i uppdrag att bevaka och informera både i fredstid samt i kris och krigstid. Det gäller därmed att förbindelser som används av Sveriges Radio är mycket stabila och oberoende av andra samhällstjänsters radiosystem.

1.4 Tekniska krav

Vilka tekniska krav som ställs på det digitala systemet har under arbetets gång kompletterats vartefter som kunskapen om hur systemen fungerar har ökat. Det är dock ett antal minimikrav som Sveriges Radio från början kunde ställa upp och som har legat som grund för hela arbetet.

Täckningsområdet bör vara likvärdigt med dagens analoga system, d.v.s. det skall även vara möjligt att sända från platser där det ej är fri sikt mellan sändare och mottagare. Men en jämförelse med dagens analoga system med ett nytt digitalt system innebär vissa problem och leder till följande ställningstagande: Ett analogt system fungerar gradvis sämre vid minskad signalstyrka där det vid en tillfällig utfädning av signalen innebär att SNR i kanalen minskar. Det innebär även att om nöden kräver det, så kan man sända ett mycket viktigt inslag även om signal brusnivån ligger under 40 dB. Ett digitalt system reagerar inte på samma sätt. Här kommer systemet att fungera perfekt tills man når den kritiska nivån, där det inom bara någon enstaka dB

förändring i signalen helt slutar att fungera. Det här innebär att det finns en mer eller mindre absolut gräns för systemet, där man utanför denna gräns inte har möjlighet att sända med det digitala systemet. Den möjlighet som finns för att förbättra täckningsområdet är att ändra modulationsform till en mindre känslig på bekostnad av minskad överföringshastighet. Detta kan i eventuellt kompenseras med att något annat kodat ljudformat används, t.ex. MPEG Layer II med bithastigheten 384 kbit/s. Gränsen för när modulationen med sämre ljudkvalitet måste fungera skall därför vara så tilltagen att den motsvarar den sämsta analoga täckningen med en viss marginal. I arbetet har vi använt Östergötland som ett testområde som fått representera hela landet. I verkligheten finns det naturligtvis större geografiska skillnader mellan olika län. Här har vi främst använt högmasten i Krokek för testerna. Att göra en simulering av ett system för hela Sverige har i nuvarande läge bedömts som allt för omfattande och kostsamt.

Ljudöverföringen skall ske i en garanterad 2.048 Mbit/s data överföring med tillräckligt lågt BER (=Bit Error Rate) för respektive ljudformat. Överföringen av MPEG Layer II kodat ljud kan dock ske med lägre hastighet om modulationsformen ändras. De ljudformat som skall kunna överföras är linjärt ljud i stereo med 20 bitars ordlängd och 48 kHz samplingsfrekvens, LAYER II samt 5.1 ljud med DTS-kodning. Vilket BER-värde som respektive ljudformat klarar var inte känt i början av arbetet och kommer därför att undersökas och redovisas senare i rapporten. Den kunskap som fanns innan exjobbssarbetet startade var att DTS ljudet är mer känsligt för bitfel än det linjära PCM-ljudet, som i de nyare J.57 kodarna även kan interpoleras för att förbättra skyddet. Därmed förväntas även täckningen för DTS bli sämre i jämförelse med linjärt ljud. Som utgångspunkt för arbetet sattes därför kravet på var respektive ljudformat skall fungera i förhållande till vilken typ av sändning som är möjlig med dagens analoga system. Resultatet blev att DTS-kodat ljud skall kunna överföras från platser där man idag kan sända med $\text{SNR} \geq 53$ dB. Det linjära PCM-ljudet alternativt det komprimerade LAYER II ljudet skall kunna överföras från områden där det analoga systemet klarar $\text{SNR} \geq 40$ dB. Utgångspunkten är realistisk då musikevenemang i framtiden troligtvis kommer att återges i 5.1 och att reportage bäst återges i stereo med låg brusnivå.

Som nämndes ovan finns ett önskemål om att upprätta en datakanal mellan det mobila fordonet och radiohuset för åtkomst av intranät och Internet. Önskemålet gör att dataförbindelsen måste vara dubbelriktad, d.v.s. datalänken skall arbeta i duplex. För dataöverföring skall det minst finnas kapacitet för en dubbelriktad 64 kbit/s datakanal. Att länken arbetar i duplex möjliggör även dubbelriktad ljudtrafik. Det skall alltså vara möjligt att sända returljud genom länken från radiohuset och ut till den mobila enheten.

För att undvika att det uppstår för stora fördröjningar i t.ex. en diskussion i länkförbindelsen får inte Round Trip Time, RTT överstiga 40 ms. Om den tiden blir för stor kan inte returlänken användas för direktlyssning till reportern, samtidigt som svårigheten att föra en diskussion över länken kraftigt försåras.

Den maximala insynkningstiden länken får ha om radioförbindelsen tillfälligt bryts är satt till maximalt 1 sek. Det innebär att när radiosignalen åter är tillräckligt bra för att avkodas i mottagaren skall ljud kunna återges inom 1 sek. Det finns även ett krav på hur lång tid det får ta att starta utrustningen tills att det skall gå att genomföra en sändning. Kravet här är satt till max 30 sek.

Radiolänken har höga krav på stabilitet för att fungera vid svåra förhållanden. Det innebär rent praktiskt att radiolänken skall ha sådana marginaler att den klara fädningar i radioförbindelsen som annars skulle öka bitfelshalten till oacceptabla nivåer. Tidstillgängligheten skall därför vara bättre än 99,9 % inom täckningsområdet vilket motsvarar avbrott på 8,8 tim/år för en länk som ständigt är i drift.

Drifttemperaturerna för utrustningen måste beaktas då den mobila enheten kommer att sitta i mobila fordon som kan vara nedkylda på vintern och extremt varma på sommaren. Kravet på uppstart och arbetstemperaturen för utrustningen är därför satt till -20° till $+55^{\circ}$ Celsius.

Avgränsningar

Ovanstående problemdefinitioner innebär i sig att arbetet är omfattande. Många aspekter måste övervägas och vissa avgränsningar har varit nödvändiga.

- Vi har i arbetet inte haft någon möjlighet att utveckla nya sändningsmetoder, utan helt utgått från utrustning som idag finns på marknaden. Arbetet är därför utformat som en undersökning där marknadens lösningar granskats och undersökts.
- Befintliga ljudformat och utrustning för kodningar har använts. Det innebär att arbete inte lagts ner på att ytterligare förstärka felskyddet i de ljudformat som finns.
- P.g.a. Post & Telestyrelsens bestämmelser om radiofrekvenser har vi inte i detalj kunnat välja frekvensområde. I inledningen av examensarbetet fördes därför en allmän diskussion om vilka frekvensområden som kunde vara aktuella för vidare prov.

1.5 Tidigare arbeten och erfarenheter

Att sända radio mobilt med programinsamling via FM-länk är inget nytt. Det förekommer i princip i hela världen och den analoga tekniken är vida känd. Sveriges Radio genomför i dagsläget ca 20 000 HF sändningar/år. Men när frågan om digital mobil överföring väcktes visade sig erfarenheterna vara betydligt mer begränsade. Inom både radio och televisionen har digital mobil överföring förekommit sedan många år, men då antingen via satellit eller i mer planerade sammanhang där det varit möjligt att rigga för länkhopp med fri sikt. Att sända med fri sikt och korta distanser är betydligt enklare, vilket gör att den kunskapen bara till vissa delar kan tillämpas i dessa sammanhang.

Men det finns digital utrustning för mobilt bruk där det inte krävs fri sikt. Det norska företaget Jotron Broadcast & Communication [1] har utvecklat ett

system som arbetar på 400 och 800 MHz och som överför ljudet i 128 kbit/s. Modulationen är C8PSK. Norska NRK har utvecklat, testat och köpt ett antal utrustningar men efter tester har missnöjet med utrustningen, inom SR varit stort. Anledningen är att det varit svårt att veta systemets räckviddsgränser och att det tagit lång tid för systemet att synka in efter ett avbrott. Vissa användare har därför återgått till de analoga systemen igen. Jotrons system är främst avsett för reporterbruk, d.v.s. för korta avstånd mellan reporter och bil. Systemet är inte heller helt tillämpligt i dessa sammanhang då överföringshastigheten, 128 kbit/s, av SR anses vara för lågt.

Ett annat system som ännu inte är optimerat för mobil programinsamling av ljud men däremot mobil mottagning är DAB, Digital Audio Broadcasting. Systemet är avsett för sändning från master och med relativt hög effekt till mobila mottagare. Ljudet ligger kodat i en dataström av 1.2 Mbit/s. Här används avancerade sändningsmetoder för att utnyttja t.ex. reflexer som förekommer i hög grad vid sändning utan fri sikt. Några närmare studier av denna teknik har inte genomförts i detta arbete eftersom det inte existerar någon mobil utrustning av denna typ. Sannolikt kommer tester av det slaget att göras av SR inom kort.

I övrigt finns ett flertal artiklar och undersökningar som behandlar mobil radiokommunikation, men ingen direkt avsedd för bredbandig programinsamling för broadcastindustrin, med överföringshastigheter upp till 2 Mbit/s. De som finns är oftast inriktade på mobiltelefonlösningar som i och för sig, med utvecklingen av 3G, börjar komma upp i hastigheter som närmar sig 2 Mbit/s. Det finns dock en avgörande skillnad. I mobiltelefoner garanteras ingen hastighet för dataöverföring. Hastigheten justeras efter rådande sändningsmöjligheter. UMTS/3G tekniken är för övrigt en teknik som i framtiden bör undersökas vidare inom SR om den kan användas för programinsamling av t.ex. nyhetsinslag.

2 Analoga system

2.1 Allmänt

När Sveriges Radio överför en ljudsignal från en sändare monterad på en bil till en fast mottagarterminal är det fråga om en punkt-till-punkt förbindelse. Det innebär att radiosignalen skall nå mellan de två positionerna och ingenting mer just då. Skillnaden mellan en fast punkt till punkt förbindelse, som är mycket vanligt förekommande, och SR:s driftsfall är att sändaren i vårt fall kan ändra position. Det är dock inte fråga om mobil kommunikation i den bemärkelsen att sändaren flyttar på sig under sändning. Skillnaden rent praktiskt mellan en fast punkt till punkt förbindelse och tillämpningen för Sveriges Radio är att det vid mottagarterminalen inte går att använda fast riktade antenner. Detta är en klar nackdel då antenner med rundupptagande karakteristik eller med bred lob tar upp oönskade signaler samtidigt som förstärkningen är lägre jämfört med en riktad antenn. Skillnaden mellan en rent mobil förbindelse och vår tillämpning är att det vid mobil mottagning och sändning även uppstår dopplereffekter som gör att signalstyrkan varierar under färd.

2.2 Sveriges Radios befintliga utrustning

2.2.1 Sändare

Den radioutrustning som används inom SR för programinsamling är av blandade modeller där allt ifrån de gamla "Sändare 57000", Magnetics 850 serie och den senaste inköpta serien från Wysicom/Pastega, används. Till styrsändaren skickas analogt ljud från t.ex. ett mixerbord. Sändaren har som tidigare redovisats en uteffekt på ca 2.5 W vilket används för att mata slutsteget som fortfarande är av den gamla typen "Effektsteg 55400". Det ger 25 W uteffekt. Signalen skickas till ett filter som enbart släpper igenom ett smalt frekvensband runt sändningsfrekvensen på 330 MHz. Filtret har även 4 utgångar på 350 MHz som kan användas till att mata mottagare i OB bussen för att ta emot sändningar från en eller flera mobila reportrar med bärbara sändare. På det viset kan samma antenn användas till både sändning och mottagning.

2.2.2 Sändarantenn

Varje sändarfordon är utrustad med en hög och sänkbar mast på 10 m. Det gör att man kommer upp från många rörliga föremål som bilar etc. Oftast placeras en yagiantenn längst upp i masten som har en förstärkning på ca 6 - 8 dB. En praktisk jämförelse mellan att använda en vanlig dipolantenn på taket av bilen visar att en vinst på ca 10 dB är möjligt att uppnå med mast och yagiantenn. Från sändarfiltret matas antennen med en antennkabel av typen RG213 som på 10 m har en förlust på ca 1 dB. Med uteffekten 25 W (= 44 dBm) från slutsteget innebär det en utstrålad effekt från antennen

$$44 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} + 6 = 49 \text{ dBm}$$

Ekv. 2.1

2.2.3 Mottagarantennner

Sveriges Radio har tillsammans med Teracom sedan slutet av 70-talet byggt upp ett landsomfattande radionät för programinsamling som gör det möjligt att mobilt sända radioprogram från stora delar landet. Teracom har idag 54 högmaster som är utplacerade i landet för radio och tv-sändningar till allmänheten. I dessa master finns även mottagarantennner placerade för mobil analog HF mottagning i bandet 330 MHz. Mottagarantennnerna är placerade på ca 170 m höjd och är oftast av rundupptagande karaktär. Antennerna består oftast av 3 eller 4 dipolantennner med reflektionsmattor bakom. Antennerna har en förstärkning på ca 11 dBi och frekvensområdet är 325 MHz till 470 MHz. De är ihopkopplade i en passiv transformator uppe i masten vars förlust uppgår till ca 3 dB. Transformatorn är kopplad till en 7/8 tum koaxialkabel med en dämpning på 2.5 dB/100 m. Förstärkningen varierar i antensystemet för olika frekvenser

I stationsbyggnaden sitter en fördelarförstärkare med filter, av samma typ som i OB bussarna, som fördelar insignalen till upp till 4 mottagare, men som även möjliggör att koppla in en sändare i 350 MHz bandet för utsändning. Sändaringången används sällan idag inte då återgången till bilen sker via mobiltelefon eller en separat smalbandig returkanal i 450 MHz bandet. Filtret har en dämpning på ca 3 dB vilket totalt innebär en förstärkning i antensystemet på

$$11 - 3 - 4.25 - 3 = 0.75 \text{ dB.}$$

Ekv. 2.2

Sveriges Radio har förutom Teracoms högmaster tillgång till ett 60-tal små stadsterminaler eller mindre master utrustade med mottagarutrustning. Dessa mottagarstationer kompletterar täckningen på platser där det inte går att få kontakt med någon av högmasterna. Dessa stationer har varierande enkla antensystem. De har oftast betydligt sämre täckning än högmasterna men fungerar utmärkt inom sitt närområde.

2.2.4 Mottagare



Fig. 2.1 Mottagare (4 st) av typen Magnetic 850, kopplade till filter och fördelarförstärkare

Mottagarutrustningen som används av Sveriges Radio och Teracom är främst Magnetics 850 serie. Det är en mottagare som ersatte den första "Mottagare 56800". Känsligheten för den mottagaren är ca -100 dBm (ca 2 μV) för att uppnå ett SNR på 40 dB. Mottagarna har ett lågt egenbrus. Vid god signalstyrka kan man uppnå ett SNR på runt 65 dB och med en frekvensgång på mellan 20 – 15000 Hz och med en harmonisk distorsionen på ca 0.35% vid

1 kHz. Nedan framgår vilken prestanda Magnetics senaste 850 system har vid olika signalstyrkor.

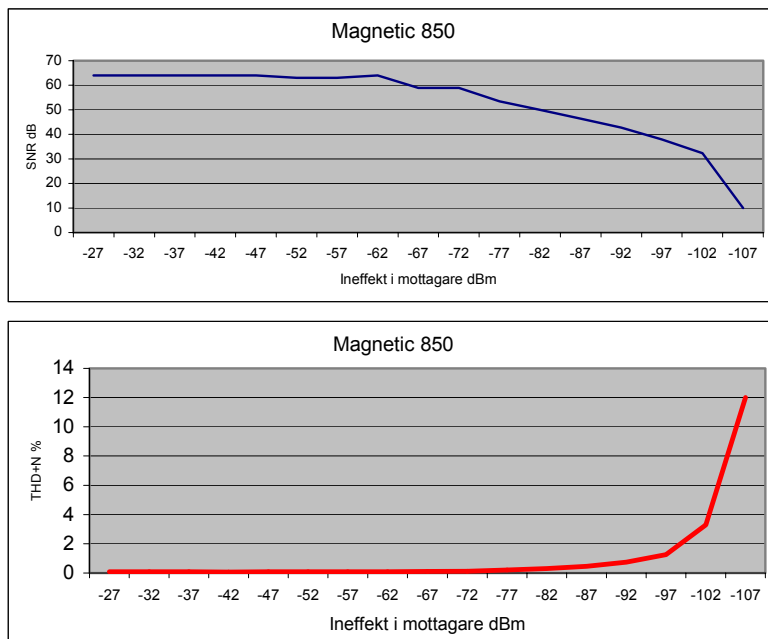


Fig. 2.2 Signal brusförhållande samt distorsion för Magnetic 850 serien

Som framgår av diagrammen så beror ljudkvaliteten av vilken signalstyrka som mottagaren har. För rundradion är just ljudkvaliteten ett viktigt begrepp. Man försöker i alla lägen att uppnå bästa möjliga kvalitet. Men av praktiska skäl måste man tillåta att ljudkvaliteten varierar beroende av vad som skall sändas. En konsert med en symfoniorkester kräver t.ex. betydligt bättre kvalitet än om ett akut nyhetsmeddelande skall sändas. I fallet med symfoniorkestern är det en planerad händelse, där det finns tid att rigga den tekniska utrustningen långt i förväg med extra länkhopp om så behövs. Då har man möjlighet att uppnå en hög signalstyrka mellan sändare och mottagare och därigenom få ett högt SNR samt låg distorsion. För en ljudöverföring med musik finns det tumregler inom Sveriges Radio som säger att man minst bör ha ett SNR > 53 dB. På samma sätt finns det en tumregel som säger att ett nyhetsinslag bör ha ett SNR > 40 dB. Om vi antar att vi använder Magnetics 850-serie kan vi direkt gå in i diagrammet i figur 2.3 och avläsa vilken signalstyrka som krävs för respektive SNR värde. Vi kan då avläsa att det behövs ca -77 dBm för 53 dB SNR och ca -94 dBm för 40 dB SNR. För att förbättra möjligheten att överföra ljud med bra kvalitet så används dessutom brusreduceringssystem som kan förbättra dessa värden. Utrustningen som används av Sveriges Radio heter Telcom. Det systemet kan förbättra den upplevda störnivån med ca 10 dB vid gynnsamma förhållanden. Telcom arbetar genom att bl.a. höja diskanten i olika delband vid sändaren och sedan sänka i motsvarande grad vid mottagaren. För att utrustningen skall fungera krävs dock att bruset i radioöverföringen är relativt konstant utan alltför stora kortvariga störningar. Med brusreducering kan man alltså sända med lägre signalstyrka. Vid optimala förhållanden kan man alltså få 53 dB SNR vid runt -90 dBm och 40 dB SNR vid ca -100 dBm. Brusreduceringssystem ger dock andra icke

önskvärda bieffekter, som t.ex. risk för ”punpeffekter” i ljudet. Situationen kommer dock att avgöra vad som kvalitetsmässigt anses användbart. Ljudkvalitet är till stor del en bedömnings sak och relativt komplicerat att mäta stringent och entydigt. Det är något som vi inte går in närmare på i denna rapport.

2.2.5 Kontributionen

Inom Sveriges Radio används idag vid kontributionen mellan radiohusen samt distributionen från radiohusen till sändarstationerna ett system som internt på SR kallas för DSQ (Digital Studio Quality), men internationellt numer heter fått namnet J.57. Det är ett av SR och NRK utvecklat system som blivit industristandard för överföring av professionellt ljud och som via ett G.703 interface med en E1-förbindelse (2.048 Mbit/s) som kan överföra antingen ett analogt stereo par i 18 bitar / 48 kHz eller en reducerad digital AES/EBU signal. AES/EBU signalen är en 3.072 Mbit/s bitström som i sig innehåller en 24 bit ljudström i 48 kHz. För att få plats med det i en E1 förbindelse reduceras 4 kontrollbitar till att sändas i var 1000:e sampel så att en ren 20 bitars ljudström erhålls som i sin tur komprimeras ner i 1 ms block om 18 bitar. Det innebär att J.57 formatet har ca 256 kbit/s för felskyddskodning plus en 64 kbit/s data kanal. Formatet klarar dessutom att överföra ovan nämnda DTS-signal med 5.1 ljud direkt via AES/EBU interfacet. Det här gör att J.57 formatet passar utmärkt till att överföras t.ex. via en radioförbindelse där en viss grad av mindre bitfel förekommer.

I fallet där HF mottagarens ljud skall överföras till radiohusen används oftast Digital Visions DSQ kodare som gör om det analoga ljudet till J.57 formatet. Det innebär att man har en fullgod överföring från mottagaren i högmasten till radiohuset, där motsvarande avkodare sitter och gör om den digitala strömmen till en AES/EBU-ström. Denna kan sedan anslutas till ett mixerbord eller annan utrustning för vidare bearbetning och utsänding.

När ljudet från en stadsterminal skall överföras till studio finns oftast ingen fast E1 förbindelse varför ljudet inte kan överföras digitalt i J.57 formatet. Istället används ISDN förbindelser antingen i 64 kbit/s för mono eller 128 kbit/s för stereo. Ljudet kodas då i MPEG Layer II vilket innebär att ljudet är komprimerat och av sämre kvalitet än det linjära PCM ljudet som överförs i J.57 formatet. I ett parallellt examensarbete på Sveriges Radio undersöker Jonas Jolhammar hur denna förbindelse skall kunna förbättras i framtiden.

2.3 Beräkning av täckning

Det finns flera faktorer att beakta när man skall beräkna vilken täckning ett system har. Nedan redovisas de viktigaste faktorerna som påverkar täckningen.

2.3.1 Frekvensegenskaper

Beroende av vilken frekvens som används kommer även utbredningsegenskaperna att variera. Generellt har lägre frekvenser bättre genomträngningsegenskaper än höga frekvenser. Låga frekvenser, <1 GHz, kräver inte fri sikt i samma utsträckning som högre frekvenser. Ett intressant urval ur

hela frekvensspektret, för att studera dessa egenskaper, är VHF och UHF-bandet. Övriga frekvenser är inte intressanta här då lägre frekvenser inte har kapaciteten att överföra vår önskade informationsmängd och högre frekvenser kräver fri sikt för att fungera på längre avstånd.

Frekvensbandens specifika egenskaper

VHF bandet 30 – 300 MHz

- **Diffraction och reflexioner ger räckvidd bortom horisonten**
Diffraction innebär att radiovågor sprid och böjs vid skarpa kanter som bergstoppar, husväggar och tak. Tillsammans med reflexioner mot bergväggar och liknande kan radiovågorna gå längre än horisonten. Det är därmed också möjligt att sända bland tätbebyggda områden eftersom signalen kan "leta sig fram" bland husväggarna i staden.
- **Ytreflexioner ger upphov till flervägsutbredning**
En nackdel med reflexer är att signalen kan gå olika vägar till mottagaren. Därmed kommer signalen att gå olika långt. Vid allvarlig flervägsutbredning kommer signalen att störas kraftigt.
- **Jonosfärisk scattering möjligt**
Innebär att signalen kan färdas upp till 2000 mil studsande mellan jonosfärsskikten. Det är dock användbart huvudsakligen för smalbandiga förbindelser.

UHF bandet 300 – 3000 MHz

- **Troposfärisk scattering**
Troposfärisk scattering är möjligt vilket gör att signalen kan gå mycket långt vid gynnsamma förhållanden. I praktiken är det variationer i brytningsindex i atmosfären som gör det möjligt att få radiovågen att färdas inuti atmosfärsskikten.
- **Multielementsantenn**
De högre frekvenserna gör det lättare att använda flerelements antenner. Anledningen är att våglängden minskar med frekvensen och därmed blir antennstorlekarna mer hanterliga och uteffekten från antennen kan enkelt riktas i önskad riktning.

Då Sveriges Radio använder frekvenser kring 330 MHz mellan OB-buss och mottagarterminal är det främst UHF bandets egenskaper som är tillämpbara. Som framgår ovan kan det vid vissa väderförhållanden förekomma scattering men det är inget som normalt utnyttjas vid sändning. Den maximala räckvidden för dessa frekvenser är därmed i stort sätt till horisonten. Men p.g.a. att brytningsindex i luften varierar med höjden över marken och radiostrålarna "böjs" uppåt (refraktion) når strålarna längre än om de gick helt rakt. För att beräkna detta införs en ekvivalent jordradie som är större än den verkliga radien. Radiohorisonten ligger ca 15 % bortom den optiska horisonten. Beräkning av radiohorisonten (inkl. ekvivalenta Jordradien) vid plan mark ges av

$$D = 4.1 * \sqrt{h_1 + h_2}$$

Ekv. 2.3

där D är avståndet i km mellan masterna [3]. I fallet med en högmast på 175 m och en OB buss med 10 m mast blir radiohorisonten ca 67 km radie.

2.3.2 Påverkan av ytvåg

Även underlaget påverkar hur långt en radiovåg kan nå. Olika mark förhållande (havsvatten, färskvatten, fuktig mark etc.) ger skillnad i de elektriska parametrarna för utbredningsförhållanden [3].

För korta avstånd (<100 km) och där $f \ll f_q$ kan fältstyrkan från en sändare beräknas ur

$$E = 300 \frac{\sqrt{P_s}}{r} \text{ [mV/m]} \quad \text{Ekv. 2.4}$$

där f_q är övergångsfrekvensen, d.v.s. den frekvens där jordytan (vatten eller mark) blir antingen resistiv eller reaktiv. Tabellen 2.3 i "Mobil radiokommunikation" [4] visar några värden vid olika terrängförhållanden. Det enda markförhållanden som kan betraktas som en god ledare är havsvatten där $f_q = 900$ MHz. Övriga markförhållande har en övergångsfrekvens på ett tiotal MHz och är därmed dämpas ytvågen snabbt. Vid våra frekvenser 330 MHz är därmed kravet $f \ll f_q$ enbart uppfyllt över havsvatten. Ytvågen kan både hjälpa signalen att nå längre men även ställa till problem och orsaka både tillfälliga och långvariga avbrott. Man bör därför beakta detta fenomen vid sändning över havsvatten.

2.3.3 Fri rymddämpning

När radiovågor sänds genom luften dämpas signalstyrkan successivt genom den fria rymddämpningen. Man benämner dämpningen som den elementära transmissionsförlusten som kan beräknas ur

$$L_p = \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 f^2 d^2 \quad \text{Ekv. 2.5}$$

där d = avståndet mellan sändare och mottagare och L är dämpningen i ggr. Vi ser att ökad frekvens ger ökad dämpning men vid ökad frekvens kommer även den isotropa antennarean att minska, vilket gör att dämpningen inte är beroende av frekvensen.

Låt P_s vara sändarens uteffekt och G_s vara sändarantennens förstärkning. Då blir utstrålad effekt $P_{EIRP} = P_s G_s$. För en mottagare med en mottagarantenn med förstärkningen G_m blir den mottagna effekten

$$P_m = P_s \frac{G_s G_m}{L_b} \quad \text{Ekv. 2.6}$$

I decibel kan beräkningarna göras enligt [3]

$$P_s + G_s - L_f + G_m = P_m \quad \text{Ekv. 2.7}$$

Vi kan nu med hjälp av data från sändarens uteffekt och mottagarens känslighet samt antennernas förstärkning beräkna vilken maximal räckvidd som kan uppnås enbart p.g.a. fri rymddämpning. Från Ekv. 2.1 och 2.2 får vi

$$\text{För stereo } L = P_s - P_m = 49 - (-77) = 126 \text{ dB} \quad \text{Ekv. 2.8}$$

$$\text{För mono } L = P_s - P_m = 49 - (-94) = 143 \text{ dB} \quad \text{Ekv. 2.9}$$

Enligt Ekv. 2.5 blir $d = 144 \text{ km}$ för stereo och $d = 1021 \text{ km}$ för mono.

Som framgår kommer inte rymddämpningen vara den faktor som sätter den maximala räckvidden då den ekvivalenta radiohorisonten begränsar radiovågorna betydligt tidigare. Men signalen kommer enbart vid optimala förhållande nå ända till radiohorisonten då byggnader, berg samt fädning hindrar radiovågen att komma ändra fram.

2.3.4 Simulering av täckning

I avsnitten ovan har hela tiden utgått från att terrängen varit helt slät och utan ojämnheter. I det verkliga fallet är det naturligtvis inte så. Mellan sändaren och mottagaren finns det oftast en rad olika typer av hinder, hus, berg och skog som alla begränsar radiovågens framkomlighet. Att för hand beräkna hur alla ojämnheter påverkar signalen är ett mycket omfattande arbete. Innan datorerna fanns användes topografiska kartor med alla höjdvariationer markerade. Det gick då att se vilka platser som hade fri sikt till en sändare och på det viset få en uppfattning hur täckningen blev.

Idag används datorer för att beräkna täckningskartor. De topografiska kartorna är digitaliserade och utifrån terrängprofilen går det att se vilken täckning man kan förvänta sig av en antennplacering. För att få en så exakt karta som möjligt arbetar dagens programvaror även med modeller som simulerar olika radiofenomen som uppstår kring bergstoppar, stadsmiljöer och sjöar. Man tar därmed bl.a. hänsyn till reflexioner, diffraktioner och jordens ledningsförmåga.

I examensarbetet har vi valt att använda programmet WRAP för att göra beräkna täckningen för de radiosystem som är intressanta. WRAP är ett mycket mångsidigt verktyg som kan simulera yttäckande sändarsystem, punkt-till-punkt system och fleranvändarsystem men även flercellssystem. I detta arbete har främst de yttäckande funktionerna varit intressanta men även punkt-till-punkt simuleringar kan vara av intresse för att beräkna en specifik sändningsplats. Flercellssimulering över hela landet hade varit intressant att göra men p.g.a. stora kostnader för licenser och bristen på tid har det inte varit möjligt.

För att en simulering skall vara möjlig krävs det att man i WRAP bygger upp modeller av sändaren och mottagaren som skall simuleras. Här specificeras alla data om stationen mycket noggrant. Bl.a. annat anges

- Sändare/mottagare koordinater

- Frekvens
- Bandbredd
- Överföringskapacitet
- Uteffekt
- Kabel dämpning
- Antennhöjd
- Antenn diagram
- Mottagarens egenbrus och känslighet

När stationerna är skapade väljer man efter vilken modell som simulering skall använda. Vilken modell som skall användas beror på vilket område som skall simuleras samt vilka resultat som önskas. Det är stor skillnad mellan stadsmiljö och skogslandskap. Efter rekommendationer från tillverkaren av WRAP har vi valt att använda utbredningsmodellen Detvag-90/FOI [5] som klarar de flesta förhållande med god noggrannhet. Vidare används följande modeller

- Spherical Earth Method: Old with Conductivity
- Diffraction Model: Vogler
- Urban Model: Add Cover Height
- Vegetation Model: Wood

Vid simuleringen kan man välja med vilken sannolikhet simuleringen skall ske med. Vi har i arbetet valt 95 % sannolikhet för simuleringsresultatet. Då vår testlicens av WRAP enbart fungerade i Östergötland har detta område fått vara vårt främsta testområde. Vi har bedömt att området ger en relativ bra bild av hur sändningssystemen fungerar i övriga delar av landet.

Med data från sändare/mottagare tillverkarnas datablad och krav på ljudkvalitet i kap 2.2.4 har vi kunnat simulera täckningen för den analoga utrustningen. Resultatet visas nedan där det gröna området visar var det är möjligt att sända i stereo och det röda samt gröna området visar möjlig mono sändning.

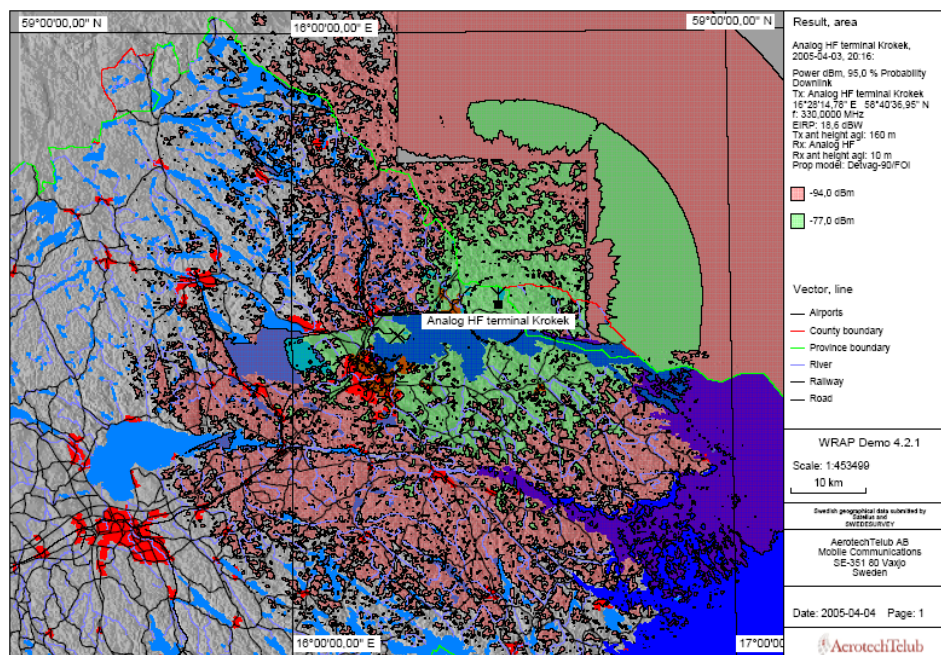


Fig. 2.4 Dagens analoga täckningsområde för Krokeks terminalen i Norrköping. Grönt område visar möjlig stereosändning och rött område (inkl gröna) visar monosändning.

Som framgår av kartan är täckningen mycket bra för det analoga systemet där det går att sända i mono ända upp till ca 50 km från mottagarterminalen. Inom ett testområde med radien 50 km uppnås en täckning på 16.7 % för stereo och 70.8 % för mono. Då WRAP användes i demo mode fattas en del av den topografiska kartan i högra översta hörnet vilket naturligtvis påverkar resultaten. Men i examensarbetet används samma testområde varför det inte bör påverka jämförelser i någon större omfattning.

2.3.5 Fädningsmarginal

Med simuleringen ovan framgår det att analoga systemet har en räckvidd på ca 50 km. Eftersom vi från 2.3.3 vet att det mellan sändarantennen och mottagarantennen kan vara en dämpning på 143 dB vid mono sändning vid radien 50 km, kan vi beräkna fädningsmarginalen genom att beräkna den fria rymddämpningen för sträckan. Enligt Ekv. 2.5 för fri rymddämpning blir dämpningen för 50 km 117 dB, vi har alltså en marginal på $143 - 117 \text{ dB} = 26 \text{ dB}$ vid monosändning. Vid stereo sändning blir marginalen på motsvarande sätt för 30 km radie $126 - 112 = 14 \text{ dB}$.

2.3.6 Praktiska erfarenheter

Det analoga systemet har använts i över 25 år och har fyllt sin funktion mycket väl. Systemet är relativt lättanvänt och i många fall kan reportern själv sköta utrustningen utan hjälp av tekniker. Täckningskartan ovan visar också att täckningen för det analoga systemet är god. Systemet anses också vara relativt okänsligt för störningar i form av reflexer, fädning och olika väderförhållande vilket gör det stabilt och driftsäkert. Men om en förbindelse etablerats där SNR ligger på gränsen för acceptabel nivå kan tillfällig fädning göra att bruset tillfälligt eller under längre perioder blir oacceptabelt högt.

3 Digitala system

Som framgår i 1.2 är uppgiften i examensarbetet att undersöka hur ett digitalt HF system ska dimensioneras för att uppnå samma täckning som det analoga systemet beskrivet i kap 2. I detta avsnitt kommer en genomgång av några vanliga sändningsmetoder och vilka problem som kan uppstå samt hur det går att avhjälpa problemet.

Att ett system är digitalt innebär att det analoga ljudet först omvandlas till ett digitalt ljudformat som antingen är linjärkodat med PCM eller olinjärt kodat med perceptuella kodningsmetoder. Kodaren skickar därefter en digital bitström till en sändare som kan modulera den digitala bitströmmen på en bärvåg. Den moduleringen kan i sin tur ske på flera olika sätt, beroende på vilket radiosystem som används. Dessutom kan själva bärvågen sändas ut på flera sätt, antingen som en kontinuerlig bärvåg på en frekvens, eller en kontinuerlig bärvåg som frekvenshoppar, eller en bärvåg som sänder i tidsintervaller med samma eller olika frekvenser.

3.1 Översikt digitala sändningsteknologier

3.1.1 Mikrolänk med fast frekvens och bärvåg

Detta är det traditionella sättet att sända radio och liknar den analoga tekniken i många avseenden. Det är en stabil teknik som innebär att systemet använder en och samma frekvens så länge systemet är i drift. Oftast så har dessa system en reserverad frekvens som gör att inget annat system får använda frekvensen. Genom att sändaren kontinuerligt sänder kan bitströmmen levereras i en jämn takt utan att den behöver buffras i ett minne i mottagaren. På det viset uppstår minimala tidsfördröjningar. Vid dubbelriktad kommunikation krävs 2 olika frekvenser. Generellt kan man säga att fasta radiolänkar arbetar i höga frekvensområden, över 1 GHz. Detta är även den mest förekommande tekniken för fasta radiolänkar som bl.a. används av Teracom för distribution av ljud till sändare för radio och tv. Mikrolänkar används även i stor omfattning för att ansluta basstationer för mobiltelefoni till det fasta nätet. Arbetet i rapporten utgår från denna teknik och varianter av den.

3.1.2 FDMA

FDM (Frequency Division Multiplex Access) är en mycket vanligt förekommande teknik i fleranvändarsystem och innebär att den tilldelade bandbredden hos en basstation delas upp i flera smala frekvenser, en för varje användare. Tekniken användes flitigt på 80-talet då den är väl anpassad för analog överföring. I och med ny filterteknik går det idag att göra mycket frekvenseffektiva system. Fördelen med FDMA är att det inte kräver någon synkronisering med alla användare [4].

3.1.3 TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access) innebär att tidsluckor används där sändaren enbart skickar ut bärvågen och datainformation under vissa bestämda tidsintervall. Det gör att flera sändare kan använda samma frekvens. Tekniken används t.ex. i dagens GSM-system som har 8 tidsluckor där varje

telefon använder en tidslucka. Mängden data information som kan sändas reduceras dock även den med antalet tidsluckor. Med tekniken skulle en dubbelriktad länk inrymmas på en frekvens vilket kan vara intressant om det är ont om frekvenser. Tekniken har sina största fördelar i fleranvändarsystem där flera klienter samtidigt skall arbeta mot en bas. Någon vidare undersökning av systemet gör därför inte i detta arbete [4].

3.1.4 FH-system

FH-system eller frekvenshoppssystem innebär att sändaren och mottagaren samtidigt skiftar frekvens vid olika tidpunkter. Systemet kan därför sägas vara en kombination av FDMA och TDMA. Försvaret använder den tekniken med snabba frekvenshopp för att försvåra avlyssning men tekniken kan även tillämpas för att undvika störningar genom byta till en frekvens med mindre störningar. I detta arbete kommer vi dock inte tillämpa tekniken då det kräver mer bandbredd och utrustning som inte är optimerad för tillämpningen. [4].

3.1.5 OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing, är en sändningmetod som blivit mycket populär på senare tid. Tekniken utvecklades på 60-talet men har inte kunnat implementeras i någon större skala p.g.a. att det krävs skarpa filter och stor processorkraft för att kunna hantera tekniken. Det är en teknik som bl.a. används för utsändning av digital radio och TV samt i trådlösa LAN och innebär kortfattat att flera underbärsvågor används parallellt med olika frekvenser. Dessa underbärsvågor moduleras med t.ex. BPSK, QPSK, 16 QAM osv. Skillnaden med traditionell FDM är att underbärsvågorna ligger på ett avstånd sinsemellan så att den intill liggande kanalens spektra har sitt minimum vid de andra kanalernas maximum. Fördelen med OFDM är att metoden inte är lika känslig för flervägsutbredning. Anledningen till det är flera. En viktig orsak är att symbolhastigheten på varje underbärsvåg kan sänkas. Om vi antar att antalet underbärsvågor är k kan även symbolrotationen sänkas med en faktor k så att symboltiden blir T_s . Genom att lägga in ett "guard intervall" Δ efter varje symbol där systemet "inväntar" eventuella reflexer kommer systemet att klara reflexer med ytterligare gångvägsskillnader. Mottagaren kan därmed urskilja signalerna trots att reflexer kommer långt efter huvudsignalen och även utnyttja en stark reflex. Guard intervallet är en system konstant som kan varieras beroende på vilken täckning som önskas. Nackdelen är att överföringshastigheten sjunker, samt att viss fördröjning kan uppstå i systemet. Genom att flervägsutbredningen påverkar vissa frekvenser mer och andra mindre finns det, genom att sända felkorrektion på vissa underbärsvågor, möjlighet att dessutom korrigera vissa bärsvågor som eventuellt är felaktiga [6] [7].

3.1.6 WiFi

WiFi (Wireless Fidelity) är en radioteknik som blivit mycket populär tack vare det ökade användandet av trådlösa LAN. WiFi tekniken till vissa delar en kombination av kap. 3.1.2 och 3.1.3 ovan där sändaren och mottagaren har ett antal frekvenser att välja på och där sändaren sänder så fort den har information att skicka. Genom att man inte använder fasta tidsluckor kan det i ett system med flera användare uppstå kollisioner vilket då resulterar i

omsändning. Omsändning är möjligt då dessa system alltid är dubbelriktade och bygger på att mottagaren bekräftar att den tagit emot den skickade informationen på ett korrekt sätt. Det faktum att inte fasta tidsluckor används innebär också att det inte går att garantera någon hastighet. Systemets prestanda kommer att minska med antalet samtidiga användare och riskerar att nästan helt kollapsa om antalet användare blir för många. Det beror på att allt fler kollisioner uppstår och att trafiken till slut nästan enbart består av omsändningar. Tekniken används främst inomhus mellan datorer och accesspunkter. Standardprotokollen benämns 802.11, 802.11a, 802.11b och 802.11g. Idag är max hastigheten 54 Mbit/s. Det behövs inga tillstånd för att använda denna typ av utrustning men den får enbart användas i speciella frekvensband 2,4 och 5 GHz med mycket låg uteffekt. Att använda den tekniken, för SR:s programinsamling är sannolikt inte realistiskt av flera skäl. Den höga frekvensen gör att tekniken kräver fri sikt mellan sändare och mottagare vilket vi i dessa sammanhang inte har. Att frekvenserna inte är licensierade innebär dessutom att vem som helst kan nyttja bandet. Möjligen kunde reserverade kanaler med unika tillstånd ge Sveriges Radio en möjlighet att sända från olika platser i landet med större säkerhet. Wifi tekniken avförs därför i detta sammanhang som ett alternativ.

3.1.7 Polling protokoll

Polling-protokoll är en vidareutveckling av Wifi och har en förbättrad kollisionshantering genom att en masterenhet bestämmer när andra enheter får sända. Det används utomhus och då antingen som punkt till punkt länk eller punkt till multipunkt. Systemet kan välja mellan 11 bestämda kanaler i 5 GHz bandet vilket den gör vid uppstart. Därefter använder den samma kanal. Skulle någon annan sändare komma in och störa signalen kan utrustningen dock gå in och välja en ny kanal med mindre störningar. Men sändning sker fortfarande vid behov, vilket gör att ökat antal användare försämrar systemets prestanda. Utrustningen använder oftast OFDM för att bättre klara flervägsutbredning. Precis som för WiFi utrustning ansluts enheterna vanligtvis till ett ethernet WAN eller LAN. Även denna teknik avfärdas i detta sammanhang då frekvensen är för hög för mobil sändning utan fri sikt. I ett parallellt examensarbete undersöks dock tekniken närmare för att eventuellt kunna användas mellan terminal och radiohuset.

3.2 Modulation

För att det skall vara möjligt att överföra en digital bitström måste ettorna och nollorna i strömmen kunna påverka radiosignalen så att den kan tolkas vid mottagaren, d.v.s. vi modulerar bärvågen. Nedan redovisas några av de vanligaste modulationsmetoderna.

3.2.1 PAM

PAM (Pulse Amplitude Modulation) är den enklaste typen av modulation där sändaren bara skickar ut pulser. Det kallas basbandsmodulation, utan någon fast bärvåg. Det finns även andra varianter där pulserna påverkas. I PDM påverkas bredden av pulserna och i PFM påverkas pulsernas repetitionsfrekvens. I PPM påverkas pulsernas position i pulståget. Tekniken används dock alltmer sällan och har ersatt med betydligt effektivare metoder.

3.2.2 ASK

ASK (Amplitude Shift Keying) är den enklaste varianten av bärvågsmodulation där ettorna och nollorna får påverka bärvågens amplitud. Den moduleringen är tekniskt sätt lätt att avkoda. Nackdelen är att den är känslig för störningar då amplitudnivån kan vara svår att tolka vid svag signal eller då yttre störningar påverkar signalen. Om man önskar att öka överföringshastigheten kan man låta varje amplitudnivå motsvara t.ex. 2 bitar i dataströmmen, d.v.s. antalet nivåer är $M = 4$. Sambandet mellan antalet bitar och modulation ges av

$$\log_2(M) = k \quad \text{Ekv. 3.1}$$

där k är antalet bitar. I tabell 3.1 framgår skillnaden mellan $M = 2$ och $M = 4$ där vi fördubblat överföringshastigheten vid $M = 4$.

| $M = 2$ | | $M = 4$ | |
|--------------|------|--------------|------|
| Amplitudnivå | Data | Amplitudnivå | Data |
| 1 | 0 | 1 | 00 |
| 2.0 | 1 | 1.33 | 01 |
| | | 1.66 | 10 |
| | | 2.0 | 11 |

Tabell 3.1 Visar hur data kan representeras av olika amplitudnivåer.

Enbart ASK används sällan vid högre överföringshastigheter. Däremot tillämpas det i andra modulationsmetoder, bl.a. i QAM som redovisas senare.

3.2.3 FSK

FSK (frequency shift keying) är ett sätt att förbättra störningsegenskaperna genom att använda FM (frekvens modulering) och påverka bärvågens frekvens inom ett begränsat område. På samma sätt som en viss amplitudnivå svarar mot ett visst bitmönster i ASK svarar här en viss frekvens mot ett datamönster. Ofta används en variant av FSK som heter MSK (Minimum Shift Keying) som innebär att frekvensskillnaden mellan symbolerna väljs så liten som möjligt samtidigt som man har konstant fas för minimalt sidespektra. Modulationen används oftast vid lägre överföringshastigheter < 1200 baud varför metoden inte är aktuell för Sveriges Radio [8].

3.2.4 PSK

PSK (Phase Shift Keying) är en vanligt förekommande modulationsmetod som har goda störegenskaper. Här påverkar bitströmmen fasläget på signalen. Metoden är relativt okänslig för störningar p.g.a. av att störningar sällan påverkar fasläget. Här används vanligtvis $M = 2$ till $M = 8$. En mycket vanlig modulationsmetod är QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) vilket motsvarar

$M = 4$ och innebär att fasen varierar mellan $\pm \frac{\pi}{4}$ och $\pm \frac{3\pi}{4}$.

En nackdel på PSK är att fasen mellan sändaren och mottagaren måste vara låst. En mottagare som inte känner till fasen kallas ickekoherent och en koherent mottagare känner till fasen. En ickekoherent mottagare måste avläsa

fasen t.ex. genom analys av bärvågen. Ett annat sätt att lösa problemet är att nyttja DPSK (Differentiell Phase Shift Keying), vilket innebär att man har föregående sända fasläge som referens. Tekniken kräver dock ca 3 dB bättre SNR men ger bättre egenskaper vid snabb fädning.

3.2.5 QAM

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) är en också en mycket vanligt förekommande modulationsmetod som är mycket effektiv. I radiosammanhang används den vanligtvis med $M = 4$ upp till $M = 256$. Det finns dock möjlighet att använda QAM ända upp till $M = 4096$ där 1 symbol då motsvarar 12 bitar. Metoden bygger på att både amplituden och fasen påverkas av bitströmmen. Nedan visas hur signalen för $M = 8$ ser ut.

| Bit value | Amplitude | Phase shift |
|-----------|-----------|-------------|
| 000 | 1 | None |
| 001 | 2 | None |
| 010 | 1 | 1/4 |
| 011 | 2 | 1/4 |
| 100 | 1 | 1/2 |
| 101 | 2 | 1/2 |
| 110 | 1 | 3/4 |
| 111 | 2 | 3/4 |

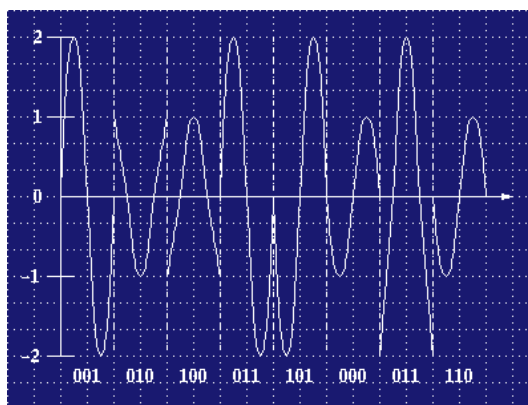


Fig. 3.1 Tabellen visar hur fasläge och amplitud svarar mot 3 bitar vid 8 QAM [9].

3.3 Frekvens

Som redovisats i kap 2.3.1 har olika frekvenser varierande utbrednings-egenskaper, oberoende om det är ett analogt eller digitalt system. För digitala överföringar med hög bithastighet används dock oftast höga frekvenser >1 GHz. Frekvenser upp till över 30 GHz förekommer. Detta beror främst på att man önskar höga överföringshastigheter som i sin tur kräver hög bandbredd. För att kunna använda en stor bandbredd är det ur frekvenssynpunkt mest ekonomiskt att använda höga frekvenser där det finns gott om bandbredd. Nackdelen är som tidigare redovisats att det krävs fri sikt mellan mottagare och sändare.

Sveriges Radio måste dock kunna sända även om det inte råder fri sikt varför det är nödvändigt att använda lägre frekvenser. Vilka frekvenser som kan vara aktuella för ett nytt digitalt system är idag svårt att säga. PTS (Post & Telestyrelsen) håller just nu (2005) på med en omfattande omläggning av kanaler i de låga frekvensbanden kring 400 MHz. Ur Sveriges Radios synvinkel finns det önskemål om att få frekvenser i området 330 – 470 MHz som gör det möjligt att använda en del av den befintliga antenn utrustning som finns i högmasterna. Dessa frekvenser har, som redovisats i kap 2.3.1 dessutom bra egenskaper för mobil sändning. Arbetet utgår därför ifrån att frekvenser i 400 MHz bandet används.

3.4 Bandbredd

Som framgår kan man få mycket bandbreddseffektiva system med QAM modulation men det finns emellertid nackdelar med att använda den mest effektiva kodningen. Svårigheten kommer när signalen skall avkodas. En effektiv kodning innebär att antalet nivåer på amplituden ökar samtidigt som antalet faslägen ökar. En naturlig följd av det blir att skillnaden mellan nivåerna och faslägena minskar och därmed blir svårare att tolka, speciellt vid brusiga förhållanden. Detta gör att effektiv kodning kan användas vid stabila överföringar och lågt brus medan enkla kodningar används vid sämre förhållande. Nackdelen med att använda en enkel kodning är att den kräver stor bandbredd för att överföra mycket data. Hartleys lag [8] beskriver den teoretiskt högsta överföringshastigheten vid en viss bandbredd och för ett visst M , utan brus.

$$C = 2B_2 \log m$$

Ekv. 3.2

där C = överföringskapacitet, B = bandbredd och m = antalet nivåer. I tabell 3.2 framgår vad som teoretiskt krävs för en E1 förbindelse 2 Mbit/s.

| Antalet nivåer | Bandbredd |
|----------------|-----------|
| $M = 2$ | 1 MHz |
| $M = 4$ | 500 kHz |
| $M = 8$ | 333 kHz |
| $M = 16$ | 250 kHz |
| $M = 32$ | 200 kHz |
| $M = 64$ | 167 kHz |

Tabell 3.2 Lågt M kräver stor bandbredd

Tyvärr så är detta bara teoretiska värden. I verkligheten finns det brus och det finns idag ingen teknologi som kan överföra data så effektivt som Hartleys lag visar. I praktiken krävs en bandbredd på ca 1.5 MHz vid $M = 4$ och 500 kHz vid $M = 32$.

Problemet är att frekvenstillgången av naturen är begränsad och det därför inte är möjligt att få hur mycket bandbredd som helst. Nedan visar tabellen vad några existerande system använder för bandbredder.

| System | Bandbredd |
|---------------------|-----------|
| Smalbandig komradio | 25 kHz |
| Dagens analoga HF | 200 kHz |
| Analog/Digital TV | 8 MHz |
| Trådlösa nätverk | 20 MHz |

Tabell 3.3 Några vanliga bandbredder i radiosystem

Som framgår av tabell 3.3 är det stor skillnad på hur mycket olika radiosystem kräver. Att få mycket bandbredd vid höga frekvenser är inte speciellt svårt men att få stora bandbredder vid frekvenser under 1 GHz är svårare. Vid inledande kontakter med PTS framgår att bandbredder över 1,75 MHz inte är

rimligt att få. Hur kanalstrukturen för ett digitalt system skulle kunna se ut redovisas i kap 4.4.

3.5 Digitalt signal brus förhållande

I analoga system påverkar signalstyrkan in i mottagaren hur bra SNR som går att få ut ur mottagaren. I digitala system påverkar signalstyrkan och därmed även SNR i mottagaren vilken överföringshastighet som är möjlig.

Med Shannons formel [8] går det att beräkna den maximala överföringshastigheten, C , vid ett visst SNR och en viss bandbredd.

$$C = B_2 \log\left(\frac{S}{N} + 1\right) \quad \text{Ekv. 3.3}$$

där B = bandbredd, S/N i kanalen anges i ggr.

Diagrammet nedan visar hur överföringshastigheten beror av signal brusavståndet för olika bandbredder. Bandbredderna nerifrån räknat är 250, 500, 750, 1000, 1500, 1750 kHz.

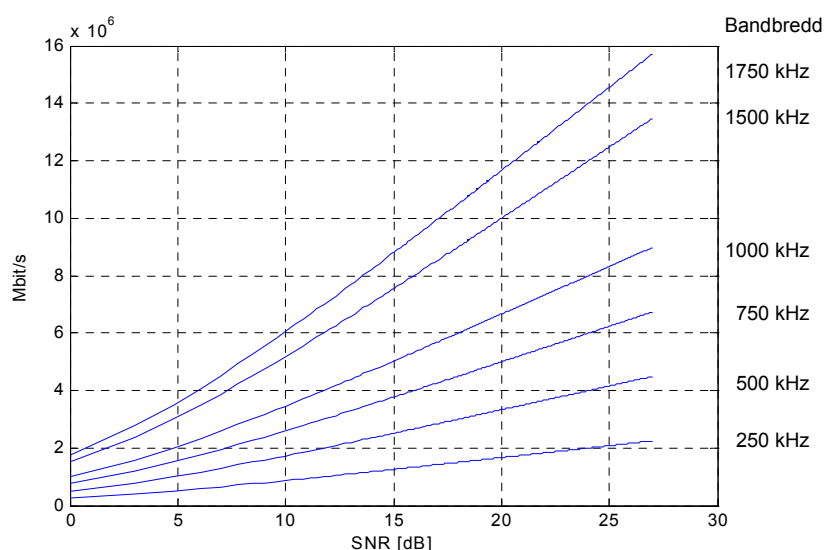


Fig. 3.2 Visar hur överföringshastigheten beror av bandbredd och SNR

Som framgår krävs högre signal-brusavstånd vid små bandbredder och mindre SNR vid stor bandbredd. Tabell 3.4 visar vad en 2 Mbit/s-överföring kräver för SNR vid olika bandbredder.

| Bandbredd | SNR |
|-----------|---------|
| 250 kHz | 24.6 dB |
| 500 kHz | 12.1 dB |
| 750 kHz | 7.51 dB |
| 1000 kHz | 4.96 dB |
| 1500 kHz | 1.98 dB |
| 1750 kHz | 0.97 dB |
| 2000 kHz | 0.14 dB |

Tabell 3.4 Sambandet mellan bandbredd och SNR i kanalen vid 2 Mbit/s

Som redovisats tidigare är dock dessa siffror enbart teoretiska och är mycket svåra för att inte säga omöjliga att åstadkomma i verkligheten. För att kunna förverkliga de ovan nämnda värdena måste helt ideala komponenter och system användas vilket inte finns.

Det finns även ett annat begrepp, E_b/N_0 , som används i digitala system för att ange kvaliteten i länken. Här är

$$E_b = \int_0^T (s_i)^2 dt \quad \text{Ekv. 3.4}$$

energin under ett symbolintervall ($0 \leq t \leq T$) och N_0 är brus tätheten [10].

Det anger förenklat energiinnehållet i varje bit som skickas i förhållande till bruset och säger därför mer om hur mycket data som kan skickas över länken än ett signal brus förhållande.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R}{N_R * 2 * \log_2 M} = \frac{SNR}{2 * \log_2 M} \quad \text{Ekv. 3.5}$$

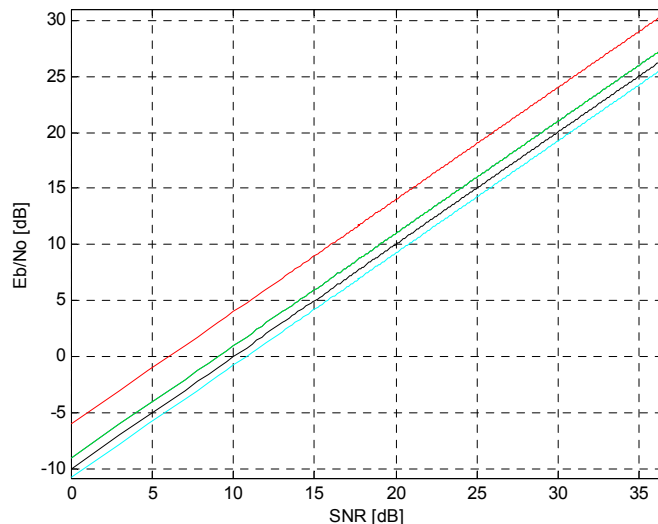


Fig. 3.3 Röd $M = 4$, Grön $M = 16$, Svart $M = 32$, Ljusblå $M = 64$

Ett annat mått av intresse är förhållandet mellan varje sänd symbol och bruset,

$$\text{d.v.s. } \frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + \log_{10}(\log_2 M) \quad \text{Ekv. 3.6}$$

där E_s är symbolenergin i den önskade signalen [10].

$$M = 2 \Rightarrow + 0 \text{ dB}$$

$$M = 4 \Rightarrow + 0.30 \text{ dB}$$

$$M = 16 \Rightarrow + 0.60 \text{ dB}$$

$$M = 32 \Rightarrow + 0.70 \text{ dB}$$

$$M = 64 \Rightarrow + 0.78 \text{ dB}$$

$$M = 256 \Rightarrow + 0.90 \text{ dB}$$

3.6 Bitfelssannolikhet

När signalstyrkan minskar och därmed även SNR i kanalen, så kommer också E_b/N_0 att försämrats. När E_b/N_0 minskar kommer databitar som skickas över länken gradvis att börja misstolkas av mottagaren, vi får bitfel i överföringen. Beroende på hur avancerad modulation som används kommer andelen bitfel att variera.

3.6.1 Definition bitfel

Vilken felsannolikhet en digital överföring får beror dels på vilket SNR som finns i kanalen samt vilken modulationsmetod som används. Sannolikheten för att en ”nolla” detekteras som en ”etta” ges av sambandet

$$P(0|1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(y+A)^2}{2\sigma^2}} dy \quad \text{Ekv. 3.7}$$

där y är brusets amplitud, A är amplituden för ”ettor” och ”nollor” och σ är effektivvärdet (standardavvikelse). På samma sätt blir slh att ”etta” tolkas som ”nolla”

$$P(1|0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(y-A)^2}{2\sigma^2}} dy \quad \text{Ekv. 3.8}$$

Den totala sannolikheten för fel blir därför

$$P = P(1)P(0|1) + P(0)P(1|0) \quad \text{Ekv. 3.9}$$

Om vi antar att sannolikheten för att en ”nolla” kommer är lika som för att en ”etta” kommer i bitströmmen kan vi förenkla uttrycket för sannolikheten för fel till

$$P(1|0) = P(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{A/\sigma}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad \text{Ekv. 3.10}$$

Den totala sannolikheten för fel i överföringen betecknas P_e och p.g.a. symmetrin kan vi skriva

$$P_e = \frac{P(0|1)}{2} + \frac{P(1|0)}{2} = \frac{Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)}{2} + \frac{Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)}{2} = Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad \text{Ekv. 3.11}$$

Värdet av funktionen $Q(\cdot)$ kan antingen beräknas eller hämtas direkt från tabellen i kap 8.1, se bilaga. Med samma Q funktion går det att beräkna bitfelssannolikheten för olika modulationsmetoder. Ett urval visas nedan.

3.6.2 Bitfel för PSK

Bitfelssannolikheten för en koherent PSK demodulering, inkluderat QPSK

$$P_{e_{PSK}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad \text{Ekv. 3.12}$$

Bitfelssannolikheten för DPSK demodulering (Differentiell PSK = fasläget ändras om biten är skild från föregående sända bit och ändras utifrån föregående fas)

$$P_{e_{DFS}} = \frac{1}{2} e^{-E_b / N_0} \quad \text{Ekv. 3.13}$$

Diagrammet visar en sammanställning av några intressanta former av PSK.

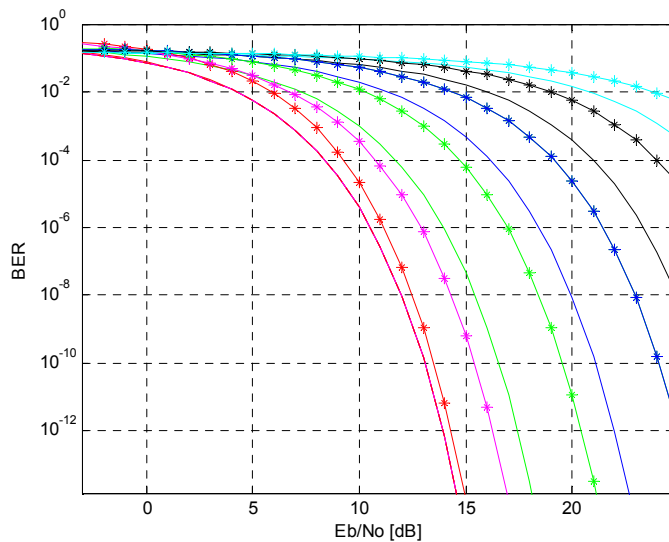


Fig. 3.4 Koherent PSK - Helt dragen linje, Differentiell icke koherent PSK - Stjärnlinje Röd $M=2$, Lila $M=4$, Grön $M=8$, Blå $M=16$, Svart $M=32$, Ljusblå $M=64$

Den lila markeringen för PSK $M=4$ koherent detektering motsvarar den vanligt förekommande QPSK moduleringen som har 4 faslägen. Observera att Koherent PSK $M=2$ är lika vid $M=4$, heldragen röd-lila linjen.

3.6.3 Bitfel för QAM

Att beräkna bitfelssannolikheten för QAM är något mer komplicerat än för de övriga modulationsformerna.

$$P_{e_{M-QAM}} = 2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2(M-1)}} k \gamma_b \right) \text{ där } \gamma_b = \frac{E_b}{N_0} \quad \text{Ekv. 3.14}$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x) \quad \text{Ekv. 3.15}$$

vi får då

$$P_{e_{M-QAM}} = 2 * 2 * Q \left(\sqrt{2} * \sqrt{\frac{3}{2(M-1)}} k \gamma_b \right) \quad \text{Ekv. 3.16}$$

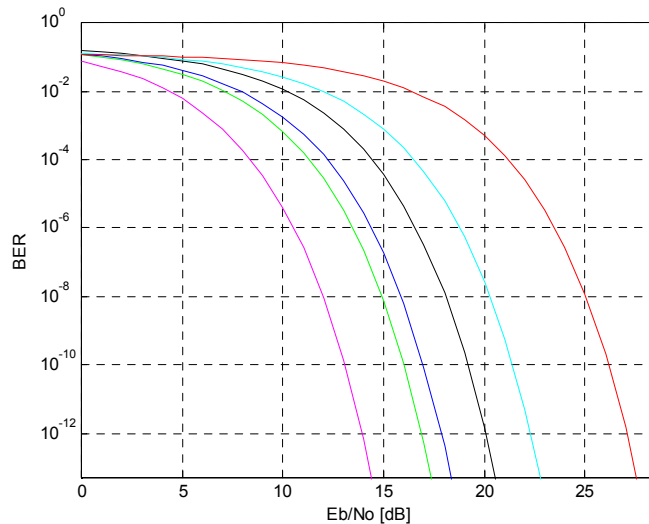


Fig. 3.5 Bitfelssannolikhet för koherent QAM. Lila $M=4$, Grön $M=8$, Blå $M=16$, Svart $M=32$, Ljusblå $M=64$, Röd $M=256$

En jämförelse med PSK visar att för $M=4$ uppvisar de både modulationssätten samma prestanda vilket beror på att 4 QAM inte utnyttjar fasan och därmed blir identisk med QPSK. Däremot uppvisar QAM bättre prestanda vid $M=8$ och högre. PSK med $M \leq 4$ och QAM med $M \geq 4$ är de modulationer som kommer närmast Shannons gräns i överföringshastighet i förhållande till brus och bandbredd.

3.6.4 Bitfel vid linjärt PCM-ljud

Hur kommer då bitfel att påverka en ljudöverföring? Ett linjärt PCM-kodat ljud med 20 bitars ordlängd och 48 kHz samplingsfrekvens är inte speciellt känsligt för bitfel. Varje sekund avkodas $48\,000 * 20$ bitar = 960 000 bitar.

Det innebär att om 1 bit är fel bland de nästan 1 miljon bitarna så kommer vi inte hinna uppfatta felet. Men hur mycket vi kommer att märka felet beror också på var i 20 bitars ordet felet uppträder. Om felet uppstår på den mest signifikanta biten blir det hörbara felet större än om den minst signifikanta biten blir felaktig. Under arbetet har undersökningar gjorts om var gränsen går för att bitfelen skall bli så allvarliga att det anses som störningar i ljudet. Det naturliga valet var i detta fall att undersöka hur ljud som skickas över en J.57 kodare påverkas av bitfel. Vi använde en Digital Vision kodare och avkodare för att skicka en linjär ljudström via en E1-förbindelse. I serie anslöts en bitfelsgenerator där det gradvis går att inducera slumpmässiga fel i förbindelsen. Mätningar visar då att gränsen går vid $BER = 2 \cdot 10^{-3}$. Därefter börjar störningar framträda i ljudet. Vad som är intressant här är att J.57-standarden innehåller ett visst felskydd som klarar att rätta vissa fel i förbindelsen. Digital Vision har dessutom byggt in ett ytterligare skydd som klarar att interpolera det linjära ljudet vid.

3.6.5 Bitfel vid bitreducerat ljud

När samma prov som ovan gjordes med bitreducerat ljud, här i form av DTS kodat 5.1 ljud, blev resultatet att det är betydligt mycket känsligare för bitfel. Testet genomfördes genom att en DTS kodare kopplades in på AES/EBU ingången på J.57 kodaren och därefter introducerades bitfel i överföringen. Resultatet blev att störningar uppkom redan vid $BER = 2 \cdot 10^{-7}$. De störningar som uppstod var dessutom av kraftigare karaktär där tjut och knäppar framträdde betydligt kraftigare. Vid endast en ytterst blygsam ökning av bitfelhalten tystnar ljudet helt och länken blir helt oanvändbar för DTS ljud. Anledningen till att en betydligt bättre länk krävs är dels att varje bit i dataströmmen motsvarar längre ljudsekvenser och därmed blir varje störning kraftigare. Dessutom kan inte den inbyggda interpoleringen i avkodaren användas då den enbart är konstruerad för linjärt ljud.

För MPEG Layer II-ljud genomfördes inga egna tester för vilket BER värde som krävs. Vi använder istället de rekommendationer som finns för Digital Audio Broadcasting, DAB [2]. Här framgår att rekommendationen för MPEG Layer II ljud är ett BER värde på maximalt 10^{-4} .

3.7 Fädning

Fädning är ett stort problem inom radiokommunikation, både inom analog och digitala system. Fädning innebär att signalstyrkan p.g.a. olika faktorer tidvis sjunker i mottagaren, så att det blir svårare att detektera signalen.

3.7.1 Riceanfädning

Riceanfädning uppstår när det finns en stark huvudsignal men även en rad andra reflekterade signaler. Vi har flervägsutbredning. Flervägsutbredning innebär att sändarens utsignal kommer till mottagaren på flera olika sätt med olika långa gångvägar. Resultatet blir att samma signal kommer fram till mottagaren flera gånger men vid olika tidpunkter. En illustration av hur en radiosignals påverkan av flervägsutbredning visas i figuren nedan.

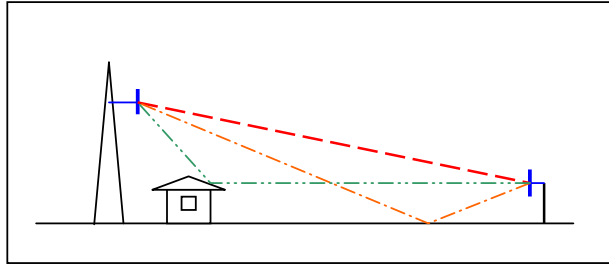


Fig. 3.6 visar hur signalen kan reflekteras och på det viset kommer mottagarantennen nås av flera signaler som kommer fram vid olika tidpunkter

En analys av insignalen i mottagarantennen skulle kunna se ut som följande: 3 signaler når mottagaren med olika fas och amplitud. Som framgår av bilden blir den totala signalen (blå) mindre än direktstrålen från sändarantennen. Beroende på hur terrängen ser ut kan signalen bli alltifrån helt utsläckt till många gånger starkare än direktsignalen.

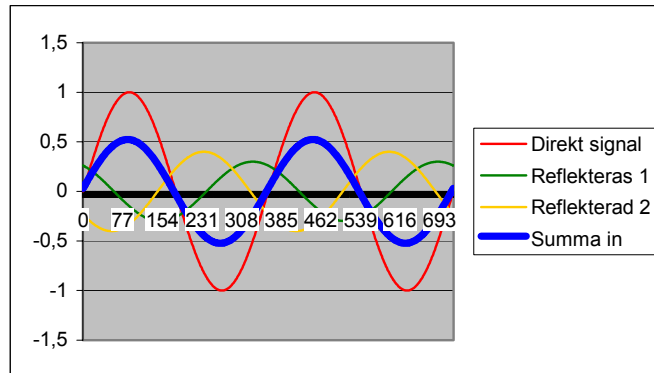


Fig. 3.7 Den blå linjen visar summan av huvudsignalen och de reflekterade. Observera att den blå är mindre än direktsignalen.

I en analog TV syns flervägsutbredningen i form av skuggor på bilden. I ett digitalt system innebär det att symbolerna i signalen kan komma att överlappa varandra och därmed bli svåra att tolka. Vi får intersymbolinterferens. Hur känslig en radiolänk är för flervägsutbredning beror på symbolhastigheten och hur många modulationsnivåer som används. I utomhusmiljöer är vanligtvis reflexerna i storleksordning 10^{-7} till 10^{-5} sek [11] vilket motsvarar 30 till 30000 m gångvägsskillnad. I inomhusmiljöer är reflexerna i storleksordning 10^{-9} till 10^{-7} . Vid mätningar på den befintliga HF utrustningen framkom att reflexerna varierar mellan $9 \cdot 10^{-7}$ till $2 \cdot 10^{-6}$ sek vilket då motsvarar 270 till 540 m. Observera att detta naturligtvis endast gällde vårt testområde. För att helt undvika problem p.g.a. att symboler överlappar varandra innebär det att symbolhastigheten inte får överstiga 500 000 symboler/sek. Går man på det värsta fallet 10^{-5} innebär det att den högsta symbolhastighet blir 100 000 symboler/sek. Detta blir naturligtvis en begränsning som gör att kapaciteten på länken sjunker. Om QPSK används innebär det en maxhastighet på 200 kbit/s och för 16 QAM blir hastigheten maximalt 400 kbit/s osv. Önskar man högre hastigheter måste man acceptera att flervägsutbredning kan uppstå och

hantera det på annat sätt t.ex. genom att välja en modulationsform som är okänslig mot flervägsutbredning, se vidare i rapporten.

3.7.2 Rayleighfädning

Rayleighfädning uppstår främst då det inte är fri sikt mellan mottagaren och sändare. För att kunna sända över en Rayleighfädande kanal måste man ha ett betydligt bättre Eb/No för att kunna garantera en bra förbindelse. För koherent PSK kan BER värdet beräknas ur

$$P_f = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{1 + \gamma_0}} \right) \quad \text{Ekv. 3.17}$$

där γ_0 är väntevärdet av signal brusförhållandet [4].

Bitfels sannolikheten BER för DPSK i en Rayleigh fädande kanal är

$$P_f = \frac{1}{2(1 + \gamma_0)} \quad \text{Ekv. 3.18}$$

Fig. 3.8 visar resultatet av en simulering i Matlab hur BER värdet beror av Eb/No i en Rayleigh fädande kanal.

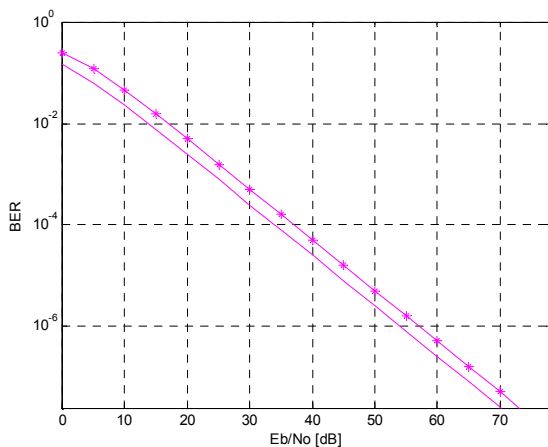


Fig. 3.8 visar vilket Eb/No som krävs vid en fädande kanal. Heldragen linje är 4PSK och stjärnlinje 4DPSK.

En jämförelse med en icke fädande kanal, se fig. 3.4, visar att Eb/No måste öka med ca 40 dB [3].

3.7.3 Tidstillgängligheten

Hur tillförlitligt systemet är beror inte bara på hur bra BER värde som erhålls i kanalen. Det är också viktigt att veta hur systemet beter sig under en längre period, d.v.s. tidstillgängligheten. I en Rayleighfädande kanal kan tidstillgängligheten beräknas genom fördelningsfunktionen

$$P(\gamma) = 1 - e^{-\gamma/\gamma_0} \quad \text{Ekv. 3.19}$$

där γ är det SNR som mottagaren kräver för ett visst BER värde och γ_0 är det SNR som krävs för en viss tillgänglighet. Om tillgängligheten T anges i procent motsvarar det fördelningsfunktionen enligt

$$P(\gamma) = 1 - \frac{T}{100} \quad \text{Ekv. 3.20}$$

Om vi för QPSK önskar en bitfelshalt på minst $2 \cdot 10^{-7}$ krävs ett SNR på ca 18 dB = 63 ggr. Sveriges Radio kräver enligt kravspecifikationen en tidstillgänglighet på 99.9 % vilket då ger $P(\gamma) = 0.001$. Vi får då att $\gamma_0 = 62968$ vilket motsvarar SNR på 48 dB. Det krävs alltså en fädningsmarginal på $48 - 18 = 30$ dB för att klara 99.9 % tillgänglighet. En tabell visar sambandet

| Tillgänglighet | Fädningsmarginal |
|----------------|------------------|
| 95 % | 13 dB |
| 99 % | 20 dB |
| 99.9 % | 30 dB |
| 99.99 % | 40 dB |

Tabell 3.5 Sambandet mellan tillgänglighet och fädningsmarginal för Rayleighfädning.

Motsvarande marginaler gäller även för andra modulationer och bitfelskrav.

3.7.4 Skuggfädning

Skuggfädning är, till skillnad från Rayleigh och Riceanfädning, långsam och uppstår av att berg, byggnader etc. står i vägen mellan sändaren och mottagaren så att fresnelzonen inte är helt fri. För att få täckning ”bakom” ett hinder i skuggområdet är enda lösningen, förutom att sätta upp ytterligare terminaler, att använda en extra hög effekt. γ_T . Fädningsmarginalen betecknas k_f . Tidstillgängligheten kan då beräknas enligt

$$T_f(\gamma_T) = T_f\left(\frac{\gamma_0}{k_f}\right) = 1 - P_r\left(\frac{\gamma_0}{k_f}\right) \quad \text{Ekv. 3.21}$$

Om vi skriver uttrycken i dB där fädningsmarginalen $Z = 10 \cdot \log k_f$ och den lokala medelsignaleffekten är $S = 10 \lg \gamma_0$ får vi att

$$T_f = P_r[S \geq S_0 - Z] = \phi\left(\frac{Z}{\sigma_s}\right) \quad \text{Ekv. 3.22}$$

Här är S_0 medelvärdet för den normalfördelade medelsignaleffekt i dB vilken

kan beräknas enligt $S_0 = 10 * \lg\left(\frac{C}{r^\alpha}\right)$ Ekv. 3.23

där $\alpha \approx 3 - 5$ vilket är en empiriskt bestämd konstant. För 95 % tillgänglighet får vi enligt normalfördelningens fördelningsfunktion $\phi\left(\frac{Z}{\sigma_s}\right)$ att $\frac{Z}{\sigma_s} \geq 1.64$.

Om vi antar att standardavvikelsen för vårt system är 5.5 dB kommer vi att behöva en fädningsmarginal för respektive tillgänglighet enligt tabell 3.6.

| Tidstillgänglighet | Fädningsmarginal |
|--------------------|--------------------------------------------|
| 95 % | $1.64 * 5.5 = 9.0 \text{ dB}$ |
| 99 % | $2.33 * 5.5 \text{ dB} = 12.85 \text{ dB}$ |
| 99.9 % | $3.08 * 5.5 \text{ dB} = 16.94 \text{ dB}$ |
| 99.99 % | $3.62 * 5.5 \text{ dB} = 19.91 \text{ dB}$ |

Tabell 3.6 Fädningsmarginal för skuggfädnings

Om vi i detta arbete kan använda skuggfädnings med begreppet tidstillgänglighet är tveksamt då sändningsfordonet oftast står stilla vid sändning. Men vi inser att det krävs en ytterligare marginal för att kunna sända från platser som ligger ”bakom” större föremål. Enligt rekommendationer från 4 RF skall en extra marginal tas till enligt figuren nedan beroende på terrängen.

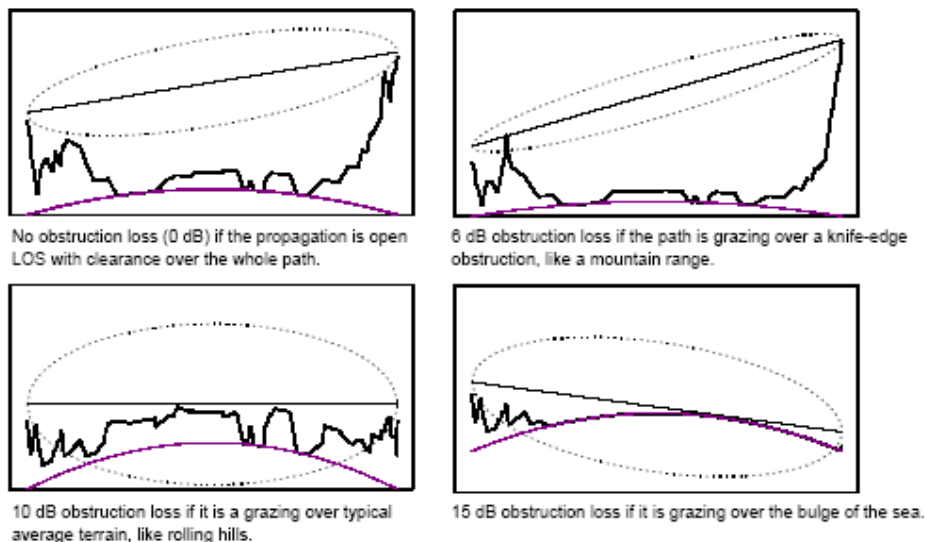


Fig. 3.9 Rekommendation av extra skuggmarginal för olika sändningsförhållande.

Som framgår krävs det en extra marginal i storleksordningen 15 db då fresnelzonen inte är helt fri. Vi räknar med en marginal på 17 dB för att förbättra täckningen bakom större hinder, vilket stämmer relativt bra med 4 RF:s rekommendationer.

3.7.5 Simulering av fädnings

I Matlab finns möjlighet att i Simulink simulera hur olika modulationsmetoder reagerar på bl.a. fädnings, flervägsutbredning och brus. Modellen nedan visar

hur ett fullständigt system ser ut med en slumpmässig bitströmsgenerator, QPSK modulationen, radioöverföringen och demodulationen. Därefter jämförs bitströmmen direkt från generatoren och bitströmmen som passerat radioöverföringen. På det viset går det att beräkna hur många fel som uppstår i systemet, SER värdet (Symbol Error Rate).

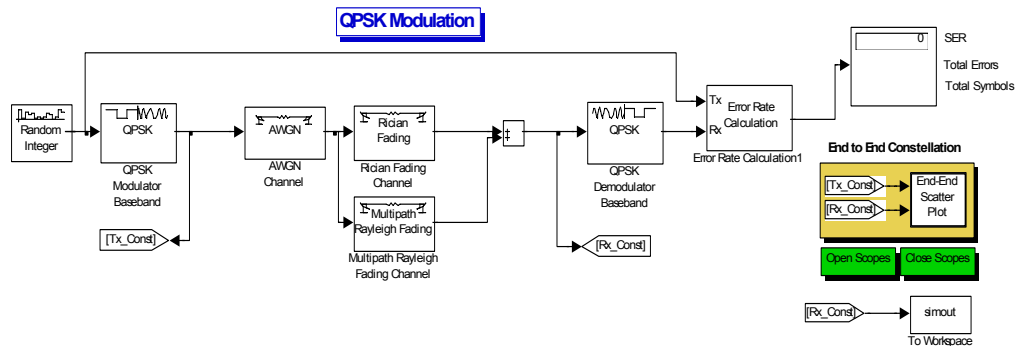
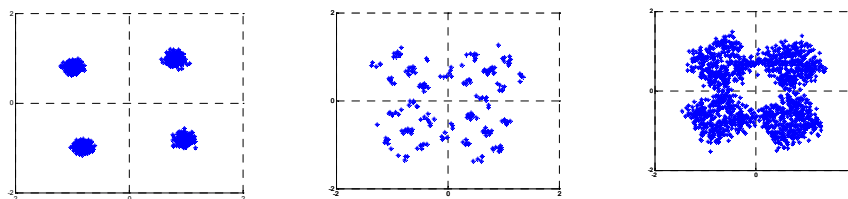


Fig. 3.10 Modell för simulering av brus, fädning och flervägsutbredning.

I fig. 3.11 visas hur en QPSK signal på 2 Mbit/s påverkas av en stark flervägsutbredning, -5 dB under huvudsignalen, där respektive fördröjningen varieras mellan $1e-7$, $1e-6$ och $1e-5$ sek. $E_b/N_0 = 20$ dB i samtliga fall.



Delay vector 1: $1e-7$

SER: 0

Delay vector 1: $1e-6$

SER: $3.9 \cdot 10^{-4}$

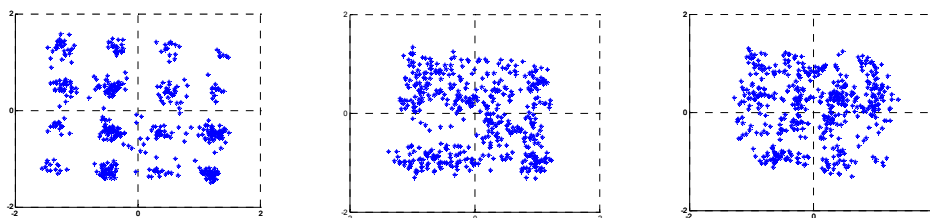
Delay vector 1: $1e-5$

SER: $9.0 \cdot 10^{-3}$

Fig. 3.11 Diagrammen visar hur QPSK signalens 4 faslägen ser ut vid olika stora gångvägsskillnader mellan huvudsignalen och den reflekterade. När signalen störs av reflekterade signaler riskerar fasen att hamna i fel kvadrant vilket resulterar i symbolfel.

Det framgår då att flervägsutbredning som är i storleksordning $1e-7$ inte orsakat någon skada på avkodningen, samtliga faslägen ligger inom rätt kvadrant. En fördröjning på $1e-5$ sek påverkar däremot signalen kraftigare och kan gör den oanvändbar. En simulering med samma tidsskillnad men med 2 dB skillnad mellan huvudsignalen och den reflekterade gav ett SER värde på 0.1, vilket innebär att var tionde symbol tolkades fel. Det är alltså även styrkan av flervägsutbredningen som påverkar resultatet.

Motsvarande simuleringar på en 16 QAM signal genomfördes. För att kunna jämföra respektive modulationens känslighet för flervägsutbredning höjdes här E_b/N_0 till 25 dB. Trots det är det nödvändigt att minska flervägsutbredningens nivå till -11 dB under huvudsignalen för att få en användbar signal, detta är 6 dB lägre än för QPSK. Resultatet framgår i fig. 3.12.



Delay vector 1: $1e-7$

SER: $1.6 \cdot 10^{-4}$

Delay vector 1: $1e-6$

SER: $4.1 \cdot 10^{-3}$

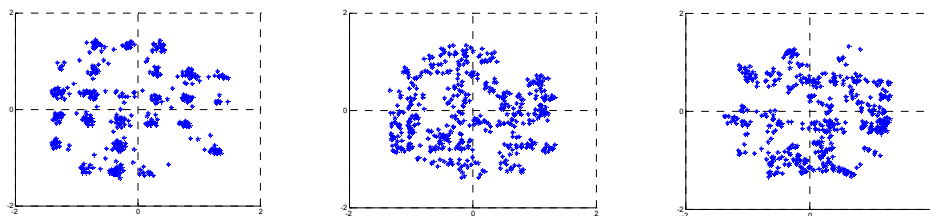
Delay vector 1: $1e-5$

SER: $5.5 \cdot 10^{-3}$

Fig. 3.12 visar hur flervägsutbredningen påverkar en 16 QAM signal

16 QAM är alltså betydligt känsligare för flervägsutbredning samtidigt som den kräver ett bättre Eb/No för att fungera. Anledningen är att 16 QAM har fler faslägen samtidigt som det förekommer flera amplitudnivåer att tolka. Resultatet blir att marginalerna minskar för varje symbol.

Motsvarande simuleringar på 32 QAM gjordes också. Här är Eb/No = 28 dB, d.v.s. 3 dB bättre än för 16 QAM. Flervägsutbredningen är justerad till -14 dB i jämförelse med huvudsignalen, d.v.s. 3 dB lägre än för 16 QAM.



Delay vector 1: $1e-7$

SER: $4.4 \cdot 10^{-4}$

Delay vector 1: $1e-6$

SER: $4.5 \cdot 10^{-3}$

Delay vector 1: $1e-5$

SER: $5.5 \cdot 10^{-3}$

Fig. 3.13 visar hur flervägsutbredningen påverkar en 32 QAM signal

Som framgår är flervägsutbredning ett stort problem som kan orsaka dåliga SER värden även då man har ett bra SNR. För Sveriges Radio som ska sända från olika platser med den digitala utrustningen är det därför viktigt att välja en modulationsmetod som inte är så känslig för flervägsutbredning. Om man enbart beaktar flervägsutbredning blir valet QPSK som är den modulation som är mest okänslig bland de provade. Att välja 2PSK eller 2FSK ger ännu bättre prestanda men gör att överföringshastigheten sjunker till hälften.

Simuleringar har även utförts på DPSK för att se om modulationen innebär några avgörande förbättringar. Några förbättringar går dock inte att påvisa vid kraftigare flervägsutbredning. Resultatet är inte förvånande då den främsta fördelen finns vid snabba fädningsförlopp, där det annars skulle vara svårt att avläsa fasläget. För Sveriges Radios del finns därför inga fördelar med att använda DPSK eftersom sändningsfordonet kommer att stå stationärt under sändning.

3.8 Diversitetssystem

Ett sätt att undvika fädning är att använda diversitetssystem. Diversitet innebär att det finns alternativa sätt att ta emot en signal på. Systemet kan antingen välja den bästa signalen eller summera signalen på något sätt och på det viset erhålla en bättre signal. Det finns även flera typer av diversitetssystem som arbetar på olika sätt och i olika dimensioner [4].

3.8.1 Rumsdiversitet

Rumsdiversitet innebär att man använder flera antenner vid mottagaren för att kunna antingen kombinera ihop antenssignalerna eller för att kunna välja den antenn som för stunden fungerar bäst. Det gäller här att antennerna sitter på sådant avstånd att de inte korrelerar med varandra. Det som avgör minsta avståndet mellan antennerna är våglängden och det räcker oftast med att avståndet är knappt en halv våglängd. För 400 MHz blir avståndet ca 37 cm men ett större avstånd förbättrar resultatet om än marginellt. Fördelen med rumsdiversitet är att det inte tar upp någon större bandbredd eller försämrar överföringskapaciteten. Hur diversitet ska lösas i Sveriges Radios fall är något som vi inte tar upp i detta examensarbete. Vi kan konstatera att det troligtvis krävs någon aktiv utrustning uppe i högmasten för att slippa flera kablar ner i masten. Huruvida det finns utrustning som lämpar sig för utomhusmontering lämnas vidare för ytterligare utvärdering, men tekniken får anses intressant i dessa sammanhang. De antenner som sitter där idag är dock inte monterade för att fungera som diversitetsantennerna och behöver därmed justeras alternativt att nya antenner monteras.

3.8.2 Frekvensdiversitet

Frekvensdiversitet innebär att samma information överförs på två olika frekvenser. Här finns det krav om att det inte får finnas korrelation mellan frekvenserna där ökat frekvensavstånd minskar korrelationen. Nackdelen med frekvensdiversitet är att det krävs stor bandbredd eftersom samma material skall sändas på två skilda frekvenser. Det behövs även dubbla sändare och mottagare. Tekniken ses därför inte som ett alternativ för Sveriges Radio.

3.8.3 Tidsdiversitet

Tidsdiversitet innebär att samma information skickas vid olika tidpunkter. Den största vinsten erhålls över en fädande kanal som ändras snabbt i tiden. Nackdelen är att det kan uppstå fördröjningar som för Sveriges Radio inte är lämpliga vid direktsändning samtidigt som överföringshastigheten sjunker.

3.8.4 Polarisationsdiversitet

Polarisationsdiversitet använder O-korrelationen mellan en horisontellt sänd signal med en vertikal signal. Det är alltså skillnaden i utbredningsegenskaperna hos en horisontell och vertikal signal som utnyttjas. Nackdelar med tekniken är man förlorar 3 dB i antenssystemet samt att det krävs en mer komplicerad antennkonstruktion. Tekniken kan till viss del tillämpas manuellt genom att vid montering prova att vrida sändarantennen 90°. Det är dock under förutsättning att mottagarantennen också kan vridas eller klarar båda polarisationerna. Här krävs alltså byta av dagens befintliga mottagarantennerna.

3.8.5 Sammanvägningsmetoder

Det finns flera olika typer av metoder att hantera de olika signalerna från signalkällorna i mottagaren, som kan vara från 2 och uppåt, för att erhålla den bästa signalen. Den enklaste är valdiversitet där mottagaren helt enkelt väljer ut signalen med det bästa SNR. En mer effektiv metod är optimalviktsdiversitet som fasutjämnar och summerar alla signaler. Den metoden är dock ganska avancerad och komplex. Likaviktsdiversitet är därför ett alternativ som inte ständigt känner av varje signal, här är sammanvägningsfaktorn konstant. Vilken typ man bör välja tar vi inte ställning till här utan lämnar det till tillverkarna för mottagare. Det som är intressant är vilken förbättring diversitet som teknik kan innebära.

3.8.6 Tidstillgänglighets förbättring

I avsnitt 3.7.3 beräknade vi tidstillgängligheten i en Rayleigh fäddande kanal. Om diversitet används kan tillgängligheten beräknas ur fördelningsfunktionen enligt

$$P(\gamma) = (1 - e^{-\gamma/\gamma_0})^M \quad \text{Ekv. 3.24}$$

där M är antalet grenar eller signalkällor. Tabell 3.7 visar hur ökat M minskar kravet på fädningsmarginal för Rayleighfäddning.

| Tillgänglighet | Fädningsmarginal | | | |
|----------------|------------------|---------|---------|--------|
| | M = 1 | M = 2 | M = 3 | M = 4 |
| 95 % | 13 dB | 6.0 dB | 3.3 dB | 1.9 dB |
| 99 % | 20 dB | 9.8 dB | 6.2 dB | 4.2 dB |
| 99.9 % | 30 dB | 14.9 dB | 9.8 dB | 7.1 dB |
| 99.99 % | 40 dB | 20.0 dB | 13.2 dB | 9.8 dB |

Tabell 3.7 visar hur ökat antal grenar M minskar kravet på fädningsmarginal. M = 1 innebär att diversitet inte tillämpas.

För att uppnå dessa vinster gäller det att de olika grenarna inte är korrelerade. Vid rumsdiversitet innebär det t.ex. att mottagarantennerna skall vara så långt ifrån varandra att de blir påverkade av fäddningen på olika sätt. Redan vid en halv våglängd av bärvågsfrekvensen uppnås relativt bra O-korrelation mellan antennerna. Ett större avstånd mellan antennerna förbättrar dock resultatet ytterligare. För Sveriges Radio, som har krav på 99.9 % tillgänglighet, går det att halvera kravet på fädningsmarginal från 30 dB till 15 dB genom att införa diversitet med 2 grenar. Vinsten varierar dock för olika system vilket framgår senare i rapporten kap 5.3. Notera här att de befintliga antensystemen troligtvis inte går att använda i befintligt skick i de fall diversitet används.

3.9 Felskydd

För att förbättra egenskaperna hos en länk används oftast ett felskydd i länkar som gör att felaktiga ”bitar” kan rättas i efterhand. Kortfattat innebär det att sändaren skickar med extra information som gör att mottagaren kan kontrollera om det data som tas emot är korrekt. Om den upptäcker felaktig data finns det extrainformation som gör att den kan reparera det felaktiga data.

Generellt gäller att desto bättre felskydd som önskas, desto mer extra data måste skickas.

Ett vanligt förekommande felskydd i radiokommunikation är Reed Solomon som finns i ett antal varianter beroende av vilket felskydd som önskas. RS(255,223) är en populär kod för 8 bitars symboler ($s = 8$) som har nyttodata $k = 223$ st symboler vid en totalstorlek på $n = 255$ symboler [12]. Det innebär att antalet symboler som används för att reparera felaktiga symboler är $2t = 32$ där t är antalet symboler som kan rättas. Den maximala längden n ges av

$$n = 2^s - 1 \quad \text{Ekv. 3.25}$$

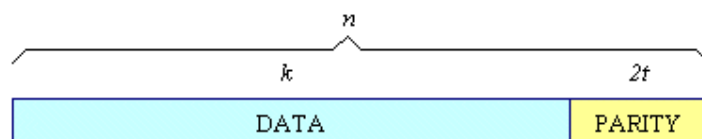


Fig. 3.14 Illustration av Reed Solomen felskydd

Ett skydd av den här typen förbättrar BER värdet i en överföring och kan därmed förbättra mottagarens känslighet med upp till 3 dB, detta kallas "coding gain".

3.10 Datapaketering

När data skall skickas över en digital länk måste informationen packas i något format som mottagaren kan hantera. De vanligaste formaten är PDH och SDH som båda utvecklades av teleindustrin som hade behov av att flera små dataströmmar på vardera 64 kbit/s (1 DS0) skulle kunna överföras i en stor dataström t.ex. en E1 på 2.048 Mbit/s. Tidsmultiplexering tillämpas.

3.10.1 PDH

PDH som betyder Plesiochron Digital Hierarki är det ett protokoll som utvecklades på 50-talet och används för att skicka digital information över främst tråd och radio länkar. Det används i länksammanhang främst i hastigheter från en E1 förbindelse på 2.048 Mbit/s upp till ca 34.36 Mbit/s men klarar upp till 565 Mbit/s. Protokollet visade sig dock snart ha sina brister i och med att fiberlänkar började användas som kunde skicka större mängd data. För Sveriges Radio är länkar med PDH protokollet ett bra val då kravspecifikationen innehåller en 2.048 Mbit/s förbindelse.

3.10.2 SDH

För att klara de högre hastigheterna utvecklades SDH Synkron Digital Hierarki. Protokollet är snarlikt PDH men klarar högre hastigheter där den grundläggande ramstrukturen heter STM (Synkron Transport Module) och börjar med STM-1 som är 155.52 Mbit/s. Vidare finns STM-4 (622.08 Mbit/s) och STM-16 (2488.32 Mbit/s).

3.10.3 Ethernet

En annat sätt att paketera en dataström är att använda Ethernet. Systemet bygger på att dataströmmen paketeras i små paket på upp till 1500 byte och

skickas när ett paket är fyllt alternativt när en timer i systemet gått ut. Ethernet används i LAN (Local Area Network) och WAN (Wide Area Network) där IP och TCP används som nästkommande nivåer. Här används inte tidsmultiplexering för att styra data till specifika destinationer. Istället får varje datapaket en adress som anger destinationen. En stor nackdel blir då att det inte går att garantera någon överföringshastighet. Fördelen är att tekniken är flexibel och dynamisk. För Sveriges Radio är detta intressant för att överföra ren intern datainformation i form av intranät och liknande. Det är även möjligt att skicka ljud över en sådan förbindelse. Flera nya system har utvecklats för att skicka ljud över Ethernet, både hårdvarukodare samt mjukvaror som körs i datorer.

4 Systemdimensionering

Enligt kravspecifikationen skall täckningen för det digitala systemet minst vara lika bra som det analoga. Med de faktorer som redovisats ovan går det att teoretiskt beräkna hur ett system bör se ut.

4.1 Länkbudget

Genom att göra en länkbudget har vi möjlighet att dimensionera hur stor uteffekt som sändarens måste ge, vilken modulation som är lämpligast, vilka antennkonstruktioner som är nödvändiga osv.

I kravspecifikationen framgår vilken täckning som systemet måste ha och med vilken kvalitet som det skall vara möjligt att sända med från respektive plats. Det största täckningen har det analoga systemet då SNR för ljudet är 40 dB vilket erhålls vid ca -94 dBm signalstyrka in i mottagaren. I simuleringen i fig. 2.4 ser vi att yttäckningen i testområdet är 70.8 %. För ett digitalt system är kravet att det minst skall gå att överföra en stereo signal inom samma täckningsområde. Det innebär konkret att det måste gå att överföra en 2.048 Mbit/s dataström med ett bitfel på maximalt $2 \cdot 10^{-3}$ alternativt en 384 kbit/s dataström med maximalt bitfel av 10^{-4} .

4.1.1 Linjärt stereo ljud

Bitfelshalten skall vara $BER = 2 \cdot 10^{-3}$. För att uppnå det krävs ett teoretiskt värde på Eb/No för respektive modulation enligt tabell 4.1, se även fig. 3.4 och 3.5.

| Modulation | Eb/No |
|------------|---------|
| 2 DPSK | 7.5 dB |
| 4 DPSK | 8.6 dB |
| QPSK | 6.2 dB |
| 16 QAM | 9.9 dB |
| 32 QAM | 12.1 dB |
| 64 QAM | 14.1 dB |

Tabell 4.1 Minsta Eb/No för $BER = 2 \cdot 10^{-3}$ för respektive modulation

Den modulationsform som kräver minst Eb/No är QPSK och 2 DPSK bland de uppräknade. Som redovisats tidigare finns flera andra modulationsmetoder men som inte passar Sveriges Radios tillämpningar, se kap 3.2. Om valet enbart berodde av minsta Eb/No hade valet av QPSK varit givet, men vetenskapen om att DPSK i vissa fall är mer tålig för rayleighfädning gör det intressant att undersöka skillnaderna. Det bör noteras att 2 DPSK inte kan överföra lika mycket data på samma bandbredd som QPSK. För QPSK är det teoretiskt möjligt att överföra en 2 Mbit/s på 500 kHz bandbredd men som redovisats tidigare krävs det i praktiken ca 1.5 MHz bandbredd. För 2 DPSK innebär det en bandbredd på ca 3 MHz, vilket det troligen inte är möjligt att få tillstånd för. Valet står därför mellan 4 DPSK och QPSK. Vid simulering av Rayleighfädning med 4 DPSK uppvisar dock inte modulationen några

avgörande förbättringar som kan motivera behovet av ca 2.5 – 3 dB mer E_b/N_0 som modulationen kräver p.g.a. den differentiella faslägesavläsningen. Valet blir därför att beräkna länkbudgeten utifrån QPSK modulation. Vi undersöker även QAM modulationen eftersom den kräver en mindre bandbredd.

Om vi utifrån den analoga täckningen anger en täckningsradie från mottagarterminalen i en högmast på 50 km ($d = 50000$ m) kan vi beräkna den fria rymddämpningen för 400 MHz enligt

$$L_b = \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 f^2 d^2 \Rightarrow 119 \text{ dB} \quad \text{Ekv. 4.1}$$

Med ekvation 4.2 kan vi nu beräkna vilken uteffekt som krävs från sändaren för QPSK modulationen.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_t G_t G_r}{L_b F k T_0 R} \quad \text{Ekv. 4.2}$$

där $R = \frac{1}{\tau_b}$ är bithastigheten 2.048 Mbit/s vilket ger $10 * \log 2.048 * 10^6 = 63.1$ dB

G_t = Antenn vinst – kabel förlust vid sändaren (bil)

G_r = Antenn vinst – kabel/filter förlust vid mottagaren (högmast)

F = Brusfaktorn i mottagaren

kT_0 = Boltzmanns konstant * Temp vid 16° C = - 204 dB

Här ur kan vi nu lösa ut uteffekt P_t enligt

$$P_t = \frac{E_b}{N_0} * \frac{L_b F k T_0 R}{G_t G_r} \quad \text{Ekv. 4.3}$$

$$\text{uttryckt i dB } (P_t)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} + L_b + F + kT_0 + R - G_t - G_r \quad \text{Ekv. 4.4}$$

Enligt avsnitt 2.2.2 är $G_t = 5$ dB och enligt 2.2.3 är $G_r = 0.75$ dB. Ett vanligt värde på brusfaktorn är 3 dB. Vi får därför

$$(P_t)_{dB} = 6.2 + 119 + 3 - 204 + 63.1 - 5 - 0.75 = -18.45 \text{ dBW} \Rightarrow 11.55 \text{ dBm}$$

Eftersom vi gör beräkningarna i dB kan vi enkelt förändra parametrarna i uttrycket och direkt summera dom på slutresultatet. När vi undersöker vilken uteffekt som krävs för 16 QAM kan vi därför utläsa i tabell 4.1 att differensen med QPSK är 3.7 dB. Uteffekten blir därför $11.55 + 3.7 = 15.25$ dBm. För 32 QAM får vi 17.45 dBm och för 64 QAM blir uteffekten 19.45 dBm.

4.1.2 Komprimerat Layer II - stereo ljud

Bitfelshalten skall vara $BER = 10^{-4}$. Eftersom det komprimerade Layer II ljudet, på samma sätt som för det linjära stereo ljudet, skall nå så långt som möjligt väljer vi en modulation som inte behöver högt E_b/N_0 för att fungera. Eftersom överföringshastigheten är mindre än för linjärt ljud kan vi här välja en modulation med lägre M . Men enligt fig. 3.4 vinner vi inte något på att välja t.ex. 2 PSK då den kurvan sammanfaller med QPSK. Vi väljer därför även här QPSK som modulationsmetod. För $BER = 10^{-4}$ kräver QPSK ett $E_b/N_0 = 8.4$ dB. Bandbredden för överföringen kan här hållas nere till ca 250 kHz, alltså betydligt mindre än för det linjära stereo ljudet.

På samma sätt som tidigare beräknar vi uteffekten enligt

$$(P_t)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} + L_b + F + kT_0 + R - G_t - G_r \quad \text{Ekv. 4.5}$$

där $R = \frac{1}{\tau_b}$ är bithastigheten 384 kbit/s vilket ger $10 \cdot \log 384 \cdot 10^3 = 55.8$ dB

$$(P_t)_{dB} = 8.4 + 119 + 3 - 204 + 55.8 - 5 - 0.75 = -23.55 \text{ dBW} \Rightarrow 6.45 \text{ dBm}.$$

Vi ser här att det krävs 5 dB mindre uteffekt vid LAYER II ljud jämfört med linjärt stereoljud. För 16 QAM krävs $E_b/N_0 = 12.3$ dB vilket ger en uteffekt på 10.35 dBm.

4.1.3 DTS-kodat 5.1 surroundljud

Vid DTS ljud ställs som vi tidigare redovisat högre krav på bitelshalten $BER = 2 \cdot 10^{-7}$ men kravet på täckning är inte lika stort. Det analoga systemet har för stereotäckning en sändningsradie kring terminalen på 30 km. Vi väljer dock att göra länkbudget både för 30 och 50 km täckning. Tillväga gångsättet är detsamma som tidigare och vi utgår från QPSK kodning. Tabell 4.2 visar vilket E_b/N_0 som behövs för aktuell bitfelshalt.

| Modulation | Eb/No |
|------------|---------|
| QPSK | 11.1 dB |
| 16 QAM | 15.0 dB |
| 32 QAM | 17.2 dB |
| 64 QAM | 19.4 dB |

Tabell 4.2 Visar Eb/No för BER = $2 \cdot 10^{-7}$ vid olika modulationer

På samma sätt som tidigare beräknar vi uteffekten enligt

$$(P_t)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} + L_b + F + kT_0 + R - G_t - G_r \quad \text{Ekv. 4.6}$$

där $R = \frac{1}{\tau_b}$ är bithastigheten 2.048 Mbit/s vilket ger $10 \cdot \log 2.048 \cdot 10^6 = 63.1$ dB

Den fria rymddämpningen för 30 km ges av

$$L_p = \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 f^2 d^2 \Rightarrow 114 \text{ dB} \quad \text{Ekv. 4.7}$$

Skillnaden i fri rymddämpning mellan 50 km och 30 km radie är därmed 5 dB.

30 km: $(P_t)_{dB} = 11.1 + 114 + 3 - 204 + 63.1 - 5 - 0.75 = -18.55$ dBW $\Rightarrow 11.45$ dBm

50 km: $(P_t)_{dB} = 11.1 + 119 + 3 - 204 + 63.1 - 5 - 0.75 = -13.55$ dBW $\Rightarrow 16.45$ dBm

I jämförelse vid 50 km visar att linjärt ljud behöver 4.9 dB mindre uteffekt än DTS och Layer II ljud kräver 10 dB mindre än för DTS.

För QAM modulation behövs för

- 30 km vid 16 QAM behövs 15.35 dBm, för 32 QAM behövs 17.55 dBm och för 64 QAM krävs 19.75 dBm.
- 50 km vid 16 QAM behövs 20.35 dBm, för 32 QAM behövs 22.55 dBm och för 64 QAM krävs 28.75 dBm.

4.2 Länkbudget justeringar

I 4.1 beräknades vilken uteffekt som krävs för att sända respektive ljudformat över 50 km och 30 km, vilket är den ungefärliga radien för det analoga systemet. Men beräkningarna ovan utgår från att det inte förekommer några hinder mellan sändaren och mottagaren samt att ingen fädning finns.

Som framgår i 3.7.3 måste vi även p.g.a. att Rayleighfädning införa en fädningsmarginal för detta. För 99.9 % tillgänglighet krävs 30 dB fädningsmarginal. Att införa den marginalen innebär att sändareffekten med QPSK kodning blir

| Ljudformat | Uteffekt sändare |
|------------------|--------------------------------------------------------------|
| Linjärt stereo | $11.55 + 30 = 41.55 \text{ dBm} \Rightarrow 14.2 \text{ W}$ |
| LAYER II stereo | $6.45 + 30 = 36.45 \text{ dBm} \Rightarrow 4.4 \text{ W}$ |
| DTS stereo 30 km | $11.45 + 30 = 41.45 \text{ dBm} \Rightarrow 14.0 \text{ W}$ |
| DTS stereo 50 km | $16.45 + 30 = 46.45 \text{ dBm} \Rightarrow 44.15 \text{ W}$ |

Tabell 4.3 Uteffekt från sändare vid QPSK och fädningsmarginal för

Rayleighfädning

Tabellen visar vilken uteffekt som är nödvändig om befintliga antenner och med fädningsmarginal enbart med avsikt för Rayleighfädning. Vi kan även notera att marginalen på 30 dB är 10 dB mer än vad det analoga systemet har som fädningsmarginal. Detta är något som, beroende på de digitala systemens snabba bortfall vid fädning, är nödvändigt för att erhålla ett robust system.

Enligt tidigare resonemang enligt 3.7.4 har vi valt att även lägga till en ytterligare marginal för skuggfädning. Som vi tidigare påpekat är tidstillgängligheten vid beräkning av skuggfädning avsedd för enheter i rörelse. Vi kan därför inte lägga någon vikt vid den tidstillgängligheten men dock använda dess fädningsmarginal. Marginalen är ca 17 dB.

| Ljudformat | Uteffekt sändare |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Linjärt stereo | $11.55 + 30 + 17 = 58.6 \text{ dBm} \Rightarrow 724 \text{ W}$ |
| LAYER II stereo | $6.45 + 30 + 17 = 53.5 \text{ dBm} \Rightarrow 224 \text{ W}$ |
| DTS stereo 30 km | $11.45 + 30 + 17 = 58.5 \text{ dBm} \Rightarrow 708 \text{ W}$ |
| DTS stereo 50 km | $16.45 + 30 + 17 = 63.5 \text{ dBm} \Rightarrow 2.2 \text{ kW}$ |

Tabell 4.4 Uteffekt från sändare vid QPSK och fädningsmarginal

Som framgår blir uteffekten mycket stor. Om diversitetsystem införs med 2 grenar enligt avsnitt 3.8 kan marginalen för Rayleighfädning sänkas till 14.9 dB vilket avsevärt minskar kravet på uteffekt. Vid införande av ett diversitetsystem kommer det även att uppstå en fördelningsförlust vid sändaren p.g.a. att 2 antenner även måste användas där. Den förlusten kan dock kompenseras genom att den passiva transformator som används i högmasterna måste bytas ut och därmed minskar förlusterna med 3 dB. Vi utgår därför från att systemet i övrigt är oförändrat.

Hur ett diversitetsystem skall konstrueras i praktiken är dock inte helt klart. Att ha ett mottagarsystem där enbart diversitetekniken sitter uppe i högmasten är inte helt trivialt, det är inte heller särskilt ekonomiskt att ha en kabel för varje antenn ner i högmasten. Då återstår att ha mottagarenheten uppe i högmasten vilket även resulterar till att dämpningen i kabeln helt försvinner vid mottagare sidan. Hur antennkonstruktionen skall se ut vid sändarsidan (vid bilen) är inte heller helt klart. Vid ett dubbelriktat system med full duplex bör även diversitet införas vid bilen och antennsystemet ändras även där. Men i detta arbete tar vi inte hänsyn till de sist nämnda faktorerna då det i nuläget inte finns några färdiga lösningar för detta.

Införandet av felskydd ökar enligt 3.9 även möjligheten att klara tillfällig fädning. Om Reed Solomon används, ökar vi systemets känslighet med 3 dB vilket gör det möjligt att halvera uteffekten. Nedan visas vilken uteffekt som är nödvändig vid införande av diversitetssystem samt felskydd.

| Ljudformat | Uteffekt sändare | |
|-----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| | QPSK | 16 QAM |
| Linjärt stereo | $11.55 + 14.9 + 17 - 3 = 40.5$ dBm => 11.2 W | $15.25 + 14.9 + 17 - 3 = 44.2$ dBm => 26 W |
| LAYER II stereo | $6.45 + 14.9 + 17 - 3 = 35.4$ dBm => 3.5 W | $10.35 + 14.9 + 17 - 3 = 39.3$ dBm => 8.4 W |
| DTS 30 km | $11.45 + 14.9 + 17 - 3 = 40.3$ dBm => 10.8 W | $15.35 + 14.9 + 17 - 3 = 44.3$ dBm => 26.6 W |
| DTS 50 | $16.45 + 14.9 + 17 - 3 = 45.4$ dBm => 34 W | $20.35 + 14.9 + 17 - 3 = 49.3$ dBm => 84 W |

Tabell 4.5 visar uteffekten med diversity teknik och felskydd med marginal för fädning, både Rayleigh- och skuggfädning.

Vi noterar att uteffekten sjunkit markant och nu är på nivåer som är realistiska att uppnå. Den största skillnaden ligger i införandet av diversitet som är helt avgörande för att erhålla en bra mottagning.

4.3 Modulationsval

Att välja modulationsmetod för det digitala system som Sveriges Radio skall ha innebär att väga för och nackdelar mot varandra. Som vi redovisat innebär en modulation med många nivåer, högt M, att signalen blir känsligare för flervägsutbredning. Samtidigt kräver modulationen en högre uteffekt enligt tabell 4.1. Fördelen är dock att en mindre bandbredd krävs. Därför blir valet självklart QPSK om vi tilldelas breda kanaler (1.75 MHz). Om det däremot inte ges möjlighet att använda den stora bandbredden är alternativet någon av QAM modulationerna. Vi kan dock notera att effekterna enligt tabell 4.5 redan vid 16 QAM närmar sig vad som rent praktiskt är möjligt att åstadkomma i mobila sammanhang. Någon högre modulation är 16 QAM anses därför inte möjlig. Rekommendationen blir därför utifrån ovanstående resonemang att i första hand välja QPSK och därefter 16 QAM. Ett ytterligare alternativ som vi här inte undersökt närmare är att använda OFDM tekniken för att förbättra prestandan.

4.4 Kanalstruktur

Dagens analoga kanalstruktur innehåller 8 st kanaler för kontribution mellan OB buss och terminaler, där varje kanal moduleras med 75 kHz och kan överföra en monosignal. Kanalbredden är 200 kHz vilket totalt innebär 1.6 MHz. Det innebär att en sändningsplats vid stereo sändning kräver 2 kanaler. I ett digitalt system behövs inte mer än en kanal eftersom överföring alltid minst sker i stereo. Beroende på hur Sveriges Radio tänker använda HF-systemet i framtiden bör antalet kanaler därför kunna halveras till 4. Med utgångspunkt för att QPSK används innebär det, med en kanalbredd på 1.75 MHz, att det totala frekvensutrymmet blir 7 MHz, se fig. 4.1.

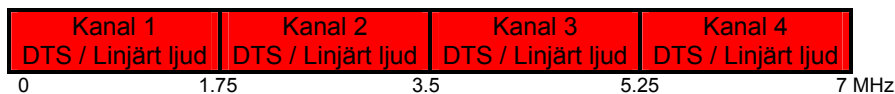


Fig. 4.1 Kanalstruktur för 4 st DTS kanaler med QPSK. Observera att vi här inte tar hänsyn till nödvändig kanalseparation för att undvika överhörning mellan kanalerna.

Om vi antar att antalet sändningar med DTS 5.1-ljud är begränsade, så att inte alla distrikt runt om i landet sänder samtidigt, bör antalet breda 1.75 MHz kanaler begränsas till 2. För stereo sändning används då istället det komprimerade LAYER II formatet med bandbredden 250 kHz. Med 4 olika kanaler innebär det 1 MHz. Den totala kanalbredden skulle då kunna reduceras till 4.5 MHz.



Fig. 4.2 2 st DTS kanaler samt 4 smalbandiga Layer II kanaler med QPSK

Motsvarande resonemang för 16 QAM ger att 4 st DTS kanaler blir $4 * 1.00 \text{ MHz} = 4 \text{ MHz}$.

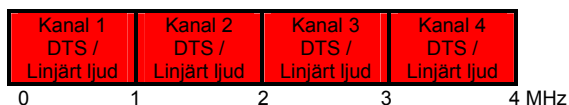


Fig. 4.3 Kanalstruktur för 4 st DTS kanaler med 16 QAM.

Eller med 2 DTS kanaler och 4 Layer II kanaler á 200 kHz blir totala frekvensbehovet 2.8 MHz.

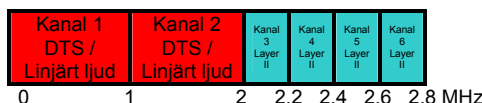


Fig. 4.4 2 st DTS kanaler samt 4 smalbandiga Layer II kanaler med 16 QAM

Ett ytterligare alternativ är att använda en kombination av QPSK och 16 QAM för att utnyttja bästa prestanda ur respektive modulation. Här används 16 QAM för DTS-ljud och QPSK för de smalbandiga Layer II kanalerna. Den totala frekvensåtgången blir då 3 MHz.

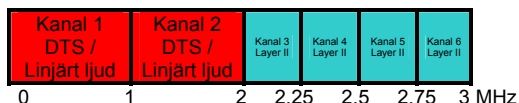


Fig. 4.5 2 st DTS kanaler i 16 QAM och 4 st Layer II kanaler i QPSK

Förutom kanalerna för sändning från bilen till terminalen skall det vid dubbel riktad kommunikation finnas en eller flera returkanaler som kan användas för returljud samt datakommunikation. Bandbredden kan troligtvis vara relativt smalbandig då inget DTS-ljud behöver skickas i retur till bilen. Samma

bandbredd som för Layer II ljudet bör kunna användas då det ger en datakanal på ca 400 kbit/s vid QPSK. Ett problem som kan uppstå här är att en sändare i en högmast når ett betydligt större område än en sändare monterad i en bil p.g.a. att rundstrålande antenner används. Problemet uppstår om det digitala systemet byggs ut i hela landet. I examensarbetet begränsar vi arbetet till att konstatera att en cellplanering är nödvändig för att lösa ev. störproblem mellan sändarna.

5 Utrustning

För att verifiera de teoretiska resultat och simuleringar som genomförts i arbetet har vi även valt att genomföra praktiska prov i form av bänktester och fältmätningar. Fältmätningarna har även avsikten att Sveriges Radio får möjlighet att prova ett digitalt system i verklig produktion och se om ett digitalt system är lika tillförlitligt och användarvänligt för reportrar och tekniker som det gamla analoga systemet.

5.1 Marknadsundersökning

För att kunna genomföra fältmätningar genomfördes en marknadsundersökning för att veta vilken utrustning, avsedd för HF bruk, som finns på marknaden idag. Sedan tidigare undersökningar gjorda av Sveriges Radio hade vi kännedom om ett norskt företag, Jotron, som utvecklat ett digitalt HF system. Detta var dock den enda kända utrustningen som dessvärre inte uppfyller Sveriges Radios krav p.g.a. dess låga överföringshastighet 128 kbit/s. Undersökningen inriktades istället på digitala radiosystem med låga frekvenser och överföringshastigheter på minst 2.048 Mbit/s. Undersökningen visar att det inte finns något större utbud av utrustning bland de lägre frekvenserna, de flesta arbetar kring 1 GHz och däröver. Några fabrikat kunde dock uppvisa intressanta produkter varvid vi valde att undersöka vissa närmare. Tabellen nedan är ett utdrag ur sammanställningen som finns i sin helhet som bilaga. De gulmarkerade modellerna ansågs mest intressanta och här genomfördes vidare undersökningar i form av företagsbesök.

| | | | |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Upgrade/ Alvarion | Breeze Access 900 | 902 - 928 MHz | GFSK level 2,4,8 |
| TFT | 460 Digital STL Transmitter | 940-960 MHz | 16-256 QAM |
| Harris | CD link | 920 - 960 MHz | - |
| Mossley | SL9003Q-RT | (335-512)/800-960/ 1350-1535 MHz | 16, 32, 64 QAM |
| Mossley | SL9003Q-RT | (335-512)/800-960/ 1350-1535 MHz | 16, 32, 64 QAM |
| Mossley | NXE1-HS QAM | (335-512)/800-960/ 1350-1535 MHz | QPSK/ 16, 32, 64 QAM |
| Ericsson Vyyö | V700DT | 470 - 800 MHz | QPSK, 16 - 64 QAM |
| 4RF | Digital Microwave | 330 - 470, 790 - 960, 1350- 1550, 2000-2700 MHz | QPSK, 16 - 64 QAM |
| MDS DR Digitalradio | LEDR 400F | 330 - 512 MHz | QPSK, 16 - 64 QAM |
| TRIO | U Series | 330 - 470, 1350 - 1550 MHz | 16 - 64 QAM |
| Stratex networks | DXR 100 | 330 - 470MHz 1.35 - 1.55, 2.0-2.7 GHz | DQPSK, 16 QAM |

Tabell 5.1 Utdrag ur marknadsundersökningen av digitala radiolänkar.

Valet att undersöka de 3 gulmarkerade modellerna vidare berodde främst på att de övriga inte var i full duplex eller enbart hade inbyggt AES3 interface för digitalt ljud. Det hade varit intressant att utnyttja de inbyggda ljudkodarna som finns i vissa sändarsystem men det omöjliggör samtidigt vidare utbyggnad av andra tjänster.

5.1.1 4 RF

4 RF är ett Nya Zeeländskt företag som till stora delar består av ingenjörer avhoppade från Stratex. Deras länk alternativ Aprisa XE är en högkapacitet länk främst avsedd att användas till platser där det inte finns möjlighet till DSL förbindelser. Den maximala överföringskapaciteten är 17 Mbit/s garanterad hastighet, i full duplex. Länken är i sitt enklaste utförande utrustad med 4 st Ethernet portar men har även plats för ett flertal G.703 interface med möjlighet att på ett enkelt sätt i ett webbgränssnitt välja kapacitet till valfri port. En nackdel är dock att det inte finns något annat interface att manövrera utrustningen på. Det finns även möjlighet att skifta modulation (QPSK, 16 - 64 QAM) samt uteffekten genom webbgränssnittet. Uteffekten är dock begränsad till 35 dBm vilket motsvarar 3.5 W.



Fig. 5.1 Aprisa XE sändare & mottagare med E1-anlutningar till vänster och 4 st Ethernet anlutningar till höger.

Förutom enheten ovan tillkommer duplexfilter på 1 HE för att kunna använda en antenn för sändning och mottagning. Om diversitet önskas finns en enhet som kopplar samman 2 st Aprisa XE. Man får då samtidigt ett 1+1 system, d.v.s. ett backupsystem som ökar driftsäkerheten. Nackdelen är att det blir mer än dubbelt så dyrt.

5.1.2 MDS

MDS tillhandahåller länken LEDR 400F med motsvarande tekniska data som Aprisa. LEDR 400F är dock inte utrustad med samma multiplexer och erbjuder inte samma flexibilitet i antalet portar. På baksidan finns 4 st G.703 interface samt en Ethernet port. Maximala bandbredden är normalt 1.75 MHz där den högsta överföringskapaciteten är 8.192 Mbit/s (4x E1). Högre kapacitet kan fås vid specialbeställningar. Länken hanterar QPSK samt 16 – 64 QAM med en maximal uteffekt 1 W. Utrustningen mäter dock enbart 1 HE varför den är smidig att hantera samtidigt som den har en inbyggd display och manöverenhet som möjliggör styrning direkt på utrusningen.



Fig. 5.2 LEDR 400F från MDS har en inbyggd display och manöverenhet samt även ett uttag för interntelefoni.

Liksom Aprisa utrustning kräver även MDS ett yttre duplexfilter för att kunna använda 1 antenn. Vid diversitet krävs även här en sammankopplingsenhet samt dubbla utrustningar.

5.1.3 Stratex

Stratex har modellen DXR 100 som ett lågfrekvensalternativ, mest använd för att förse oljeplattformar med data och telefoniförbindelser. De tekniska data som länken har skiljer sig inte nämnvärt från Aprisa och MDS. Vid ett möte med Stratex visade det sig dock att utrustningen inte utvecklas längre och är på väg ur produktion. Någon närmare utredningen genomfördes därför inte.

5.1.4 Val av testutrustning

Av ovanstående framgår att valet stod mellan 4 RF och MDS. Enheterna har i princip identiska funktioner bortsett från användargränssnittet där LEDR har en inbyggd display och manöverenhet samtidigt som Aprisa har flexibel portkonfiguration och högre uteffekt. För Sveriges Radio är användarvänligheten viktigast samtidigt som radioenheten enbart skall vara ansluten till en ljudenhet samt ett enkelt datanät. Valet borde därför ha varit MDS 400 F men p.g.a. fördelaktiga utlåningsvillkor från 4 RF blev det Aprisa utrustningen som användes för de praktiska proven. Ur testsynpunkt har det ingen betydelse men för framtida system bör man dock överväga MDS som alternativ.

5.2 Bänktester Aprisa XE

För att testa den digitala radiolänken genomfördes bänktester för att kunna testa de olika modulationsmetoderna vid varierande signalstyrka. Samtidigt hade vi möjlighet att koppla samman länkutrustningen med befintligt kod och ljudutrustning.

5.2.1 Systemuppställning

Vid bänktesterna valde vi att genomföra en fullständig systemuppställning. Här ingår samtliga delar i ett fullständigt system: kodare/avkodare, ljudsignalkällor och radioutrustning. Vi valde att testa både linjärt PCM-ljud och DTS 5.1-ljud över länken. Som ljudkälla användes för PCM-ljudet en tongenerator med AES3 utgång, som kopplades till Digital Visions J.57-kodare. Som DTS-källa användes en DAT-bandspelare med DTS 5.1-ljud. J.57 kodaren kopplades till radiolänken via en obalanserad G.703 anslutning med E1-hastigheten 2.048 Mbit/s. Istället för vanliga antenner användes dämpsatser med varierbar dämpning mellan sändare och mottagare. För att avkoda ljudet efter mottagaren användes en J.57 avkodare som levererade en AES3-ström, som anslöts till en ljuddator för analys. För att mäta bitfel i E1-förbindelsen användes en bitfelsmätare som anslöts parallellt med J.57 avkodaren. P.g.a. brist på frekvenser var vårt testsystem modifierat och enbart i simplex vilket innebär att sändaren i ena enheten var avstängd.

5.2.2 Mätresultat

De resultat som vi kunde utläsa från bänktesterna var bl.a. vilken signalstyrka som i praktiken krävs för att uppnå störningsfri ljudöverföring för respektive ljudformat och modulation. Det visade sig då att felskyddet i Aprisa XE utrustningen fungerade genom att rätta fel så långt som möjligt för att uppnå

en bitfels halt som bedömdes vara lägre än 10^{-9} . Om signalstyrkan var så dålig att felskyddet inte kunde rätta alla fel blev antalet bitfel så stort att det inte gick att använda signalen vare sig för linjärt ljud eller DTS ljud. Resultatet blev alltså att det i praktiken inte blir någon större skillnad i täckning för linjärt PCM-ljud och DTS-ljud. Det är något som ett framtida system bör ha justerbart för optimal prestanda för respektive ljudformat.

Bänktesterna visade att för respektive modulation krävdes en insignal i mottagaren enligt tabell 5.2 nedan.

| | QPSK | 16 QAM | 32 QAM | 64 QAM |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Insignal | -93.5 dBm | -88.4 dBm | -85.5 dBm | -81.4 dBm |
| Antal rättade fel | 24721 | 391 576 | 622 000 | 320 000 |
| Överföringshastighet | 2.872 Mbit/s | 3.256 Mbit/s | 7.192 Mbit/s | 8.632 Mbit/s |

Tabell 5.2 Minsta insignal för respektive modulation för felfri ljudöverföring samt antal rättade fel.

Vid denna insignal kunde inga bitfel upptäckas på E1 förbindelsen eller ljudet under en 5 min lång mätperiod. I webbinterfacet för Aprisa XE kunde man dock avläsa att felskyddet rättade ett stort antal felaktiga symboler. Vid en jämförelse av antal rättade symboler skall man dock notera att överföringshastigheten inte hölls konstant utan varierar för varierad modulation. Detta var något som vi inte kunde påverka under våra tester då Aprisa XE enbart har konstant bandbredd, 1.75 MHz.

Vidare gjordes en långtidsmätning för bästa möjliga BER värde. Utrustningen fick därför stå påslagen under en helg, d.v.s. 2 dygn och 18 tim, med en insignal på -50 dBm in i mottagaren. Vi kunde då uppmäta ett BER värde i mottagaren på $1.376 \cdot 10^{-12}$. Inga bitfel påträffades i E1 strömmen eller ljudöverföringen under testperioden. Vi kunde även konstatera att inga symboler blivit rättade av Reed Solomon felrättning.

I kravspecifikationen framgår även att tidsfördröjningen inte får överstiga 40 ms. Mätningar på Aprisa XE länken samt J.57 kodarna visar att vi utan problem klarar det kravet då fördröjningen enbart är ett fåtal ms.

Vi hade även för avsikt att mäta hur olika modulationsformer samt länken hanterade flervägsutbredning. Tyvärr kunde vi inte få tillgång till nödvändig utrustning för att genomföra kompletta mätningar.

5.2.3 Problem

Ett problem med Aprisa XE utrustningen är att den inte klarar asymmetrisk bandbredd, d.v.s. att använda olika bandbredder för mottagning och sändning. Då frekvensutrymmet är begränsat, både under testperioden och i framtiden, är det nödvändigt att systemet klarar detta. I testsystemet var vi därför tvingade att stänga av sändaren i ena enheten, den som kommer att sitta i högmasten, för att kunna genomföra testerna. Samtliga tester utförs därför i simplex utan möjlighet att testa dataförbindelse i form av intranät etc.

Vi bänkttesterna uppstod till en början problem i form av oförklarliga bitfel som uppstod även när vi hade perfekt signal mellan sändare och mottagare. Felet visade sig efter tidtagning uppstå regelbundet med ett intervall av ca 2 min vid QPSK modulation. Intervallet ändrades för olika modulationsformer. Bitfelsmätaren indikerade "Frame loss" vilket betyder att en ram gick förlorad. Orsaken visade sig vara ett synkfel som inträffade i sändaren och mottagaren vilket gjorde att systemklockorna drev sinsemellan så att ramarna till sist inte kunde tolkas. Lösningen på problemet är att inte använda sändarens klocka som synk utan ljudkällan, d.v.s. antingen tongeneratoren eller DAT bandspelaren och låta den klockpulsen styra både kodare, sändare, mottagare och avkodare. Detta var en lösning som fungerade bra i vårt isolerade system som inte var kopplat till resten av radiohusets nätverk. Men för att kunna koppla in länksystemet i resten av nätverket kommer det att krävas en yttre klockpuls. Den kan t.ex. hämtas från en TV signal som är synkad med nätverket eller ev. från någon satellit. Detta är något som vi inte undersökt vidare men som vi vet tillämpas i liknande sammanhang.

Ett annat problem som uppstod var ändringar av modulation och uteffekt. Webbinterfacet klarade inte att genomföra flera ändringar samtidigt då det resulterade att det inte gick att ändra något alls. Felet uppstod dock ungefär 1 av 3 gånger även vid enbart en ändring i taget. Enda sättet att lösa problemet var att stänga av och sätta på utrustningen ett par gånger. Felet var mycket irriterande och får anses oacceptabelt vid verklig användning.

5.3 Länkbudget Aprisa XE

Utgående från de resultat som framkommit från bänkttesterna har vi möjlighet att jämföra de teoretiska resultat som vi tagit fram tidigare. Vi har då beräknat att uteffekten, för DTS 5.1-ljud vid 50 km radie och med QPSK modulation samt utan fädningsmarginal, skall vara 16.45 dBm. Om vi använder den uteffekten på Aprisa XE utrustningen och placerar den i Krokek samt i sändningsbussen får vi en länkbudget enligt $16.45 \text{ dBm} - 119 - 3 + 5 + 0.75 = -99.8 \text{ dBm}$. Vi ser då att den uteffekten inte räcker för Aprisa XE då den kräver en insignal på minst -93.5 dBm, skillnaden är därmed ca 6 dB. Förklaringar till skillnaden är flera. Våra beräknade värden är vid ideala förhållande samtidigt som Aprisa XE inte överför 2.048 Mbit/s utan är dimensionerad för att överföra 2.872 Mbit/s, vilket kräver ca 1.5 dB mer i signalstyrka. Vi bör även notera att vid -93.5 dB levererar Aprisa XE en bitström som minst motsvarar ca 10^{-9} vilket är bättre än vad som krävs för DTS ljud 10^{-7} vilket resulterar i ca 2 dB differens. Skillnaden är därmed ca 2.5 dB mellan våra teoretiskt beräknade värden och Aprisa utrustningen vilket får anses acceptabelt. Den minsta uteffekt som kan användas vid QPSK är därför 22.75 dBm. Fädningsmarginalen vid full effekt 35 dBm blir därmed 12.25 dB vilket är betydligt mindre än de 44 dB vi tidigare rekommenderat när diversitet inte används. Motsvarande beräkningar för 16 QAM, där maximal uteffekten är 30 dBm, ger en länkbudget enligt $30 \text{ dBm} - 119 - 3 + 0.75 = -91.25 \text{ dBm}$. Uteffekten räcker alltså inte för att sända så långt då mottagaren enligt tabell 5.2 kräver -88.4 dBm insignal.

Med 44 dB marginal med Aprisa XE innebär det med QPSK en bra täckning inom 1.7 km och för 16 QAM blir täckningen 470 m. Även här kan vi dra slutsatsen att högre uteffekt är nödvändig för att uppfylla länkbudgeten.

I tillverkarnas länkbudgetberäkningar kan man se att deras förväntade vinst av diversitet är 3 dB vilket är betydligt mindre än vad det teoretiskt framräknade värdet anger. Orsaken till den stora differensen är främst att de teoretiska beräkningarna enbart avser påverkan av Rayleigh fädning. Tillverkarnas diversitetsvinst på fädningsmarginalen är troligtvis en sammanställning av alla typer av fädningar.

5.4 Simulering av täckning

På motsvarande sätt som för det analoga systemet kan vi simulera vilken täckning systemet får. Fig. 5.3 visar täckningsområdet för QPSK = grönt och 16 QAM = rött inkl grönt med samma uteffekt som i det analoga systemet 25 W. Med den uteffekten uppnås en täckningsgrad enligt QPSK = 56.9 % och 16 QAM = 39.2 % av testområdet med 50 km radie.

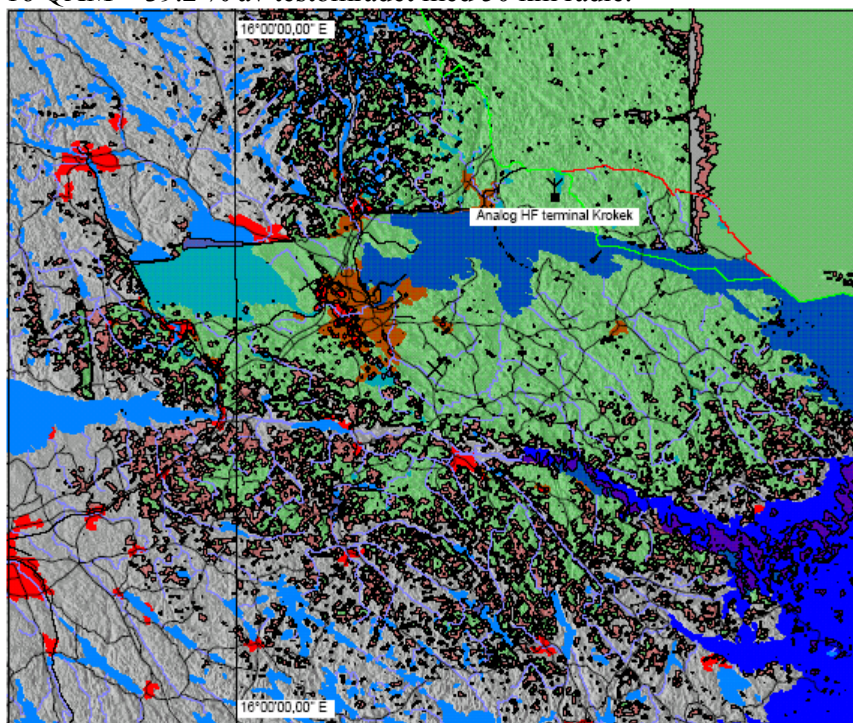


Fig. 5.3 Täckningskarta vid 25 W uteffekt för QPSK = grönt (inkl rött) och 16 QAM grönt.

Som framgår av täckningskartan uppstår skillnaden mellan QPSK och 16 QAM främst i ytterområdet. I samma testområde har det analoga systemet en monotäckning på 70.8 % men bara 16.7 % vid stereo. Det är alltså en bättre täckning med det analoga systemet vid monosändning men bättre täckning vid stereo eller DTS 5.1-ljud vid samma uteffekt.

5.5 Fältmätningar

För att testa hur utrustningen fungerar i praktiken genomfördes fältprover i testområdet i Norrköping där vi efterliknade den dagliga användningen med analog utrustning. Det innebär användning av 12 volt matningsspänning, kyla, flertalet av och på slag osv. Testerna hade också för avsikt att ge en uppfattning hur stor fädningsmarginal som är nödvändig vid sändning. För testerna användes Sveriges Radio Norrköpings OB-buss som sändarbil och

Krokes FM/TV-station som mottagarstation, där de befintliga antennerna användes. OB-bussens yagiantenn för analog sändning byttes vid testen ut till en motsvarande antenn avsedd för frekvensen 415 MHz, vilket var vår testfrekvens. I övrigt användes samma uppställning som i bänktesterna.



Fig. 5.4 OB-bussen i Norrköping, utrustad med digital Aprisa XE utrustning.

De fältmässiga mätningarna genomfördes genom att ett antal mätpunkter med varierande sändningsförhållande valdes ut. Vi delade upp mätpunkterna i 4 kategorier

- A) **Närområdet** kring masten anses vara inom radien där fädningsmarginalen är ca 40 dB, d.v.s. runt 2 km. Här genomfördes ett begränsat antal mätningar. Det var inte några problem att sända från några platser inom denna begränsade radie och vi behövde inte hissa sändarmasten. Både QPSK och 16 QAM kunde användas utan problem. Eftersom radien var så begränsad var det svårt att hitta några större ojämnheter och berg som kunde skugga signalen. Vi kunde dock notera små signalbortfall när OB-bussen var i rörelse.
- B) **Medeldistans** innebär ca 25 km sändningsradie. Här genomfördes ett 10 tal lyckade mätningar i olika riktningar kring Krokek men även ett flertal misslyckade försök. Här kunde vi konstatera att det behövdes planering av sändningsplatser med öppna fält i sändareantennens riktning. Det behövdes nästan alltid yagiantenn med upphissad mast för att signalen skulle komma fram. QPSK var den modulation som fungerade bäst då 16 QAM enbart fungerade vid bra sändningsplatser och där precisionsparkering tillämpats.
- C) **Långdistans** proven kunde genomföras tack vare simuleringar där vi med täckningskartan såg att det skulle gå att sända, se fig. 5.5. Längsta avståndet som kunde uppmätas var 36 km där vi hittat en ö på täckningskartan vid Skärkinds kyrka. Sändningen fungerade utan problem och ingen skillnad kunde uppmätas när förbindelsen väl etablerats.

D) **Stadsmiljö** proven genomfördes i Norrköping som ligger ca 2 mil från Krokek. Testen blir därmed något missvisande eftersom avståndet i sig är långt vid dessa låga effekter. Resultatet blev att det i princip var omöjligt att sända från stadskärnan med den digitala utrustningen. Det bör även nämnas att det här finns vissa problem även med dagens analoga utrustning. Men med den analoga utrustningen gick alltid att få fram en signal från sändningsbussen, om än brusig. Den digitala utrustningen gick bara att använda vid ett mycket begränsat antal platser som hittats efter långt sökande. Det är därför, med de aktuella effekterna, inte användbart för praktiskt reporterbruk

En simulering av testområdet genomfördes där utrustningens prestanda ligger som grund. Det röda området inklusive det röda motsvarar QPSK och det gröna motsvarar 16 QAM.

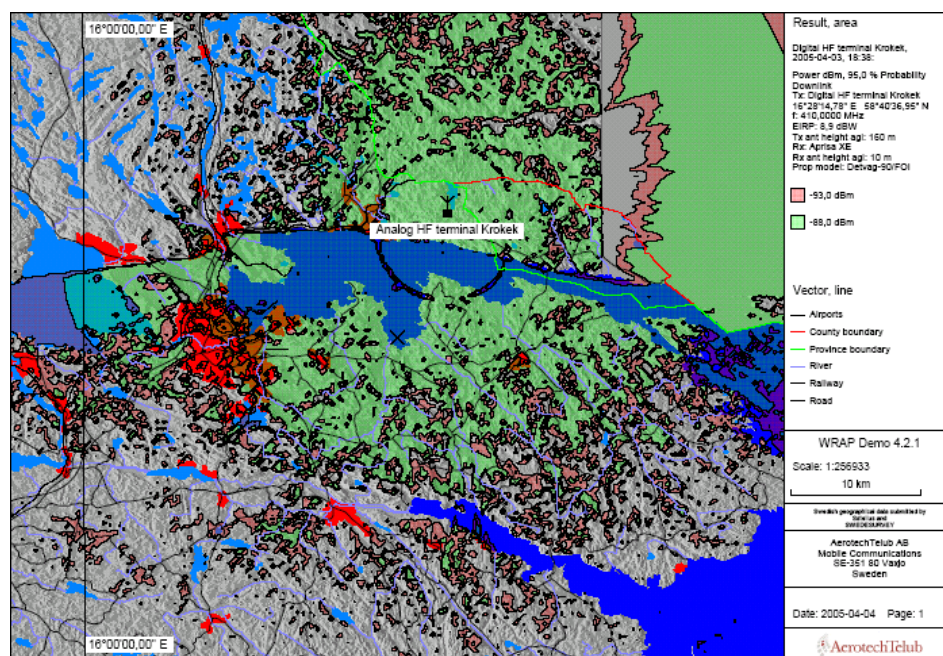


Fig. 5.5 visar vilken täckning som kan uppnås med Aprisa XE utrustningen. Notera att vi här inte har någon fädningsmarginal.

Från testerna kan man direkt utläsa att den ursprungliga effekten i utrustningen på 35 dBm är alldeles för liten för att uppnå en godtagbar täckning. Det behövs den framräknade marginalen för att kunna sända från platser som inte har öppningar i terrängen mot mottagarterminalen, som t.ex. stadsmiljöer. Vid testerna provades det analoga systemet parallellt vilket gav en bra uppfattning hur det systemet fungerade med olika hinder i vägen för radiosignalen. Här kunde vi snabbt se att med precisionsparkering går det att vinna många dB i länkbudgeten, vilket är helt naturligt då det går att undvika flervägsutbredning. Genom att flytta bilen inom enstaka meter kunde variationer på 10 tals dB observeras. Om man som användare anser att precisionsparkering är acceptabelt kan det vara ett alternativ till diversity

tekniken som är relativt dyr. Fältproven visar också att simuleringen i fig. 5.5 stämmer mycket bra. Som beskrivits vid långdistans proven kunde vi använda simuleringen med en noggrannhet på ca 50 m avgöra om det var möjligt att sända från en viss plats.

Vi kunde även konstatera att fädningsmarginalen på ca 26 dB i det analoga systemet fungerar bra genom att precisionsparkering kunde tillämpas.

Under proven kontrollerade vi även hur den digitala signalen hanterade flervägsutbredning. Vi hade därför en analog TV mottagare monterad i sändarbussen där vi tog emot de analoga TV utsändningarna från Krokes TV sändare. Det gick då att mäta skuggornas ”bredd” på skärmen och därefter beräkna hur stor gångvägsskillnad som fanns vid respektive sändningsplats. I testområdet kunde vi mäta skuggbredder på mellan 4 och 8 mm på en bildskärm som totalt var 275 mm. Eftersom varje bild uppdateras var $64 \mu s$ innebär det att varje millimeter på skärmen motsvarar $2.3 \cdot 10^{-7}$ sekunder. Den tid som gångvägsskillnaden i testområdet orsakar kan därmed beräknas enligt $4 \cdot 2.3 \cdot 10^{-7} = 9.3 \cdot 10^{-7}$ Ekv. 5.1

$$8 \cdot 2.3 \cdot 10^{-7} = 1.86 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ekv. 5.2}$$

Här är den längsta gångvägsskillnaden besvärligast att hantera. I de praktiska proven var det dock svårt att exakt veta hur flervägsutbredningen påverkade överföringen p.g.a. att det är svårt att påverka enskilda parametrar. Vi kunde dock konstatera att i de fall som mottagaren hade tillräcklig signalstyrka enligt tabell 5.2 kunde vi använda länken. Utrustningen klarade alltså att hantera den flervägsutbredning som förekom i testområdet.

Rent maskinellt fungerade utrustningen bra även vid mobil drift. Eftersom testerna utfördes under vintertid ger det en indikation om att utrustningen klarar även svenska förhållande med stora temperaturväxlingar. Vi genomförde dock inga extrema väder tester med utrustningen.

I kravspecifikationen framgår även att utrustningen skall synka in inom 1 sek vid tillfällig utfädning. Det kravet hade Aprisa XE länken inga problem att uppfylla då den omedelbart efter signalbortfallet levererade en dataström som kunde avkodas av kodutrustningen.

5.6 Ekonomisk kalkyl

I examensarbetet ingår att göra ett överslag av vad ett digitalt sändarnät skulle kosta. P.g.a. att det idag inte finns någon färdig utrustning som passar Sveriges Radio blir det enbart uppskattningar av hur stora kostnaderna blir. Det har inte varit möjligt att få några prisuppgifter om ett anpassat framtida system. En avgörande faktor är även hur Sveriges Radio kommer att använda systemet, som en ersättare av dagens system eller enbart som ett komplement.

Med utgångspunkt att det är en ersättare innebär det att samtliga 151 programmottagare i Teracoms master skall bytas ut samt de 62 stadsmottagare som Sveriges Radio själva äger. De mottagare som finns i Teracoms master är

vanligtvis dubblerade för att kunna köras i stereo vilket med den digitala tekniken kan ersättas med en enda mottagare. En nackdel med att halvera antalet är dock att det inte går att sända från 2 olika platser samtidigt. Det problemet bör dock kunna lösas genom att en extra tillfällig mottagare monteras de gånger dubbla sändningar är nödvändiga. Resonemanget ovan gör att antalet mottagare blir $151/2 = 76$ st för Teracom och 62 st för Sveriges Radio, vilket totalt blir 138 st. Varje enhet kostar i grundutförande 110 000 Kr. Till det tillkommer eventuell ombyggnads kostnad och slutsteg till en uppskattad kostnad av 30000 kr per enhet. Varje station kommer då totalt att kosta 140 000 kr. vilket ger en totalkostnad på 19.3 Mkr.

Antag vidare att varje lokalradio station 25 st skall ha en sändarutrustning samt att radiohuset i Stockholm, Göteborg och Malmö tillsammans skall förfoga över 5 sändare. Totalt blir sändarkostnaden $30 * 140\,000\text{ kr} = 4.2\text{ Mkr}$

Vi förutsätter vidare att befintliga antenner kan användas i mottagare stationerna samt att de gamla komradioantennerna kan användas på sändarbussen. Detta förutsätter att sändningstillstånd erhålls i 400 MHz bandet.

Genom att de befintliga antennkonstruktionerna används behövs inga större installationsarbeten. Det enda är inmontering i rack samt intrimning och provning vilket uppskattas kunna utföras på en arbetsdag per enhet. En grov uppskattning av arbetskostnaden med 350 kr/tim i timersättning blir därför $138 + 30 = 168$ enheter á 8 tim, totalt 470 Tkr.

Den totala kostnaden för ett digitalt HF system uppskattas därför till 24 Mkr. Givetvis skall man räkna med rabatter vid dessa stora volymer men eftersom kostnaderna är så osäkra avstår vi från att ta med det i beräkningarna.

6 Resultat

Det sammanlagda resultatet av beräkningar, simuleringar, bänktester och fältmätningar visar att det är fullt möjligt att införa ett digitalt system med god prestanda. Tester visar att det är fullt möjligt att överföra en DTS-signal med 5.1-ljud från en mobil sändarenhet till någon av mottagarstationerna. För att få den täckning som önskas, samtidigt som systemet skall vara tåligt mot flervägsutbredning, är QPSK den modulationsmetod som anses lämpligast. 16 QAM är andrahands alternativ som fungerar men som kräver starkare slutsteg. Det analoga systemet har en oslagbar täckning vid monosändning, 70.8 % av testområdet, som är svår att uppnå med den digitala tekniken, 56.9 % med samma uteffekt 25 W. Om man däremot önskar ytterligare funktioner och bättre ljud i form av stereo och DTS 5.1 uppnås bättre prestanda med det digitala systemet. Samtidigt erbjuder det digitala systemet andra tjänster i form av datakommunikation som kan användas av reportrar ute på fältet. Detta kräver dock en returkanal vilket kräver ytterligare kanaler och bandbredd.

Beräkningar visar att det krävs rejäla marginaler ca 45 dB för både tillfällig fädning och skuggfädning för att erhålla ett system som är lättanvänt och

stabil. Det kraftfulla felskyddet i form av Reed Solomon gör att det går att reducera uteffekten med ca 3 dB, vilket är en halvering av uteffekten. I vår testutrustning bidrog även rättningen till att det inte blir någon skillnad mellan att sända stereoljud och DTS-ljud vilket bör vara justerbart i ett framtida system. Ett ytterligare sätt att reducera effekten är att använda diversitet som kan reducera fädningsmarginalen med ca 15 dB. Tekniken är tyvärr kostsam och kräver ombyggnad i antennsystemen. Precisionsparkering är då en lösning som ger motsvarande effekt men som innebär en viss arbetsinsats vid varje sändningstillfälle. Tekniken tillämpas redan idag av Sveriges Radio och bör därför inte innebära något större problem. En fädningsmarginal på ca 30 dB är därför önskvärd vilket innebär att en uteffekt på minst 12 W bör användas vid QPSK och minst 25 W vid 16 QAM.

Att använda linjärt ljud i stereo är inte den bästa lösningen frekvensmässigt då det kräver stor bandbredd. Det är därför lämpligare att använda det komprimerade formatet LAYER II med 384 kbit/s vid stereosändning. I vilken omfattning komprimerat Layer II ljud skall användas i produktion tar vi inte ställning till i detta arbete.

Vilken frekvens och kanalstruktur som skall användas beror främst på hur stort frekvensområde som är möjligt att få från PTS. En rimlig och bra lösning är att använda 1.75 MHz kanaler för DTS och 250 kHz kanaler för stereoljud i Layer II. Det kräver att länken är flexibel med 2 valbara bandbredder och även asymmetriska bandbredder för sändning och mottagning. Frekvensen bör helst vara i 400 MHz bandet då det innebär att befintliga antennsystem kan användas i högmasterna. I övriga fall bör frekvensområdet inte överstiga 1 GHz för att uppnå bästa täckningsområde.

Vilket framtida fabrikat som skall användas för det digitala systemet är svårt att ta ställning till då samtliga fabrikat kräver modifiering för att uppfylla önskemålen. MDS LEDR har en bra grund som både är smidig och användarvänlig. Aprisa XE fungerar bra men är onödigt avancerad för Sveriges Radios ändamål.

7 Slutsatser

Från de tester och beräkningar som gjorts i examensarbetet går det att konstatera att den digitala tekniken både har sina för och nackdelar. Fördelarna är att det går att introducera nya tjänster i form av nya ljudformat och parallella datatjänster. Ljudkvaliteten förbättras även med den digitala tekniken vilket är helt i linje med övrig utveckling inom ljudbranschen. Nackdelarna är att de nya tjänsterna kräver större informationsöverföring som i sig kräver större bandbredd. Den stora bandbredden är nödvändig för att uppnå ett stabilt system som är användarvänligt men är idag tyvärr en bristvara. Det gamla analoga systemet som används idag har en imponerande täckning som är svår att överträffa. Men det digitala systemet kan i rätt utförande uppnå i stort sätt motsvarande täckning. Samtidigt är det digitala systemet mer flexibelt för framtida tjänster. Om ett digitalt system skall vara ett komplement eller en ersättare till dagens analoga system återstår att se då det både är en frekvens och kostnads fråga.

För att i framtiden kunna välja ett digitalt system bör vidare utredning ske av OFDM som är ett tekniken som troligtvis kan förbättra och förenkla användningen av ett digitalt system. Vidare bör ytterligare tester göras med utrustning som har högre effekt för att på ett rättvist sätt kunna prova utrustningen i skarp drift, dvs. i den dagliga produktionen.

8 Referenser

- [1] Jotron Broadcast & Communication
www.jotron.com/broadcast.default.htm
- [2] Digital Audio Broadcasting – Principles and applications of digital radio
Av Wolfgang Hoeg & Thomas Lauterbach
ISBN 0-470-85013-2
- [3] **Digital Radiokommunikation**
- [4] Mobil radiokommunikation
Av Lars Ahlin, Christer Frank och Jens Zander
ISBN 91-44-01916-5
- [5] WRAP
Aerotech Telub Communications
SE-351 80 Växjö, Sweden
- [6] **Digital Audio Broadcasting**
- [7] **Flarion Technologies, Whitepaper**
- [8] Modulation och teleteknik
Av Anders Svärdström
ISBN 91-44-00139-8
- [9] **QAM bild från nätet**
- [10] Modulation, detektion och kodning
Av Tommy Öberg
ISBN 91-44-01743-X
- [11] Matlab help files
MathWorks.inc
- [12] 4i2i
http://www.4i2i.com/reed_solomon_codes.htm

9 Appendix

| | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PCM-ljud | är ett linjärt ljudformat där all ljudinformation som samplats överförs och lagras. |
| DTS | Digital Teater System , är ett digitalt ljudformat som används för överföring av flerkanals ljud. 5.1 är en vanligt förekommande variant som innebär 5 vanliga ljudkanaler samt 1 kanal för lågfrekvent subbas. |
| DAB | Digital Audio Broadcast, är ett digitalt radiosystem för utsändning av radio till allmänheten. Ersättare eller komplement till dagens FM nät. |
| SNR | Signal Noise Ratio. Anger skillnaden mellan nyttosignalen och bruset, anges oftast i decibel. |
| Dopplereffekt | uppstår när mottagaren rör sig i förhållande till sändare och resulterar i att signalen interfererar tillfälligt ”släcks” ut i mottagaren. Doppler effekten är beroende av hastigheten mellan sändaren och mottagaren |
| OB-sändning | Outside Broadcasting, är en fackterm för mobil sändning utanför radiohuset |
| HF-system | High Frequency system, är en fackterm för utrustning som används vid mobil sändning. |
| Teracom | Statligt bolag som svarar för utsändning av statlig radio och TV. |
| Högmaster | Med högmaster menar Sveriges Radio och Teracom de master som oftast är 300 m höga och som bl.a. används utsändning av radio och TV. |
| Dipolantenn | är en rundstrålande antenn. Antennvinsten är liten, oftast enbart någon decibel. |
| Yagiantenn | är en riktad antenn där energin huvudsakligen sprids i en riktning. En yagi antenn har en antennvinst från ca 3 dB och upp till ca 20 dB |
| RTT | Round Trip Time, den tid det tar för signalen att transporteras i länken fram och tillbaka. |
| DSQ/J.57 | Digital Studio Quality eller J.57 är ett standardiserat format att överföra linjärt ljud över en standard E1 2.048 Mbit/s förbindelse som används inom telefoni. |

ISDN

är en digital telefonförbindelse med garanterad hastighet 64 kbit/s. Flera förbindelser kan kombineras för ökad hastighet.

Perceptuell kodning

används bl.a. i MPEG Layer II och är en metod för att enbart koda den ljudinformation som uppfattas av det mänskliga örat.

4 RF

Nya Zeeländskt företag som tillverkar digitala radiolänkar, bl.a. Aprisa XE.

Simulink

Grafiskt simuleringsverktyg i Matlab.

10 Bilagor

10.1 Q-funktionen

Q-funktionen, tabell över $Q(x) = \int_x^\infty (1/\sqrt{2\pi})e^{-t^2/2}dt$ för $0.00 \leq x \leq 5.99$

| x | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | exp |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|
| 0.0 | 5.000 | 4.960 | 4.920 | 4.880 | 4.840 | 4.801 | 4.761 | 4.721 | 4.681 | 4.641 | -1 |
| 0.1 | 4.602 | 4.562 | 4.522 | 4.483 | 4.443 | 4.404 | 4.364 | 4.325 | 4.286 | 4.247 | -1 |
| 0.2 | 4.207 | 4.168 | 4.129 | 4.090 | 4.052 | 4.013 | 3.974 | 3.936 | 3.897 | 3.859 | -1 |
| 0.3 | 3.821 | 3.783 | 3.745 | 3.707 | 3.669 | 3.632 | 3.594 | 3.557 | 3.520 | 3.483 | -1 |
| 0.4 | 3.446 | 3.409 | 3.372 | 3.336 | 3.300 | 3.264 | 3.228 | 3.192 | 3.156 | 3.121 | -1 |
| 0.5 | 3.085 | 3.050 | 3.015 | 2.981 | 2.946 | 2.912 | 2.877 | 2.843 | 2.810 | 2.776 | -1 |
| 0.6 | 2.743 | 2.709 | 2.676 | 2.643 | 2.611 | 2.578 | 2.546 | 2.514 | 2.483 | 2.451 | -1 |
| 0.7 | 2.420 | 2.389 | 2.358 | 2.327 | 2.297 | 2.266 | 2.236 | 2.207 | 2.177 | 2.148 | -1 |
| 0.8 | 2.119 | 2.090 | 2.061 | 2.033 | 2.005 | 1.977 | 1.949 | 1.922 | 1.894 | 1.867 | -1 |
| 0.9 | 1.841 | 1.814 | 1.788 | 1.762 | 1.736 | 1.711 | 1.685 | 1.660 | 1.635 | 1.611 | -1 |
| 1.0 | 1.587 | 1.562 | 1.539 | 1.515 | 1.492 | 1.469 | 1.446 | 1.423 | 1.401 | 1.379 | -1 |
| 1.1 | 1.357 | 1.335 | 1.314 | 1.292 | 1.271 | 1.251 | 1.230 | 1.210 | 1.190 | 1.170 | -1 |
| 1.2 | 1.151* | 1.131* | 1.112* | 1.094* | 1.075* | 1.057* | 1.038* | 1.020* | 1.003* | 9.853 | -2 |
| 1.3 | 9.680 | 9.510 | 9.342 | 9.176 | 9.012 | 8.851 | 8.692 | 8.535 | 8.380 | 8.227 | -2 |
| 1.4 | 8.076 | 7.927 | 7.781 | 7.636 | 7.494 | 7.353 | 7.215 | 7.078 | 6.944 | 6.811 | -2 |
| 1.5 | 6.681 | 6.552 | 6.426 | 6.301 | 6.178 | 6.057 | 5.938 | 5.821 | 5.705 | 5.592 | -2 |
| 1.6 | 5.480 | 5.370 | 5.262 | 5.155 | 5.050 | 4.947 | 4.846 | 4.746 | 4.648 | 4.552 | -2 |
| 1.7 | 4.457 | 4.363 | 4.272 | 4.182 | 4.093 | 4.006 | 3.921 | 3.836 | 3.754 | 3.673 | -2 |
| 1.8 | 3.593 | 3.515 | 3.438 | 3.363 | 3.289 | 3.216 | 3.144 | 3.074 | 3.006 | 2.938 | -2 |
| 1.9 | 2.872 | 2.807 | 2.743 | 2.680 | 2.619 | 2.559 | 2.500 | 2.442 | 2.385 | 2.330 | -2 |
| 2.0 | 2.275 | 2.222 | 2.169 | 2.118 | 2.068 | 2.018 | 1.970 | 1.923 | 1.876 | 1.831 | -2 |
| 2.1 | 1.787 | 1.743 | 1.700 | 1.659 | 1.618 | 1.578 | 1.539 | 1.500 | 1.463 | 1.426 | -2 |
| 2.2 | 1.390 | 1.355 | 1.321 | 1.287 | 1.255 | 1.223 | 1.191 | 1.160 | 1.130 | 1.101 | -2 |
| 2.3 | 1.072* | 1.044* | 1.017* | 9.904 | 9.642 | 9.387 | 9.138 | 8.895 | 8.657 | 8.425 | -3 |
| 2.4 | 8.198 | 7.977 | 7.761 | 7.550 | 7.344 | 7.143 | 6.947 | 6.756 | 6.569 | 6.388 | -3 |
| 2.5 | 6.210 | 6.037 | 5.868 | 5.703 | 5.543 | 5.386 | 5.234 | 5.085 | 4.940 | 4.799 | -3 |
| 2.6 | 4.661 | 4.527 | 4.397 | 4.270 | 4.146 | 4.025 | 3.907 | 3.793 | 3.681 | 3.573 | -3 |
| 2.7 | 3.467 | 3.364 | 3.264 | 3.167 | 3.072 | 2.980 | 2.890 | 2.803 | 2.718 | 2.636 | -3 |
| 2.8 | 2.555 | 2.477 | 2.401 | 2.328 | 2.256 | 2.186 | 2.118 | 2.053 | 1.989 | 1.926 | -3 |
| 2.9 | 1.866 | 1.807 | 1.750 | 1.695 | 1.641 | 1.589 | 1.538 | 1.489 | 1.441 | 1.395 | -3 |
| 3.0 | 1.350 | 1.306 | 1.264 | 1.223 | 1.183 | 1.144 | 1.107 | 1.070 | 1.035 | 1.001 | -3 |
| 3.1 | 9.677 | 9.355 | 9.043 | 8.741 | 8.448 | 8.164 | 7.889 | 7.623 | 7.364 | 7.114 | -4 |
| 3.2 | 6.872 | 6.637 | 6.410 | 6.190 | 5.977 | 5.771 | 5.571 | 5.378 | 5.191 | 5.010 | -4 |
| 3.3 | 4.835 | 4.665 | 4.501 | 4.343 | 4.189 | 4.041 | 3.898 | 3.759 | 3.625 | 3.495 | -4 |
| 3.4 | 3.370 | 3.248 | 3.131 | 3.018 | 2.909 | 2.803 | 2.701 | 2.603 | 2.507 | 2.415 | -4 |
| 3.5 | 2.327 | 2.241 | 2.158 | 2.078 | 2.001 | 1.926 | 1.854 | 1.785 | 1.718 | 1.654 | -4 |
| 3.6 | 1.591 | 1.531 | 1.473 | 1.417 | 1.363 | 1.311 | 1.261 | 1.213 | 1.166 | 1.121 | -4 |
| 3.7 | 1.078* | 1.036* | 9.962 | 9.575 | 9.202 | 8.843 | 8.497 | 8.163 | 7.842 | 7.533 | -5 |
| 3.8 | 7.236 | 6.949 | 6.673 | 6.408 | 6.153 | 5.907 | 5.670 | 5.442 | 5.224 | 5.013 | -5 |
| 3.9 | 4.810 | 4.615 | 4.428 | 4.248 | 4.075 | 3.908 | 3.748 | 3.594 | 3.446 | 3.304 | -5 |
| 4.0 | 3.168 | 3.036 | 2.910 | 2.789 | 2.673 | 2.561 | 2.454 | 2.351 | 2.252 | 2.157 | -5 |
| 4.1 | 2.066 | 1.979 | 1.895 | 1.814 | 1.737 | 1.663 | 1.591 | 1.523 | 1.458 | 1.395 | -5 |
| 4.2 | 1.335* | 1.277* | 1.222* | 1.169* | 1.118* | 1.069* | 1.022* | 9.775 | 9.346 | 8.935 | -6 |
| 4.3 | 8.541 | 8.164 | 7.803 | 7.457 | 7.125 | 6.808 | 6.504 | 6.213 | 5.935 | 5.668 | -6 |
| 4.4 | 5.413 | 5.169 | 4.936 | 4.712 | 4.499 | 4.294 | 4.099 | 3.912 | 3.733 | 3.562 | -6 |
| 4.5 | 3.398 | 3.242 | 3.093 | 2.950 | 2.813 | 2.683 | 2.558 | 2.439 | 2.325 | 2.217 | -6 |
| 4.6 | 2.113 | 2.014 | 1.919 | 1.829 | 1.742 | 1.660 | 1.581 | 1.506 | 1.435 | 1.366 | -6 |
| 4.7 | 1.301* | 1.239* | 1.179* | 1.123* | 1.069* | 1.017* | 9.682 | 9.213 | 8.766 | 8.341 | -7 |
| 4.8 | 7.935 | 7.548 | 7.179 | 6.828 | 6.493 | 6.174 | 5.870 | 5.581 | 5.305 | 5.043 | -7 |
| 4.9 | 4.793 | 4.555 | 4.328 | 4.112 | 3.907 | 3.711 | 3.525 | 3.348 | 3.180 | 3.020 | -7 |
| 5.0 | 2.867 | 2.722 | 2.584 | 2.453 | 2.328 | 2.210 | 2.097 | 1.990 | 1.888 | 1.791 | -7 |
| 5.1 | 1.699 | 1.611 | 1.528 | 1.449 | 1.374 | 1.303 | 1.235 | 1.171 | 1.110 | 1.052 | -7 |
| 5.2 | 9.967 | 9.444 | 8.948 | 8.478 | 8.031 | 7.607 | 7.204 | 6.823 | 6.461 | 6.117 | -8 |
| 5.3 | 5.792 | 5.483 | 5.190 | 4.912 | 4.648 | 4.399 | 4.162 | 3.938 | 3.725 | 3.524 | -8 |
| 5.4 | 3.333 | 3.152 | 2.981 | 2.818 | 2.665 | 2.519 | 2.381 | 2.251 | 2.127 | 2.010 | -8 |
| 5.5 | 1.899 | 1.795 | 1.695 | 1.602 | 1.513 | 1.429 | 1.349 | 1.274 | 1.203 | 1.136 | -8 |
| 5.6 | 1.072* | 1.012* | 9.551 | 9.013 | 8.505 | 8.025 | 7.571 | 7.142 | 6.737 | 6.354 | -9 |
| 5.7 | 5.992 | 5.650 | 5.328 | 5.023 | 4.735 | 4.464 | 4.207 | 3.965 | 3.736 | 3.520 | -9 |
| 5.8 | 3.317 | 3.125 | 2.943 | 2.772 | 2.611 | 2.459 | 2.315 | 2.180 | 2.052 | 1.932 | -9 |
| 5.9 | 1.818 | 1.711 | 1.610 | 1.515 | 1.426 | 1.341 | 1.262 | 1.187 | 1.116 | 1.050 | -9 |

* Läs exponenten på raden ovanför. Ex. $Q(3.71) = 1.036 \times 10^{-4}$. Allmänt gäller

$$(1 - x^{-2}) \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} < Q(x) < \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}. \text{ För stora } x \text{ är } Q(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}.$$

10.2 Marknadsundersökning

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------------|----------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------|
| Uppgrader/ Alvarion | Breeze Access 900 | WLAN | 902 - 928 MHz | 5 km | 23 dBm | Flat | 10 - 13 dB | 3 Mbit/s | Nej | Time Div Duplex | - | GFSK level 2, 4, 8 | - | - | 40000 Kr |
| TFT | 460 Digital STL Transmitter | STL | 940-960 MHz | - | 2 W | - | - | 4 linjära kanaler 44.1 KHz, 9.6 Kbaud | Ja | Simplex | 1 ms | 6-256 QAM | XLR | AES/EBU/ Analog | - |
| Harris | CD link | STL | 920 - 960 MHz | - | 15 W | - | - | 1 linjär 16 bit, 48 KHz AES3, 2 RS232 9600 baud | Ja | Simplex | 8 ms | - | XLR | AES3/ Analog | - |
| Mossley | SL9003Q-RT | STL | (335-512)/ 800-960/ 1350-1535 MHz | - | 27 dBm | Mark gnd/ 1.8 m | 27.5 dB (1500 MHz) 18 dB (950 MHz) | E1/ 1.536 Mbps 16 bit, 4 MPEG, 2 data ch | Ja för ljud, nej för data | Simplex duplex | Linear 0 ms, MPEG 22 ms | 16, 32, 64 QAM | 9 pin D male | AES/EBU | \$12950 |
| Mossley | SL9003Q-RT | STL | (335-512)/ 800-960/ 1350-1535 MHz | - | 27 dBm | Mark gnd/ 1.8 m | 27.5 dB (1500 MHz) 18 dB (950 MHz) | E1/ 1.536 Mbps 16 bit, 4 MPEG, 2 data ch | Ja för ljud, nej för data | Full duplex | Linear 0 ms, MPEG 22 ms | 16, 32, 64 QAM | 9 pin D male | AES/EBU | \$28180 |
| Mossley | NXE1-HS QAM | Mikrolänk | (335-512)/ 800-960/ 1350-1535 MHz | - | (31)/ 30/ 27 dBm | Mark gnd/ 1.8 m | 27.5 dB (1500 MHz) 18 dB (950 MHz) | 2 (4)x E1/T1 (Max 34 Mbit/s) | Ja | Full duplex | - | QPSK/ 16, 32, 64 QAM | V.11/V.35/ RS-449/ RS-232 | G.703, G.704 | \$23330 |
| QamCom/ Ericsson Vyyö | V700DT | Datalänk | 470 - 800 MHz | 80 - 100 km | 100 W | Yagi 7-12 element | 10-13 dBi | 2 Mbit/s | Ja | Full/Half duplex | - | QPSK, 16 QAM 64 QAM | RJ 48, 120 ohm Balanced BNC | - | - |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|----------|--------------------------------------------------------------|---|-------------|---|---|-------------------------------------|----|-------------|--------|-------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------|
| QamCom/ 4 RF | Aprisa XE | DataLink | 330 - 470, 790 - 960, 1350 - 1550, 2000-2700 MHz | - | 29 - 35 dBm | - | - | 312 - 16640 Kbit/s | Ja | Full duplex | - | 16 - 64 QAM, QPSK | RU45*4 E1/T1 120 ohm | G.703/4 | 110000 Kr |
| MDS DR Digitalradio | LEDRA 400F | DataLink | 330 - 512 MHz | - | 29 - 31 dBm | - | - | 1 - 4 E1 2.048 - 8.192 Mbit/s | Ja | Full duplex | - | 16 - 64 QAM QPSK | EIA-530 75-120 ohm | G.703 | 120000 Kr (64000 Kr) |
| TRIO | U Series | DataLink | 330 - 470, 1350 - 1550 MHz | - | 29 - 31 dBm | - | - | 1.024 Mbit/s | Ja | Full duplex | 6-8 ms | 16 - 64 QAM | RU45 *4/ E1 120 ohm | G.703 | - |
| Stratex networks | DXR 100 | DataLink | 330 - 470MHz 1.35 - 1.55, 2.0-2.7 GHz | - | 31-35 dBm | - | - | 2.048 Mbit/s | Ja | Full duplex | - | DQPSK, 16 QAM | ITU-T E1 120 / 75 ohm | G.703 | 120 000 Kr |