

DVB-T och DVB-T2

Teknisk analys och prestandajämförelse

Jari Pirinen 27152
Kandidatavhandling i datateknik
Handledare: Jerker Björkqvist
Institutionen för informationsteknologi
Åbo Akademi
maj 2013

Referat

Förra generationens markbaserade digital-TV-standard DVB-T har varit en teknologisk och kommersiell succé med över 80 användarländer och flera hundra miljoner TV-tittare. Därmed är det inte oväntat att stora förväntningar har lagts på dess efterföljare DVB-T2 vars viktigaste uppdrag blir att slutligen föra Europa in i HDTV-åldern.

Denna avhandling börjar med att ge en allmän inblick i grunderna av digital-TV samt presenterar kort de båda digital-TV-standarderna. Sedan jämförs och analyseras de två standarderna ur teknologisk synvinkel och till slut sammanställs resultaten av olika prestandajämförelser med både stationära och mobila mottagare utförda av forskare och nätverksoperatörer. Dessa betraktas och jämförs sinsemellan med avsikten att ta reda på den praktiska nyttan med övergången till DVB-T2 under olika sändningsförhållanden och huruvida den nya standarden uppfyller de krav som ställts på den.

Sökord: DVB-T, DVB-T2, Digital-TV

Innehållsförteckning

1. Introduktion	1
2. Bakgrund	2
2.1. Digital-TV	2
2.2. DVB-T	3
2.3. DVB-T2	3
2.4. Behov av ny sändningsstandard	4
2.4.1. Begränsat frekvensområde och växande kapacitetsbehov	4
2.4.2. Mobil TV-mottagning	4
3. Teknisk analys av DVB-T och DVB-T2	6
3.1. Modulation	6
3.2. Felkorrigering	8
3.3. Skyddsintervall	9
3.4. Pilotbärvågor	10
3.5. Nya egenskaper i DVB-T2	11
3.5.1. Fysisk-nivå-rör	11
3.5.2. Tids-frekvens-skivning	11
3.5.3. Framtida utvidgningsramar	12
3.5.4. Multipla ingångar med en utgång	13
4. Prestandajämförelse av DVB-T och DVB-T2	14
4.1. Jämförelsemetoder och kanalmodeller	14
4.2. Presentation och resultat av utförda prestandajämförelser	15
4.2.1. Eizmendi m.fl., Sevilla	15
4.2.2. Eizmendi m.fl., Vitoria-Gasteiz	16
4.2.3. Polak och Kratochvil, stationära mottagare	17
4.2.4. Polak och Kratochvil, mobila mottagare	18
4.2.5. Media Broadcast GmbH	18
4.2.6. Gozálviz m.fl.	19
5. Slutsatser	21
Litteraturförteckning	22

Lista över förkortningar

AAC	Advanced Audio Coding, effektiv ljudkomprimeringsmetod använd i digital-TV.
AC-3	Ljudkomprimeringsmetod använd i digital-TV och DVD, känd som Dolby Digital.
ATSC	Amerikansk standard för digital-TV, används främst i Nordamerika.
AWGN	Additive White Gaussian Noise, en ofta använd bruskaraktär för kanalmodeller.
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenheim, en effektiv felkorrigeringsmetod använd i DVB-T2
BER	Bit error rate, bitfelsnivå.
CENELEC	Den europeiska kommittén för elektroteknisk standardisering.
CNR eller C/N	Carrier-to-noise ratio, bärvågs-brusförhållande. Ett mått på signalkvalitet.
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, en modulationsmetod.
DVB-C/C2	Standarder för digital kabel-TV.
DVB-H	Standard för mobil-TV.
DVB-NGH	Ny standard för mobil-TV som förväntas tas i bruk år 2015.
DVB-S/S2	Standarder för digital satellit-TV.
DVB-T/T2	Standarder för markbaserad digital-TV.
EBU	European Broadcasting Union, Europeiska radio- och TV-unionen.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, standardiseringsorgan.
FEC	Forward error correction, felkorrigering baserad på redundans.
FEF	Future Extension Frames, framtida utvidgningsramar.
H.264	Se MPEG-4 AVC.
HDTV	High-definition Television, högupplösnings-TV.
ISDB-T	Japansk standard för markbaserad digital-TV.
LDPC	Low-density parity-check code, effektiv felkorrigeringsmetod i DVB-T2.
Mbps	Megabit per sekund, enhet för överföringshastighet.
MER	Modulation error rate, modulationfelsnivå.
MIMO	Multiple Input Multiple Output, rumsdiversitetsmetod, flera sändare och mottagare.
MISO	Multiple Input Single Output, rumsdiversitetsmetod, flera sändare en mottagare.
MPEG-2	Standard för digital bildkomprimering, används ofta med DVB-T.
MPEG-4 AVC	Modernare standard för digital bildkomprimering, används ofta med DVB-T2.
NICAM	Föråldrad standard för digital ljudkomprimering.
OFDM	Se COFDM.
PLP	Physical Layer Pipes, fysisk-nivå rör använda i DVB-T2.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, ofta använt digitalt modulationsschema.
QPSK	Quadrature phase-shift keying, digitalt modulationsschema.
RC20	Kanalmodell med 20 oberoende Rice-signalvägar.
RL20	Kanalmodell med 20 oberoende Rayleigh-signalvägar.
SDTV	Standard-definition Television, standardupplösnings-TV.
SIMO	Single Input Multiple Output, rumsdiversitetsmetod, en sändare flera mottagare.
SISO	Single Input Single Output, ingen rumsdiversitet, en sändare och en mottagare.
SNR eller S/N	Signal-to-noise ratio, signal-brusförhållande. Ett mått på signalkvalitet.
TFS	Time Frequency Slicing, tids-frekvens-skivning.
UHF	Ultra High Frequency, radiofrekvenser mellan 300 MHz och 3 GHz.
VHF	Very High Frequency, radiofrekvenser mellan 30 MHz och 300 MHz.

1. Introduktion

Under de senaste 15 åren har ett stort antal länders TV-sändningar gradvis övergått från analoga till digitala. Detta har möjliggjort en effektivare användning och vidareallokering av radiofrekvensspektret som blivit en allt värdefullare resurs. Den år 1997 introducerade europeiska standarden för markbaserade digital-TV-sändningar, DVB-T, har tagits i bruk eller skall tas i bruk i över 80 länder världen över medan dess konkurrenter ATSC och ISDB-T har avnjutit betydligt mindre geografisk utsträckning.

År 2006 påbörjade DVB-konsortiet förberedande arbete för att skapa en efterföljare till DVB-T med avsikten att vidare förbättra sändningskapaciteten och funktionaliteten i mobila mottagare. Den fortsatta teknologiska utvecklingen som medfört nedsatt pris av hårdvara har möjliggjort att den andra generationens sändningsstandard DVB-T2 utnyttjar sådana tekniska lösningar som inte hade varit möjliga eller realistiska tio år tidigare då DVB-T utvecklades.

Syftet med denna kandidatavhandling är att tekniskt och prestandamässigt jämföra den nya digital-TV-sändningsstandard DVB-T2 med sin föregångare DVB-T med avsikt att lyfta fram skillnader i de tekniska lösningarna samt vilka praktiska fördelar dessa för med sig. Olika prestandajämförelser utförda och publicerade av forskare presenteras och diskuteras. Avhandlingen ger också en bakgrundsinsblick i digital-TV och orsakerna bakom digitaliseringen av TV-sändningar samt orsakerna varför DVB-konsortiet ansåg att en efterföljare till DVB-T behövde utvecklas.

2. Bakgrund

2.1. Digital-TV

Följande stycken bestående av allmän bakgrundsinformation om digital-TV baserar sig på boken *Teräväpiirtotelevisio* av Ari Ikonen [1]. Digital TV-sändning innebär att en digital signal som innehåller bild- och ljudströmmar samt eventuellt annan data moduleras i en bärvåg som sänds över ett fysiskt medium, exempelvis en kabel eller genom luften. Denna modulation samt hur den implementerats i DVB-T och DVB-T2 behandlas senare i denna avhandling. I praktiken möjliggör digital sändning ett mycket effektivare utnyttjande av det begränsade radiofrekvensspektrat eftersom till och med 20 digitala TV-kanaler kan sändas i samma frekvensbandbredd som en analog TV-kanal.

I praktiken komprimeras bild- och ljudsignalen i digital-TV alltid genom destruktiva komprimeringsmetoder som försämrar den ursprungliga bild- och ljudkvaliteten enligt förvalda eller dynamiskt bestämda kriterier för att ytterligare spara bandbredd. De vanligaste komprimeringsmetoderna i moderna digital-TV-system är MPEG-2 och MPEG-4 AVC (även känd som H.264) för den digitala videobilden och MPEG-1 Layer II, MPEG-1 Layer III, Dolby AC-3 samt MPEG-2/4 AAC för den digitala ljudsignalen. Digital bild- och ljudkomprimering kommer inte att behandlas i denna avhandling.

Digital-TVs historia sträcker sig tillbaka ända till 1970-talet då de första digitala tilläggstjänsterna till analog-TV utvecklades: Text-TV och NICAM-stereoljud (Near Instantaneous Companded Audio Multiplex). Under 1980- och 1990-talen blev digital bild- och ljudbehandling allt allmännare dels inom AV-industrin och dels i hemmens TV-apparater trots att själva TV-sändningarna fortfarande var analoga. Trots ett antal tidigare experimentella lösningar kom digitaliseringen av TV-sändningar ordentligt igång först år 1994 då den första av DVB-standarderna, satellit-TV-standarden DVB-S, lanserades. Efter denna följde år 1996 DVB-C för kabelnätets TV-sändningar samt år 1997 DVB-T för markbaserade TV-sändningar. Den andra generationens standarder DVB-S2, DVB-T2 och DVB-C2 introducerades 2004, 2008 och 2009. Dessa möjliggör ett ännu effektivare utnyttjande av frekvensbandbredden jämfört med sina föregångare.

2.2. DVB-T

Enligt Ikonen [1] påbörjade ETSI, CENELEC och EBU det gemensamma DVB-projektet (Digital Video Broadcasting) med avsikt att skapa en ny öppen standard för digitala TV-sändningar. Utgångsläget för DVB-standarderna är alltid de kommersiella kravena. Efter att de kommersiella kravena fastslagits i DVB Commercial Module föreslår DVB Technical Module vilka tekniska lösningar som kan uppfylla de kommersiella kravena. DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) definierar de standarderna och specifikationerna som används vid terrestrial (markbaserad) sändning. Dessa inkluderar standarder för bland annat transmission, multiplexning, bild- och ljudkomprimering, textning samt kopieringsskydd.

DVB-T möjliggör en mycket effektivare användning av frekvensspektret eftersom upp till 12 TV-kanaler kan sändas i en vanlig 8 MHz kanalmultiplex i stället för en enda analog TV-kanal.

2.3. DVB-T2

När utvecklingsarbetet av DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial) påbörjades år 2006 specificerade [2] DVB-projektet 21 kommersiella krav, bland annat att den nya sändningsstandarderna måste kunna använda existerande TV-antennerna och sändare samt uppnå minst 30% kapacitetsförbättring under samma sändningsförhållanden jämfört med DVB-T. Utgående ifrån dessa kommersiella krav började DVB-projektets tekniska modul utreda vilka teknologiska lösningar som behövs. DVB-T2 utnyttjar de senaste framstegen inom digital modulation och felkorrigering för att möjliggöra en sådan nivå av bandbredd och signalrobusthet som inte var möjlig då DVB-T utvecklades.

Fram till augusti 2012 har DVB-T2 tagits i bruk i 16 länder och totalt 57 länder har valt den till sin nästa digital-TV-standard [3]. Storbritannien blev år 2010 första land som officiellt tog i bruk ett landsomfattande DVB-T2-sändningsnät med Italien, Sverige och Finland kort efterföljande år 2010 och 2011. I Finland administreras DVB-T2-nätet av DNA Oy och det täcker över 80% av landets befolkning. [4]

2.4. Behov av ny sändningsstandard

2.4.1. Begränsat frekvensområde och växande kapacitetsbehov

Följande stycken baserar sig huvudsakligen på dokumentet *Understanding DVB-T2* av The Digital Terrestrial Television Action Group [2]. Markbaserade TV-sändningar har i allmänhet använt delar av VHF- och UHF-frekvensområdena vid 174-230 MHz och 470-862 MHz eftersom dessa frekvensområden erbjuder en bra balans mellan täckningsarea och sändningseffekt. Under senaste tiden har många företag och institutioner lagt fram önskemål om att i synnerhet UHF-området bör omallokeras till andra kommersiella och icke-kommersiella ändamål som exempelvis mobilbredband, trådlösa mikrofoner och räddningstjänsters kommunikation. Detta skulle kräva att TV-sändningarna på UHF-området måste kunna effektivare utnyttja det förminskade frekvensområdet.

Mängden TV-kanaler har under de senaste 30 åren exploderat i kabel- och satellit-TV men terrestrialnätet har ända upp till slutet av 1990-talet haft endast en handfull kanaler på grund av det begränsade frekvensspektret. Det VHF-frekvensområde som allokerats till TV-sändningar rymmer även i optimalt fall endast åtta analoga TV-kanaler men i och med DVB-T2 och avancerade komprimeringsalgoritmer kan samma frekvensområde lätt rymma över hundra standarddefinitions-TV-kanaler eller alternativt flera tiotals HDTV-kanaler. I synnerhet högupplösningstelevisionens (High-definition television, HDTV) ökade kapacitetbehov har varit en viktig faktor vid utvecklingen av DVB-T2, trots att HDTV-sändningar med förra generationens DVB-T är tekniskt möjliga och även utrustade i flera länder. DVB-T2 möjliggör minst 3-4 HDTV-kanaler i en 8 MHz kanalmultiplex jämfört med 2-3 i DVB-T.

2.4.2. Mobil TV-mottagning

DVB-T2 är också bättre lämpad för mobil mottagning [3] än sin föregångare eftersom standarden har ända från början planerats med tanke på mobila mottagare och har senare utvidgats med en skild sändningsprofil för ändamålet. T2-Lite är en delmängd av DVB-T2 som inkluderar endast de element som är relevanta för mobil mottagning vilket möjliggör att mottagarna görs mindre komplexa och därmed

billigare och mera energisnåla. DVB-T2 och T2-Lite kan sändas i samma frekvenskanal trots att de två TV-sändningarna kan använda fullständigt olika sändningsparametrar. T2-Lite introducerades av DVB-konsortiet i juli 2011 i och med en ny version av DVB-T2 men den är inte en del av den ursprungliga standarden och stöds därför inte av alla mottagare.

Mobil TV-mottagning är ingenting nytt trots att den varit en orsak för utvecklingen av DVB-T2 [5]. DVB-H (Digital Video Broadcasting – Handheld) är en år 2004 publicerad utvidgning av DVB-T som är liksom T2-Lite menad till mobil TV-mottagning och kan samexistera i samma kanalmultiplex som DVB-T. Test- och kommersiella sändningar av DVB-H har utförts i mer än 20 länder men konsumentintresset och tillgängligheten av mottagarhårdvara har varit mycket låg och de flesta DVB-H-sändningar har avslutats och deras multiplexar omvandlats till DVB-T2 eller T2-Lite. Utvecklingen av mobila digital-TV-mottagare bortom T2-Lite fortsätter i form av DVB-NGH (Digital Video Broadcasting – Next Generation Handheld) som är baserad på DVB-T2, standardiserades av ETSI år 2013 och de första kommersiella mottagarna förväntas komma på marknaden år 2015.

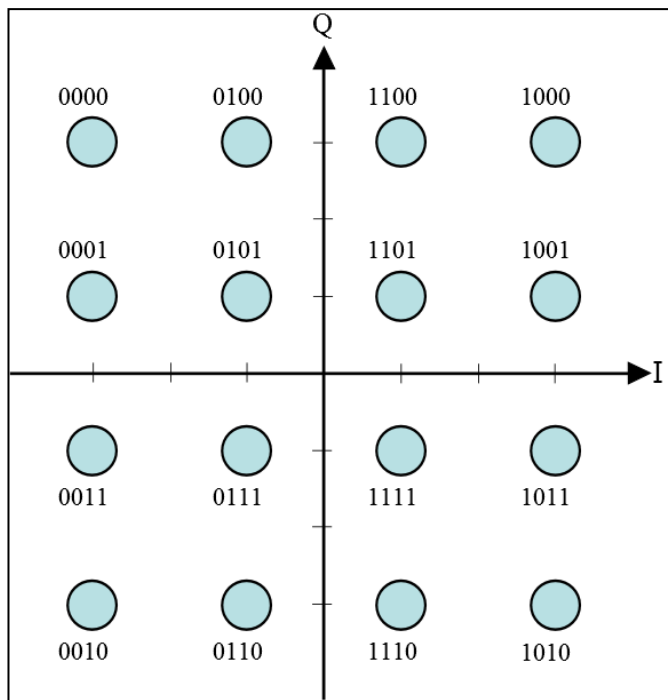
3. Teknisk analys av DVB-T och DVB-T2

3.1. Modulation

Följande stycken bestående av allmän bakgrundsinformation baserar sig på boken *Teräväpiirtotelevisio* av Ari Ikonen [1]. TV-sändningar sänds som analoga radiovågor trots att sändningens innehåll är i form av en digital bitström. De första digitala modulationsmetoderna baserade sig på ändring av bärvågens amplitud eller fas. Amplituden beskriver den sinusformade vågens höjd och fasen beskriver dess förskjutning i förhållande till en referenspunkt. Praktiskt taget alla moderna modulationsmetoder baserar sig på användning av två bärvågor med samma frekvens. Metoden kallas IQ-modulation vars namn kommer från bärvågornas faser, In phase och Quadrature phase. Quadrature phase innebär att bärvågorna är sinsemellan 90 grader fasförskjutna.

Den enklaste av dessa IQ-modulationer är QPSK (Quadrature Phase-shift Keying). I QPSK har vardera bärvåg två alternativa värden vilket innebär att vardera kan förmedla en bit information. QPSK har vidareutvecklats till 8-PSK, var signalens fas har totalt åtta olika värden. Den överförda bitmängden ökar då till tre men å andra sidan blir mottagningen mera krävande eftersom mottagaren måste känna igen mindre fasförändringar. Ett annat sätt att förbättra QPSK är att ge förutom signalens fas även dess amplitud flera alternativa värden. I QAM-modulation (Quadrature Amplitude Modulation) har man utökat amplitud- och fasalternativen så att det finns 16 (16-QAM), 64 (64-QAM) eller 256 (256-QAM) olika amplitud- och faskombinationer, även kallade konstellationspunkter.

En digital symbol är en puls som representerar ett antal bitar. Symbolhastighet är ett begrepp som anger mängden symboler som överförs per sekund. Eftersom en symbol kan överföra en eller flera bitar är bithastigheten oftast större än symbolhastigheten. En QPSK-modulerad signal innehåller två bitar information per symbol. Mera avancerade modulationsscheman som 16-QAM, 64-QAM och 256-QAM kan överföra allt flera bitar i en symbol, i dessa respektive fall 4, 6 och 8 bitar. 16-QAM-modulationsschemat och dess möjliga bitsträngar har illustrerats i figur 1.

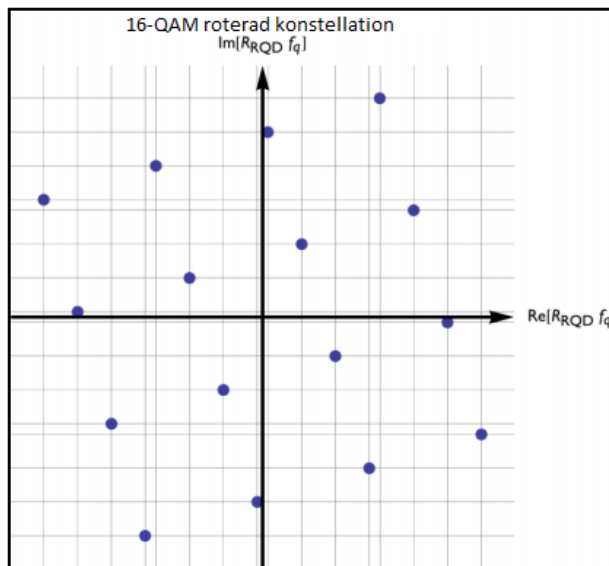


Figur 1: 16-QAM med 16 möjliga konstellationspunkter överför fyra bitar i gången. Källa: [6]

Både DVB-T och DVB-T2 använder som modulationsmetod COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Modulation) som är praktiskt taget identisk med det allmännare använda begreppet OFDM. Den innebär att bärvågorna placeras delvis på varandra i stället för på bredvidliggande frekvensband. Tack vare detta ökar den spektrala effektiviteten med cirka 50%. Trots att bärvågorna är delvis på varandra så stör de inte varandra eftersom de är ortogonala, det vill säga vinkelräta mot varandra. OFDM använder tusentals bärvågor i stället för en. Ju fler enskilda bärvågor placeras i en kanal, desto mindre bitström behöver överföras av varje enskild bärvåg. Varje OFDM-bärvåg moduleras med många faser och amplituder. Till exempel DVB-T använder som COFDM-modulationens modulationsschema endera QPSK, 16-QAM eller 64-QAM medan DVB-T2 stöder förutom dessa även den mera avancerade 256-QAM.

Antalet OFDM-modulerade bärvågor är i DVB-T endera 1705 (2k mode) eller 6817 (8k mode) [4]. Därmed ligger bärvågorna i en vanlig 8 MHz UHF-kanal cirka en kilohertz ifrån varandra då man använder 8k-bärvågor. Detta leder till att symbolhastigheten per bärvåg blir låg vilket i praktiska implementationer lämpar sig väl för stationära singelfrekvensnät med 80-100 km mellan sändarna. Med 2k-bärvågor är däremot symbolhastigheten per bärvåg fyrdubbel och avståndet mellan

bärvågorna större, vilket kräver kortare avstånd mellan sändarna men å andra sidan lämpar sig bättre för mobil mottagning. Stöd för både 2k- och 8k-bärvågor ingår i DVB-T-standarden för att tillfredsställa olika TV-nätverksoperatörers användningsändamål och -omständigheter. DVB-T2 stöder förutom de tidigare 2k- och 8k-bärvågorna även 1k-, 4k-, 16k- och 32k-bärvågor.



Figur 2: 16-QAM roterad konstellation. Fyra bitar i gången kan överföras liksom i Figur 1. Källa: [4]

Förutom det nya 256-QAM-modulationsschemat stöder DVB-T2 även roterad konstellation (figur 2), vilket innebär att signalens amplitud- och fasvärden inte utsträcker sig i en rät konstellation kring symmetriska I- och Q-axlar utan roteras kring konstellersaxlarna så att varje konstellerspunkt har unika I- och Q-värden. Detta medför en högre feltolerans eftersom det fortfarande är möjligt att tolka en enskild konstellerspunkt trots att det uppkommit en störning i signalen som gjort att ett I- eller Q-värde inte går att avläsa.

3.2. Felkorrigering

Följande allmänna information om felkorrigering och dess implementation i DVB-T och DVB-T2 baserar sig på boken *Teräväpiirtotelevisio* av Ari Ikonen [1]. Felkorrigering baserad på redundans (Forward Error Correction, FEC) innebär att signalen består förutom av det egentliga datainnehållet även av matematiskt utvalt redundant data (felkorrigeringskod) som hjälper mottagaren att återbygga en

komplett datahelhet trots att en del av datat förlorats på grund av dålig transmission. Felkorrigering minskar således den totala överföringskapaciteten (bitar per sekund) av nyttodata men ökar signalens kvalitet i och med att en stor del av transmissionsfel som uppstår kan korrigeras.

I DVB-T och DVB-T2 används felkorrigering på två olika nivåer. Man kan föreställa sig de inre och yttre nivåerna av felkorrigering som två nästade skal som skyddar signalen under transmissionen. DVB-T använder som yttre felkorrigeringsmetod Reed-Solomon-kodning och som inre felkorrigeringsmetod konvolutionskodning. Reed-Solomon-kodningen används i DVB-T med ojusterbara parametrar och förstörar sändningens 188 byte stora paket till 204 bytes, den ökar alltså kapacitetsbrukningen med ca 8,5% och kan maximalt korrigera sju byte-fel. Konvolutionskodning är en kontinuerlig process var den serieformade bitströmmen roteras igenom en matematisk sekvenslogik. Denna metods felkorrigeringsnivå kan justeras så att ju fler tilläggsbitar som används till felkorrigering desto fler felaktiga bitar kan korrigeras. Felkorrigeringsnivån anges som ett bråkantal som bestämmer andelen bitar som används till nyttodatat, till exempel en konvolutionskodning med felkorrigeringsnivån $3/4$ betyder att en fjärdedel av bitströmmen används till felkorrigeringsdata och tre fjärdedelar till nyttodata. DVB-T stöder nivåerna $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ och $7/8$.

DVB-T2 använder [3] som yttre felkorrigeringsmetod BCH-kodning (Bose-Chaudhuri-Hocquengheim) som lägger till endast 0,3% felkorrigeringsdata jämfört med Reed-Solomons 8,5% i DVB-T. Som inre felkorrigeringsmetod används den effektiva metoden LDPC (Low Density Parity Check) med valbara nivåerna $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$ och $5/6$. Dessa mera avancerade felkorrigeringsmetoder möjliggör en bättre kompromiss mellan feltolerans och nyttodatamängd än de primitivare metoderna använda i DVB-T.

3.3. Skyddsintervall

Följande styckens bakgrundsinformation om skyddsintervall baserar sig på boken *Teräväpiirtotelevisio* av Ari Ikonen [1]. Skyddsintervall behövs för att förhindra störningar som uppkommer när signalen reflekteras och därmed anländer till

mottagaren i form av ett eko. Genom att lämna lite tomrum mellan varje symbol undviks att symbolerna upptar störningar från ekon av den föregående symbolen, inter-symbol-interferens (Intersymbol Interference, ISI). I COFDM ligger skyddsintervallerna i början av varje symbol och i praktiska implementationer sänds inte en tom signal under skyddsintervallerna utan det kopieras en lämplig längd snutt från slutet av symbolen vilket vidare minskar störningar från efterliggande symboler.

Skyddsintervallen anges i form av bråkdelar av symbolperioden. DVB-T stöder skyddsintervallen $1/4$, $1/8$, $1/16$ och $1/32$. DVB-T2 stöder förutom dessa även intervallen $19/256$, $19/128$ och $1/128$. I praktiken innebär skyddsintervallen en justerbar kompromiss mellan signalens robusthet och överföringskapacitet. Ett litet skyddsintervall möjliggör högre överföringskapacitet (bitar per sekund) men gör signalen mera sårbar för störningar och vice versa.

3.4. Pilotbärvågor

Pilotbärvågor [1] är bärvågor som inte innehåller nyttodata utan referensinformation som används till att synkronisera signalen och mäta transmissionskanalens prestanda (kanalestimation). Dessa sänds 3 dB förstärkta jämfört med de vanliga bärvågorna och uppdelas i regelbundna och utspridda pilotbärvågor. De regelbundna pilotbärvågorna används till att synkronisera klocksignalen och finjustera signalfrekvensen samt till att korrigera frekvensförskjutningar orsakade av dopplereffekten i mobil mottagning. En del av pilotbärvågorna är utspridda piloter som används till att korrigera amplitudförskjutningar som uppstår när signalen ekar. I DVB-T är 2,6% av bärvågorna regelbundna piloter och 8% utspridda piloter medan DVB-T2 använder 0,35% av bärvågorna till regelbundna piloter och 1%, 2%, 4% eller 8% till utspridda piloter [3]. I DVB-T2 används pilotbärvågorna med mera eftertanke än i DVB-T och varje modulationsparameter har ett eget optimerat användningssätt för pilotbärvågorna vilket medför att mindre andel pilotbärvågor behövs och tillåter därmed en effektivare nyttoanvändning av kanalbandbredden.

Tabell 1: Sammanfattande jämförelse av tekniska egenskaperna i DVB-T och DVB-T2

	DVB-T	DVB-T2
Modulationsmetod	COFDM	COFDM
Modulationsscheman	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Antal bärvågor	2k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
Felkorrigering	Reed-Solomon + konvolutionskodning	LDPC + BCH
Felkorrigeringsnivåer	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Skyddsintervall	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128
Kanalbandbredd	6, 7 eller 8 MHz	1,7, 5, 6, 7, 8 eller 10 MHz
Utspridda piloter	8%	1%, 2%, 4% eller 8%
Regelbundna piloter	2,6%	0,35%

3.5. Nya egenskaper i DVB-T2

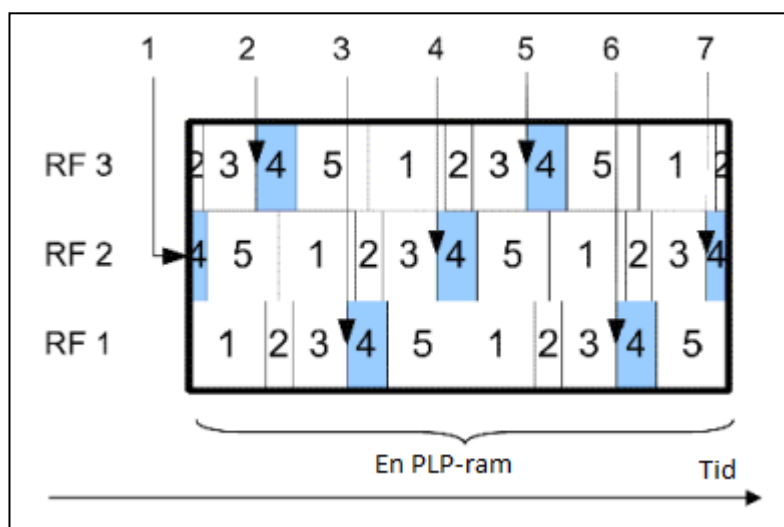
3.5.1. Fysisk-nivå-rör

I DVB-T2 består sändningskanalen av fysisk-nivå-rör (Physical Layer Pipes, PLP) [1] som gör det möjligt att sända flera parallella multiplex, ända upp till 256 stycken, inom en fysisk frekvenskanal. Dessa PLP:n är flexibla och kan innehålla MPEG-transportströmmar (Transport Streams, TS) som i DVB-T eller nya generiska ströminkapslingar (Generic Stream Encapsulations, GSE) vilka kan innehålla till exempel IP-baserade paketströmmar. Olika PLP:n kan ha olika modulationsschema, felkorrigeringsnivå och skyddsintervall [3]. Därmed kan samma TV-sändare sända olika typers innehåll till olika användningsändamål, till exempel en 3D-TV-sändning, en högklassig HDTV-sändning för stationära mottagare och en robustare SDTV-sändning för mobila mottagare.

3.5.2. Tids-frekvens-skivning

Tids-frekvens-skivning (Time Frequency Slicing, TFS) [1] gör det möjligt att utnyttja den tillgängliga kanalbandbredden mycket effektivt. TFS kombinerar flera frekvenskanalers kapacitet till en större dataströmshelhet (figur 3), till exempel fem stycken 30 Mbps sändningskanaler kan kombineras till en 150 Mbps dataström. I DVB-T2 används TFS tillsammans med statistisk multiplexning (statistical multiplexing) vilket leder till att den resulterande ”superkanalen” kan förmedla flera TV-kanaler än vad de enskilda frekvenskanalerna hade klarat av. Orsaken till detta är att TV-sändningars bitström inte är jämn utan ofta sänds i skurar. Då när det är

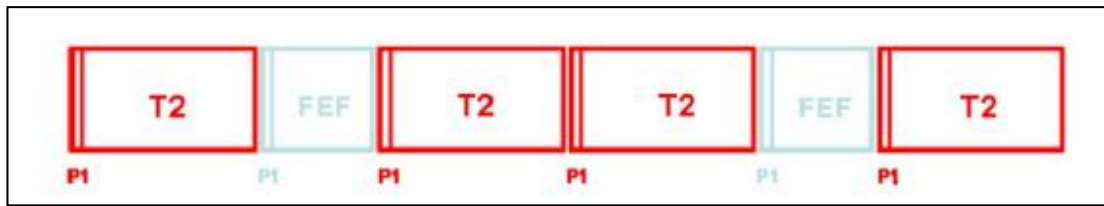
mycket rörelse i rutan krävs en betydligt högre bitström än under lugnare programstunder. När en TFS-dataström har till exempel 24 HDTV-kanaler kan den genomsnittliga dataströmmens hastighet bättre utnyttjas än i mindre kanalmultiplex som har 3-5 HDTV-kanaler eftersom vi har en betydligt större datapool att applicera statistisk multiplexning på. Kapacitetsförbättringen är typiskt av storleksklass 15-20% och i bästa fall till och med över 30%. Användning av TFS kräver i praktiken att mottagarapparaten har två DVB-T2-mottagare eftersom dataströmmen hoppar snabbt mellan flera olika kanaler. De mottagarapparater som uppfyller den nordiska NorDig-standarden kan också utnyttja TFS-sändningar.



Figur 3: Tids-frekvens-skivning utspridd över tre frekvenskanaler (RF 1-3). Källa: [4]

3.5.3. Framtida utvidgningsramar

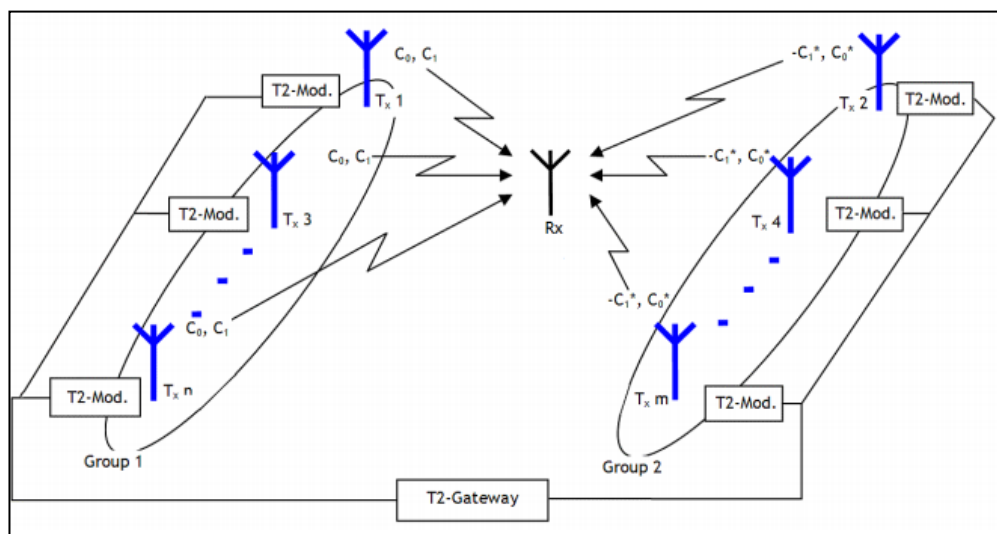
Framtida utvidgningsramar (Future Extension Frames, FEF) [4] är dataramar som möjliggör att man i samma multiplex kan sända både vanliga DVB-T2-sändningar och sådana nya eller utvidgade sändningstyper som inte ännu specificerats i den ursprungliga standarden. FEF-ramarna läggs in mellan T2-ramar (figur 4) och deras innehåll kan vara oförståeligt för mottagare som endast implementerar den grundläggande standarden men då förutsätts ändå att mottagaren klarar av att korrekt identifiera och ignorera FEF-ramarna. Dessa framtida FEF-tjänster kan vara till exempel en returkanal för data från klienten till sändaren eller mobilsändningar enligt den tidigare nämnda T2-Lite-standardutvidgningen eller den nya DVB-NGH-standard.



Figur 4: FEF-ramar läggs in mellan vanliga T2-ramar. Ramarnas början signaleras med en P1-symbol. Källa: [4]

3.5.4. Multipla ingångar med en utgång

I motsats till DVB-T stöder DVB-T2 rumsdiversitetsmetoden multipla ingångar med en utgång (Multiple Input Single Output, MISO) [4] vilket innebär att två eller flera något olika versioner av samma signal tas emot från två eller flera geografiskt utspridda grupper av sändare (figur 5). Genom att utnyttja flera nästan identiska signaler ur flera olika källor uppnår vi de positiva egenskaperna av transmissionsdiversitet såsom bättre signal-brusförhållande vilket leder till bättre täckningsarea eller överföringskapacitet. Ett MISO-nätverk är en speciell form av singelfrekvensnät (Single Frequency Network, SFN) var de olika sändningarna kräver en noggrann synkronisering i mottagaren. I DVB-T2 baserar sig MISO-implementationen på Alamoutis metod som möjliggör en enkel MISO-lösning utan ett större behov av extra komplexitet i vare sig sändaren eller mottagaren. I MISO används endast en mottagarantenn, ifall man använder både flera sändare och flera mottagare kallas metoden multipla ingångar med multipla utgångar (Multiple Input Multiple Output, MIMO) vilken inte direkt stöds av DVB-T2-standarden.



Figur 5: Schematisk bild av MISO bestående av två sändargrupper. Källa: [4]

4. Prestandajämförelse av DVB-T och DVB-T2

4.1. Jämförelsemetoder och kanalmodeller

Ikonen [1] skriver att när de kommersiella kraven för DVB-T2 definierades var en av förutsättningarna att den nya sändningsstandarden bör uppnå minst 30% högre bandbredd än DVB-T under identiska förhållanden. När vi vill jämföra olika sändningsstandarder sinsemellan kan vi betrakta flera olika saker, till exempel uppnådd bandbredd med identiska sändningsparametrar och –förhållanden, uppnådd bandbredd med identisk signalkvalitet eller uppnådd geografisk täckningsarea med samma bandbredd. I stället för det traditionella signal-brusförhållandet (signal-to-noise ratio, SNR eller S/N) används vid jämförelse av digitalt modulerade signalers kvalitet ofta det bättre lämpade bärvåg-brusförhållandet (carrier-to-noise ratio, CNR eller C/N). CNR beskriver det relativa styrkeförhållandet mellan bärvågens nyttosignal och dess brus och anges oftast i decibel (dB). Också bitfelsnivå (bit error rate, BER) och modulationfelsnivå (modulation error rate, MER) används ibland för att mäta signalkvaliteten.

Enligt Jäämaa [7] används vid jämförelser ofta så kallade kanalmodeller (channel models) som är teoretiska simulationsmodeller av det fysiska mediet mellan sändaren och mottagaren, till exempel atmosfären eller en kabel. Signalen som sänds i denna kanal upptar allmänt olika typer av förvrängningar som kan orsakas av till exempel byggnader, terräng eller störningar från andra sändningar. Olika kanalmodeller försöker därmed matematiskt modellera dessa olika typer av förvrängningar så bra som möjligt, det vill säga hur signalen förändras då den färdas från sändaren till mottagaren. Det finns ett stort antal olika typer av kanalmodeller och några allmänt använda är additiv bruskanal, linjär kanal och linjär tidsvarierande kanal. I en additiv bruskanal summeras signalen med additivt slumpmässigt brus och en ofta använd bruskaraktär är additivt vitt gaussiskt brus (Additive white Gaussian noise, AWGN) varvid kanalmodellen kallas en AWGN-kanal. Linjära kanalmodeller används främst för att modellera kabeltransmissioner och är såvida inte aktuella i denna avhandling. Linjära tidsvarierande kanalmodeller, till exempel Rayleigh-kanaler med indirekta signalvägar och Rice-kanaler med direkta signalvägar, är aktuella för sändningar som påverkas av dämpning och flervägspropagering vilket innebär att de lämpar sig väl till att modellera radiosändningar och används därför ofta som kanalmodell för

digital-TV-sändningar. Vid modellering av flervägspropagering kan man beteckna kanalmodellerna med mängden signalvägar som de simulerar, till exempel RL20 innebär en Rayleigh-kanal med 20 oberoende signalvägar.

4.2. Presentation och resultat av utförda prestandajämförelser

4.2.1. Eizmendi m.fl., Sevilla

En forskargrupp från Baskiens universitet ledd av Iñaki Eizmendi [8] utförde fälttester i Sevilla i södra Spanien. I testerna jämfördes DVB-T2-sändningar användande fyra olika kombinationer av sändningsparametrar med de existerande DVB-T-sändningarna i Spanien. Målsättningen var att jämföra den praktiskt uppnådda nyttobandbredden vid samma signalkvalitet (CNR). Alla tester utfördes på en vanlig 8 MHz UHF-kanal. Tabell 2 presenterar de olika testuppsättningarna.

Tabell 2: Presentation av de sex olika testuppsättningarna i Sevillas DVB-T/DVB-T2 –fälttest. Källa: [8]

Testuppsättning	1	2	3	4	5	6
Sändningsstandard	DVB-T	DVB-T	DVB-T2	DVB-T2	DVB-T2	DVB-T2
Antal bärvågor	8k	8k	32k	32k	8k	8k
Skyddsintervall	1/4	1/4	1/128	1/128	1/32	1/32
Modulationsschema	64-QAM	64-QAM	256-QAM	256-QAM	256-QAM	64-QAM
Roterad konstellation	-	-	NEJ	JA	JA	JA
Felkorrigeringsnivå	2/3	3/4	3/5	3/5	3/5	3/4
Bandbredd (Mbps)	19,9	22,4	36,1	36,1	35,3	33,0
CNR (dB) teoretisk	16,5	18,0	16,0	16,0	16,0	15,1
CNR (dB) uppmätt	17,4	19,1	17,9	17,9	18,2	16,0

Testuppsättning 1 fungerar som referensuppsättning och använder samma sändningsparametrar som Spaniens existerande DVB-T-sändningar. Testuppsättning 2 är lika som föregående förutom att felkorrigeringsnivån sänkts från 2/3 till 3/4, det vill säga att endast 1/4 av datat är felkorrigeringsdata i jämförelse till 1/3. Detta medför en ca 13% högre bandbredd men kräver å andra sidan en högre signalkvalitet för att uppnås, vilket innebär mindre geografisk täckning med samma sändningsstyrka. Testuppsättningarna 3, 4 och 5 reflekterar bäst den praktiska förbättringen som DVB-T2 erbjuder i förhållande till DVB-T. Ur tabell 2 ser vi att med testuppsättning 3 och 4 uppnår DVB-T2 en ca 80% förbättring i bandbredden med jämförbar signalkvalitet. Detta är betydligt mera än den 30% förbättring som

specificerades i DVB-konsortiets kommersiella krav. Användande samma 1/4 skyddsintervall som i DVB-T är förbättringen i bandbredd ca 70%. En intressant observation är att DVB-T2 med 64-QAM som modulationsschema verkar uppnå en bättre relativ bandbredd i förhållande till signalkvaliteten än med 256-QAM.

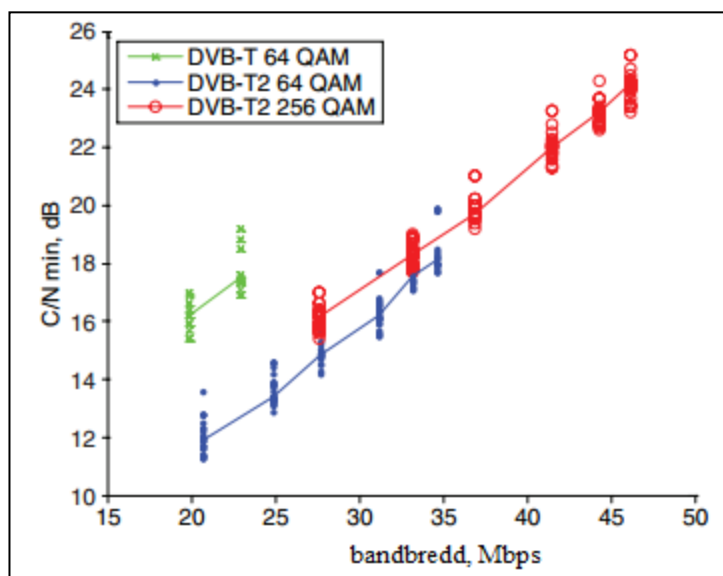
4.2.2. Eizmendi m.fl., Vitoria-Gasteiz

Eizmendi har även utfört ett annat fälttest [9], denna gång i Vitoria-Gasteiz i norra Spanien med en mindre forskargrupp. Rapporten jämför CNR-signalkvalitet och uppnådd bandbredd mellan DVB-T och DVB-T2 användande olika modulationsscheman och felkorrigeringsnivåer. Resultaten kan avläsas ur tabell 3. Som gemensamma parametrar för de olika DVB-T2-testuppsättningarna användes 32k-bärvågor, 1/16 skyddsintervall och roterad konstellation.

Tabell 3: Presentation av de olika testuppsättningarna i Vitoria-Gasteiz. Källa: [9]

Standard	Felkorrigeringsnivå	Modulationsschema	CNR uppmätt (dB)	Bandbredd (Mbps)
DVB-T	2/3	64-QAM	16,2	19,9
DVB-T	3/4	64-QAM	17,5	22,4
DVB-T2	1/2	64-QAM	11,9	20,7
DVB-T2	3/5	64-QAM	13,4	24,9
DVB-T2	2/3	64-QAM	14,9	27,7
DVB-T2	3/4	64-QAM	16,2	31,1
DVB-T2	4/5	64-QAM	17,5	33,2
DVB-T2	5/6	64-QAM	18,1	34,6
DVB-T2	1/2	256-QAM	16,1	27,6
DVB-T2	3/5	256-QAM	18,3	33,2
DVB-T2	2/3	256-QAM	19,7	36,9
DVB-T2	3/4	256-QAM	22,0	41,5
DVB-T2	4/5	256-QAM	23,2	44,3
DVB-T2	5/6	256-QAM	24,2	46,2

Den mest intressanta observationen som redan antydde på i föregående jämförelse kan ses i figur 6. Enligt mätresultaten uppnår 64-QAM en bättre signalkvalitet i förhållande till bandbredden än 256-QAM. Skillnaden är i genomsnitt ca 1 dB till förmån för 64-QAM. Denna praktiska observation är i konflikt med DVB-konsortiets ursprungliga teoretiska modeller men stämmer ihop med de tester som tidigare utförts av nordiska NorDig. Detta innebär att det är lönsammare att i stället för 256-QAM använda 64-QAM för de lägre bandbredder som den klarar av att uppnå.



Figur 6: Graf över CNR-krav mot uppnådd bandbredd för DVB-T 64-QAM, DVB-T2 64-QAM och DVB-T2 256-QAM. Källa: [9]

4.2.3. Polak och Kratochvil, stationära mottagare

Ladislav Polak och Tomas Kratochvil [10] från Brnos tekniska universitet i Tjeckien hade i sin prestandajämförelse som avsikt att simulera ett traditionellt TV-sändningsnät med stationärt positionerade sändare och mottagare. Som kanalmodeller användes Rice-kanaler och Rayleigh-kanaler med 20 oberoende signalvägar (RC20 och RL20) samt en AWGN-kanalmodell som referens.

Tabell 4: Jämförelse av DVB-T och DVB-T2 användande tre olika kanalmodeller och identiska sändningsparametrar. Källa: [10]

	DVB-T	DVB-T2
Antal bärvågor	8k	8k
Skyddsintervall	1/8	1/8
Modulationsschema	64-QAM	64-QAM
Felkorrigeringsnivå	2/3	2/3
CNR AWGN (dB)	14,9	6,9
CNR RC20 (dB)	16,5	7,6
CNR RL20 (dB)	23,0	19,0

I simulationerna användes för DVB-T och DVB-T2 identiska sändningsparametrar och de resulterande CNR-mätningarna kan avläsas ur tabell 4. Med AWGN och RC20 som kanalmodeller uppnådde DVB-T2 en 8-9 dB bättre CNR-nivå än sin

föregångare, medan förbättringen i CNR var endast 4 dB i RL20-kanalmodellen som består av en stor mängd ekon. Forskarna drar i sin rapport slutsatsen att DVB-T2 på grund av sin mycket mera avancerade signalprocessering och felkorrigering uppnår en mycket bättre prestanda än DVB-T med identiska sändningsparametrar och användande samma kanalmodell.

4.2.4. Polak och Kratochvil, mobila mottagare

Förutom den tidigare nämnda prestandajämförelsen med stationära mottagare har Polak och Kratochvil [11] också utfört en jämförelse mellan DVB-T och DVB-T2 vid mobil mottagning var signalens MER och BER jämfördes med dess CNR. Som sändningsparametrar användes QPSK som modulationsschema, 2k-bärvågor, 2/3 felkorrigeringsnivå och 1/16 skyddsintervall. Som kanalmodeller användes RA6 som kan tänkas simulera mobil mottagning under en tågresor och TU6 som kan tänkas representera mottagning under en bilfärd i en stad samt AWGN som referens. RA6 består av en direkt Rice-signalväg och 5 indirekta Rayleigh-signalvägar i en lantlig omgivning med en färdhastighet på 100 km/h medan TU6 består av 6 indirekta Rayleigh-signalvägar i en urban omgivning med en färdhastighet på 50 km/h.

Resultaten visar att med AWGN uppnådde DVB-T2 en ca 10 dB förbättring i CNR-signal kvaliteten, med RA6 ca 20 dB förbättring och med TU6 ca 5 dB förbättring. Ur dessa resultat kan vi dra slutsatsen att största nyttan med DVB-T2 erhålls i mobil TV-mottagning med höga hastigheter i öppna landskap, till exempel i tåg eller i bilar på landsvägar och motorvägar. I något svårare stadsförhållanden med många reflektioner var nyttan betydligt mindre men ändå signifikant.

4.2.5. Media Broadcast GmbH

Tysklands DVB-T-nätverksoperatör Media Broadcast GmbH utförde år 2011 fälttester [12] i Delhi i Indien och i Hanoi i Vietnam. I dessa fälttester jämfördes DVB-T med DVB-T2 ur två olika perspektiv: i Delhi var målsättningen att mäta förbättringen i bandbredd med identisk sändningsstyrka och geografisk täckningsarea medan målsättningen med Hanoi-fälttestet var att jämföra uppnådd signal kvalitet och

täckningsarea vid identisk bandbredd. Testerna utfördes under verklighetstroga omständigheter och signalen mottogs med en vanlig UHF-takantenn.

Tabell 5: Jämförelse av uppnådd bandbredd med DVB-T och DVB-T2 utförd i Delhi med identisk sändningsstyrka och geografisk täckningsarea. Källa: [12]

	DVB-T	DVB-T2
Antal bärvågor	8k	32k
Skyddsintervall	1/4	1/128
Modulationsschema	64-QAM	256-QAM
Felkorrigeringsnivå	2/3	3/5
Sändningsstyrka (kW)	30	30
Bandbredd (Mbps)	19,9	36,1

Ur tabell 5 ser vi att DVB-T2 uppnådde över 80% högre bandbredd med samma sändningsstyrka och praktiskt sett identisk geografisk täckningsarea.

Tabell 6: Jämförelse av signalkvalitet och geografisk täckningsarea med DVB-T och DVB-T2 utförd i Hanoi med identisk sändningsstyrka och bandbredd. Källa: [12]

	DVB-T	DVB-T2
Antal bärvågor	8k	32k
Skyddsintervall	1/8	1/32
Modulationsschema	64-QAM	16-QAM
Felkorrigeringsnivå	3/4	5/6
Sändningsstyrka (kW)	20	20
Bandbredd (Mbps)	24,8	23,8
CNR (dB)	18,6	13,4

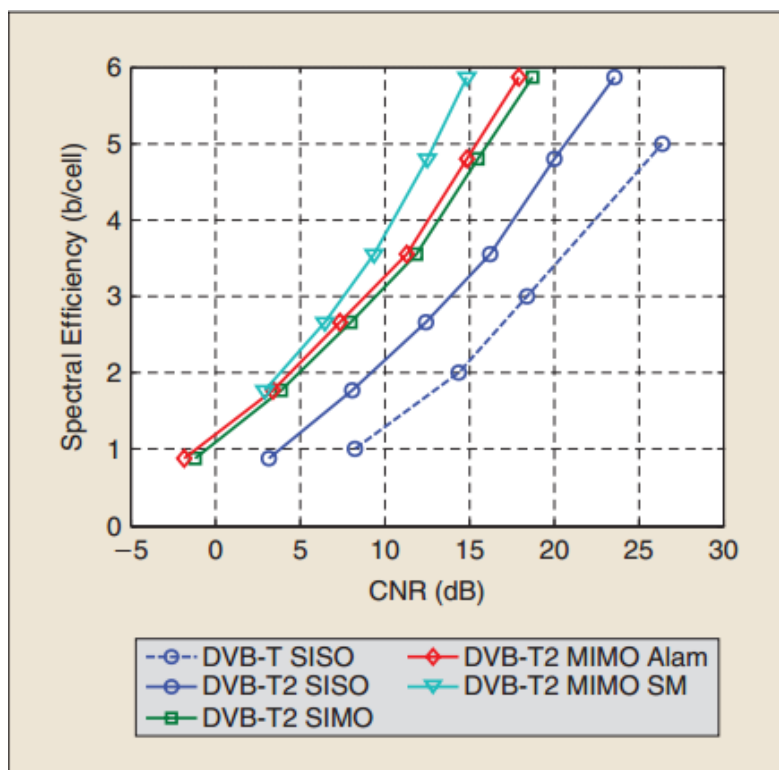
Ur tabell 6 framgår att DVB-T2 klarade av att överföra den ca 24 Mbps kanalmultiplexen med en ca 5 dB förbättring i CNR-signalkvaliteten vilket medförde en klart större geografisk täckningsarea.

4.2.6. Gozávez m.fl.

I sin rapport betraktar forskarna vid Valentias tekniska yrkeshögskola ledda av David Gozávez [13] hur mobil mottagning av DVB-T2 påverkas av användningen av rumsdiversitet, det vill säga metoder som använder flera sändare eller mottagare, och hur dessa metoder tillämpade till DVB-T2 jämför sig med DVB-T. Förutom den tidigare nämnda av DVB-T2 stödda MISO kan rumsdiversitet implementeras i form av en ingång med multipla utgångar (Single Input Multiple Output, SIMO) eller i

form av multipla ingångar med multipla utgångar (Multiple Input Multiple Output, MIMO).

Som kanalmodell användes i denna simulerade prestandajämförelse samma TU6 som Polak och Kratochvil använde, det vill säga 6 indirekta Rayleigh-signalvägar i en urban omgivning med en färdhastighet på 50 km/h. Resultatet av mätningarna var att nyttan av MISO i DVB-T2 jämfört med en traditionell en ingång med en utgång – sändningsteknik (Single Input Single Output, SISO) är närmast marginell och leder även i bästa fall till endast en 1 dB förbättring i sändningens CNR-signalkvalitet. Däremot ger MIMO implementerad med Alamoutis metod eller spatiell multiplexning (spatial multiplexing, SM) en betydande förbättring av spektrala effektiviteten i förhållande till signalkvaliteten jämfört med vanlig SISO-DVB-T2 och speciellt jämfört med DVB-T. Figur 7 jämför sinsemellan den spektrala effektiviteten i DVB-T, DVB-T2, DVB-T2 med SIMO, DVB-T2 med MIMO implementerad med Alamoutis metod samt DVB-T2 med MIMO implementerad med spatiell multiplexning.



Figur 7: Graf över spektrala effektiviteten i förhållande till signalkvaliteten användande DVB-T, DVB-T2, DVB-T2 med SIMO samt DVB-T2 med två olika MIMO-implementationer. Källa: [13]

Som vi kan avläsa ur figur 7 är den typiska förbättringen i signalkvalitet med SISO-DVB-T2 jämfört med SISO-DVB-T ca 5 dB vilket är i linje med de tidigare presenterade Polaks och Kratochvils resultat. Vi kan också dra slutsatsen att i mobil mottagning ger MIMO en markant, upp till 8 dB stor förbättring i signalkvaliteten hos DVB-T2 jämfört med SISO.

5. Slutsatser

Denna avhandling har genom att hänvisa till tidigare utförda forskningar visat att prestandamässigt lyckas DVB-T2 klart överstiga de utgångskrav som lades på standarden. Tack vare mycket mera avancerad signalprocessering och felkorrigering samt andra tekniska förbättringar uppnår DVB-T2 en markant förbättrad signalkvalitet vilket leder till en bandbreddsökning på 50-80% beroende på sändningsparametrar och -förhållanden.

Överraskande nog visar sig modulationsschemat 64-QAM vid bandbredder under 35 Mbps uppnå en bättre relativ prestanda än det nyare 256-QAM-modulationsschemat, vilket är i strid med DVB-konsortiets ursprungliga teoretiska modeller.

Förbättringen i signalkvalitet är betydligt större hos stationära mottagare och långsamt rörliga mottagare på öppna områden än hos rörliga mottagare som lider av en stor mängd signalreflektioner.

Vid utnyttjandet av rumsdiversitet fås betydligt bättre resultat med att använda flera mottagare än att använda flera sändare. Speciellt intressant är den markant förbättrade prestandan vid användandet av flera sändare och flera mottagare, det vill säga MIMO.

Tillsammans med avancerade bild- och ljudkompressionsmetoder möjliggör DVB-T2 framfarten av HDTV och 3D-TV samt utgör ett språngbräde till nya och bättre mobil-TV-tjänster, speciellt med användande av MIMO-rumsdiversitet vilket bådar bra för den nya DVB-NGH-mobil-TV-standarderna.

Litteraturförteckning

- [1] Ari Ikonen, *Teräväpiirtotelevisio*.: TeleStory Oy, 2009.
- [2] The Digital Terrestrial Television Action Group, "Understanding DVB-T2," http://www.digitag.org/DTTResources/DVB-T2_Handbook.pdf, 2009.
- [3] DVB Consortium, "2nd Generation Terrestrial - The World's Most Advanced Digital Terrestrial TV System," http://www.dvb.org/technology/fact_sheets/DVB-T2_Factsheet.pdf, 2012.
- [4] European Broadcasting Union, "Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2," EBU Tech 3348, tech.ebu.ch/docs/tech/tech3348.pdf, 2012.
- [5] Jukka Henriksson, "Development of Mobile TV standards in DVB," 6th Seminar of Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications, http://fruct.org/sites/default/files/files/seminar6/01_henriksson.FRUCT2009dvbair.pdf, 2009.
- [6] Wikipedia, "Quadrature amplitude modulation," http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation, 2013
- [7] Juha Jäämaa, "Kanavamallien vertailu LTE-järjestelmissä," Aalto-universitetet, Pro gradu diplomarbete, <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201203131471>, 2010.
- [8] Iñaki Eizmendi et al., "HDTV Field Trials Using DVB-T and DVB-T2 Broadcasting Systems," IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, IEEE DOI: 10.1109/ISBMSB.2010.5463084, 2010.
- [9] Iñaki Eizmendi, Gorka Berjon-Eriz, Manuel Vélez, Gorka Prieto och Amaia Arrinda, "CNR requirements for DVB-T2 fixed reception based on field trial results," IET Electronics Letters Vol. 47 Issue 1, IEEE DOI: 10.1049/el.2010.2934, 2011.
- [10] Ladislav Polak och Tomas Kratochvil, "DVB-T and DVB-T2 Performance in Fixed Terrestrial TV Channels," 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, IEEE DOI: 10.1109/TSP.2012.6256392, 2012.
- [11] Tomas Kratochvil och Ladislav Polak, "Comparison of DVB-T/H and DVB-T2 in Mobile, Portable and Fixed TV Channels," 19th Telecommunications forum TELFOR, IEEE DOI: 10.1109/TELFOR.2011.6143617, 2011.
- [12] Nils Ahrens, "Managing DVB-T2 Broadcast Transmission Networks," Asia-Pacific Institute for Broadcasting Development Asia Media Summit, http://www.itu.int/ITU-D/asp/CMS/Events/2011/DigitalBroadcast-May2011/S3_Nils_Ahrens.pdf, 2011.
- [13] David Gozálviz, Jaime López-Sánchez, David Gómez-Barquero, Jordi Joan Giménez och Narcís Cardona, "Combined Time and Space Diversity: Mobile Reception in DVB-T and DVB-T2 Systems," IEEE Vehicular Technology Magazine Vol. 7 Issue 4, IEEE DOI: 10.1109/MVT.2012.2218143, 2012.