

TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Tietotekniikka

Tietoliikennetekniikka

INSINÖÖRITYÖ

**VIDEOSIGNAALIN VÄRIAVARUUDEN JA KEHYSTAAJUUDEN PROSESSOINTI
TERÄVÄPIIRTOTELEVISIOSSA**

**Työn tekijä: Antti Laurila
Työn valvoja: Jouko Kurki
Työn ohjaaja: Jouko Kurki**

Työ hyväksytty: 10.12.2007

**Jouko Kurki
yliopettaja**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin Helsingin ammattikorkeakouluun tietoliikennetekniikan koulutusohjelmaan. Kiitän työn valvojaa ja ohjaajaa Jouko Kurkea taitavasta insinöörityön ohjauksesta sekä useista hyvistä lähdemateriaaleista. Erityisesti SMPTE:n standardikokoelma oli lähdemateriaalina korvaamaton ja haluan kiittää Helsingin ammattikorkeakoulua tuesta lähdemateriaalia hankittaessa.

Tämä työ on kuusivuotisen urakan viimeinen vaihe ennen valmistumistani. Haluan kiittää ystäviäni, perhettäni ja puolisoani saamastani tuesta opiskelujeni aikana sekä opinnäytetyön tekemiseen kannustamisesta.

Helsingissä 23.11.2007

Antti Laurila

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Antti Laurila	
Työn nimi: Videosignaalin väriavaruuden ja kehystaajuuden prosessointi teräväpiirtotelevisiossa	
Päivämäärä: 23.11.2007	Sivumäärä: 42 s. + 3 liitettä
Koulutusohjelma: Tietotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tietoliikennetekniikka
Työn valvoja: yliopettaja Jouko Kurki	
Työn ohjaaja: yliopettaja Jouko Kurki	
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin teräväpiirtotelevisiossa käytettäviä videosignaalin prosessointitekniikoita. Työssä esitellään HDTV:ssä käytössä olevat standardit sekä videosignaalin käsittelyyn käytettäviä tekniikoita.</p> <p>Tutkimus keskittyi HDTV:ssä käytettäviin väriavaruuksiin, kehys- ja kenttätaajuuksiin sekä lomituksen poistoon.</p> <p>Eri väriavaruuksien kohdalla tutkimuksessa käsitellään käytössä olevia väriavaruuksia, värierokoodausta sekä erilaisia alinäytteistysmenetelmiä. Kehys- ja kenttätaajuuksia käsitellään esittelemällä käytössä olevat taajuudet sekä erilaiset pulldown-menetelmät. Lopuksi käsitellään lomituksen poistossa käytettävät tekniikat sekä käsitellään näiden menetelmien vaikutuksia kuvanlaatuun ja skaalaukseen.</p>	
Avainsanat: HDTV, väriavaruus, resoluutio, kehystaajuus, kenttätaajuus, pulldown, lomitus, skaalaus	

HELSINKI POLYTECHNIC STADIA ABSTRACT

Name: Antti Laurila	
Title: Color Space and Framerate Processing in High-Definition Television	
Date: 23 November 2007	Number of pages: 42 + 3 attachments
Department: Information and Communications Engineering	Study Programme: Telecommunications Engineering
Instructor: Jouko Kurki, Principal lecturer	
Supervisor: Jouko Kurki, Principal lecturer	
<p>This graduate study examines the video processing techniques of high definition television. The main object of this study was to introduce the standards used by the HDTV systems worldwide and to present different techniques designed for processing video signal.</p> <p>This study focuses on color spaces and frame and field rate processing techniques. Also different deinterlacing techniques are explained in more detail.</p> <p>The study describes available color spaces, color difference coding and chroma subsampling. Also available frame and field rates and pulldown techniques are explained. In addition, different deinterlacing techniques are introduced and how deinterlacing affects the picture quality and scaling.</p> <p>As a result, this graduate study describes the most relevant color space and frame rate processes of the high-definition television. Finally, some of the future trends of HDTV are reviewed.</p>	
Keywords: HDTV, color space, resolution, frame rate, field rate, pulldown, deinterlacing, scaling	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	HDTV-STANDARDIT JA -TEKNIikka	4
2.1	Lähetysstandardit	4
2.2	INTEGRATED SERVICES DIGITAL BROADCASTING (ISDB)	4
2.3	ADVANCED TELEVISION SYSTEMS COMMITTEE (ATSC)	4
2.4	DIGITAL VIDEO BROADCASTING (DVB)	5
2.5	HIGH-DEFINITION VIDEO (HDV)	5
3	VÄRIAVARUUDET	7
3.1	Näköaisti ja ihmisen silmän ominaisuudet	7
3.2	RGB-videosignaali	8
3.3	R'G'B':n nimellisarvot sekä footroom ja headroom	9
3.4	Gammakorjaus	10
3.5	Värierokoodaus ja eri väriavaruudet	11
3.5.1	Y'UV-väriavaruus	11
3.5.2	Y'PbPr-väriavaruus	12
3.5.3	Y'CbCr-väriavaruus	14
3.6	Kromasignaalien alinäytteistäminen	15
3.6.1	4:4:4-alinäytteistys	17
3.6.2	4:2:2-alinäytteistys	17
3.6.3	4:1:1-alinäytteistys	18
3.6.4	4:2:0-alinäytteistys	18
3.6.5	Chroma upsampling error ja interlaced chroma problem	20
3.7	Deep Color ja xvYCC	22
4	KEHYS- JA KENTTÄTAAJUUDET HDTV:SSÄ	23
4.1	Kehys- ja kenttätaajuus	23
4.2	Kriittinen välkyntätaajuus	24
4.3	Filmin muuntaminen videoksi	25

4.4	Kehys- ja kenttätaajuuden muuttaminen	26
4.5	Filmin skannaus ja muuntaminen videoksi	27
4.5.1	<i>2-3 pulldown</i>	28
4.5.2	<i>2-2 pulldown</i>	29
4.5.3	<i>24:1 pulldown</i>	30
4.5.4	<i>3:3 pulldown</i>	30
4.5.5	<i>100 herzin tekniikka</i>	30
5	LOMITUKSEN POISTO JA SKAALAUUS	32
5.1	Lomituksen poisto	32
5.2	Videomoodi: Intrafield-prosessointi	33
5.2.1	<i>Juovien kahdennus</i>	33
5.2.2	<i>Juovien interpolointi</i>	33
5.3	Videomoodi: Interfield-prosessointi	34
5.3.1	<i>Liikeadaptiivinen lomituksen poisto</i>	36
5.3.2	<i>Liikekompensoitu lomituksen poisto</i>	36
5.4	Filmimoodi	36
6	YHTEENVETO	38
	VIITELUETTELO	41
	LIITTEET	

LIITE 1. ATSC-, DVB- ja ISDB-lähetysstandardien vertailutaulukko

LIITE 2. Taulukko yleisimmin käytetyistä resoluutioista, niiden näytteenotto-taajuuksista sekä näytteiden määrästä juovaa kohti

LIITE 3. Esimerkkikuvia chroma upsampling errorin ilmenemisestä

LYHENNELUETTELO

8-VSB	8-LEVEL VESTIGIAL SIDEBAND MODULATION
ARIB	ASSOCIATION OF RADIO INDUSTRIES AND BUSINESSES
ATSC	ADVANCED TELEVISION SYSTEMS COMMITTEE
AVCHD	ADVANCED VIDEO CODEC HIGH DEFINITION
BST-OFDM	BANDWIDTH SEGMENTED TRANSMISSION ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING
CIE	INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION
COFDM	CODED ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING
CUE	CHROMA UPSAMPLING ERROR
DVB	DIGITAL VIDEO BROADCASTING
DVD	DIGITAL VERSATILE DISC
EBU	EUROPEAN BROADCASTING UNION
EDTV	ENHANCED-DEFINITION TELEVISION
ETSI	EUROPEAN TELECOMMUNICATION STANDARDS INSTITUTE
E-VSB	ENHANCED VESTIGIAL SIDEBAND MODULATION
FIR	FINITE IMPULSE RESPONSE
HD-DVD	HIGH-DENSITY DIGITAL VERSATILE DISC
HD-MAC	HIGH-DEFINITION MULTIPLEXED ANALOGUE COMPONENTS
HDMI	HIGH-DEFINITION MULTIMEDIA INTERFACE
HDTV	HIGH-DEFINITION TELEVISION
HDV	HIGH-DEFINITION VIDEO
ICP	INTERLACED CHROMA PROBLEM

IPTV	INTERNET PROTOCOL TELEVISION
ISDB	INTEGRATED SERVICES DIGITAL BROADCASTING
ITU	INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION
IVTC	INVERSE TELECINE
LCD	LIQUID CRYSTAL DISPLAY
LSB	LEAST SIGNIFICANT BIT
MPEG	MOTION PICTURES EXPERTS GROUP
MUSE	MULTIPLE SUB-NYQUIST SAMPLING ENCODING SYSTEM
NTSC	NATIONAL TELEVISION SYSTEM COMMITTEE
OFDM	ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING
PAL	PHASE ALTERNATING LINE
PSK	PHASE-SHIFT KEYING
QAM	QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION
QPSK	QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYING
SDTV	STANDARD-DEFINITION TELEVISION
SMPTE	SOCIETY OF MOTION PICTURE AND TELEVISION ENGINEERS
TK	TELECINE

1 JOHDANTO

Siirtyminen mustavalkoisista lähetyksistä värillisiin oli televisiotekniikan ensimmäinen merkittävä kehitysaskel. Teräväpiirtotelevisio eli HDTV on televisiotekniikan seuraava merkittävä kehitysaskel. Teräväpiirtotekniikasta on puhuttu maailmalla jo vuosikymmeniä. Joitain tekniikoita on otettu käyttöönkin, mutta näitä järjestelmiä ei kuitenkaan pidettäisi nykymittapuun mukaan varsinaisena teräväpiirtona. Teräväpiirtotekniikka nivoutuu olennaisesti niin sanottujen taulutelevisioiden yleistymiseen, ja HDTV-näyttötetekniikka onkin tällä hetkellä viihde-elektroniikan yksi nopeimmin kehittyvistä osa-alueista. Teräväpiirtotekniikalla saavutetaan huomattavasti elävämpi kokemus, sillä kuvan resoluutio saadaan digitelevision tarjoamaan tarkkuuteen verrattuna jopa viisinkertaistettua.

Teräväpiirtotelevisio on ottanut digitaalisen television aikakaudella suuria kehitysaskelia. HDTV:n varsinainen tutkimus alkoi Japanissa kuitenkin jo 1960-luvulla, minkä tuloksena Japani aloitti analogiset HDTV-lähetykset 1990-luvun alkupuolella. Japani on ollut edellä aikaansa siinä mielessä, ettei yksikään muu maa koskaan aloittanut analogisia HDTV-lähetyksiä. Japanissa lanseerattu HDTV-tekniikka tunnetaan nimellä MUSE (multiple subnyquist sampling encoding). MUSE-järjestelmä suljetaan Japanissa 30.11.2007, jonka jälkeen Japanissakin siirrytään HDTV:ssä täysin digitaaliseen aikakauteen. Myös Euroopassa ehdittiin testaamaan analogista teräväpiirtotekniikkaa, joka tunnettiin nimellä HD-MAC (high-definition multiplexed analogue components). Tästä projektista luovuttiin kuitenkin melko varhaisessa vaiheessa, sillä Euroopassa siirryttiin kehittämään digitaalista televisiota.

Analogiset televisiolähetykset loppuivat Suomessa 31.8.2007. Teräväpiirto-televisioiden valmistuskustannusten pudotessa taulutelevisiot ovat syrjäyttäneet perinteiset kuvaputkitelevisiot myytyjen vastaanottimien määrässä. Yhä useampi kuluttaja ostaakin, lähetysten digitalisoinnin myötä, jo teräväpiirtotarkkuuteen yltävän näyttölaitteen.

Suomessa teräväpiirtolähetyksiä voi tällä hetkellä katsoa satelliitin ja kaapeliverkon välityksellä. Testilähetyksiä ehdittiin kuitenkin lähettää SW Television Oy:n eli entisen Helsinki Television kaapeliverkossa jo yli kaksi vuotta ennen kuin kaupallinen toiminta teräväpiirtoläheteillä aloitettiin vuoden 2006

lopussa. Myös muilla kaapeli-tv-operaattoreilla on verkoissaan tarjolla maksullisia teräväpiirtoisia kanavia. Yleensä ottaen teräväpiirtokanavat ovat vasta alkutaipaleellaan operaattoreiden tarjonnan rajoituksessa muutamaa elokuva- ja luontokanavaan.

Riittävän nopean laajakaistayhteyden välityksellä olisi mahdollista vastaanottaa myös teräväpiirtolähetyksiä. IPTV-operaattoreista ainakin Maxineti sekä Sonera ovat testanneet teräpiirtolähetyksien välittämistä verkossaan, ja lanseeraavat palvelunsa vuoden 2007 lopulla. Onkin todennäköistä, että Suomessa teräväpiirtolähetykset yleistyvät ensiksi juuri kaapeliverkon ja IP-verkon välityksellä maksullisina kanavina. [7.; 8.; 11.]

Teräväpiirtolähetyksien lähettäminen terrestriaaliverkossa olisi voinut teoriassa alkaa Suomessa analogisilta kanavilta vapautuneiden taajuuksien vapauduttua. Tällöin olisi kuitenkin menetetty alkuperäinen ajatus vapauttaa kyseiset taajuudet muuhun kuin televisiokäyttöön. Vaikka Digita onkin jo suorittanut hdtv-kenttätestejä lähetyksverkossaan, on Yleisradio ilmoittanut aloittavansa teräväpiirtoisen lähetystoiminnan aikaisintaan vasta joskus vuoden 2010 aikana, Nelonen osittain vuotta aiemmin. Suomessa teräväpiirtolähetyksien läpimurto lienee kuitenkin vasta vuosien 2010-2013 kieppeillä. [9.; 10.; 12.]

Suurin este HDTV:n yleistymiselle Euroopassa on lähetyksverkon kapasiteetti. Terrestriaaliverkoissa ei tällä hetkellä löydy helposti teräväpiirtolähetteen siirtämiseen vaadittavaa kaistaa. Yksi 720p- tai 1080i-teräväpiirtokanava saadaan mahtumaan noin 8 Mbit/s kaistalle. Tämä edellyttää kuitenkin, että pakkaustekniikassa siirrytään MPEG-2:sta H.264-pakkaukseen.

Sekä lähetystekniikkaa että lähetteiden pakkaustekniikkaa joudutaan yhä kehittämään, jotta olemassa olevaan lähetyksverkkoon saadaan mahtumaan enemmän teräväpiirtokanavia kuin mitä nykytekniikka sallisi. Samalla myös lähetyksverkon käytöstä aiheutuvat siirtokustannukset saataisiin laskemaan. Koska teräväpiirtotekniikassa on käytössä useita formaatteja, jotka vievät eri tavalla kaistanleveyttä, on oikean formaatin valinnassa käytettävä aikaa ja harkintaa. Tällä hetkellä vahvimmat formaatit näyttäisivät olevan 720p50, 1080i25, 1080p25 sekä tulevaisuudessa 1080p50. Teräväpiirtoisten HD-DVD- ja Blu-ray-levyjen formaatti on useimmiten 1080p24.

Koska HDTV-tarkkuuteen yltäviä näyttölaitteita ei ole vielä kovinkaan suurta määrää kuluttajilla käytössä, pääsisivät tällä hetkellä HDTV:n tarjoamasta ylimääräisestä tarkkuudesta nauttimaan vain hyvin harvat katsojat. Näyttölaitte- ja lähetystekniikoiden kehittyessä kovaa vauhtia ei alalle ole saatu aikaan yhtä yleisesti hyväksyttyä HDTV-formaattia. Näiden seikkojen takia moni televisioyhtiö onkin toistaiseksi valinnut HDTV:n suhteen odottavan kannan.

2 HDTV-STANDARDIT JA -TEKNIikka

2.1 Lähetystandardit

Teräväpiirtotelevision lähettämiseen käytetään yleisesti kolmea lähetystandardia, jotka esitellään lyhyesti seuraavissa kappaleissa. Nämä kolme standardia, ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting), DVB (Digital Video Broadcasting) ja ATSC (Advanced Television Systems Committee), pitävät sisällään paljon samoja piirteitä mutta poikkeavat toisistaan mm. signaalin RF-moduloinnin, kuvan resoluution ja käytetyn taajuuden suhteen. Liitteessä yksi on esitetty lähetystandardien merkittävimmät eroavaisuudet (ks. liite 1).

2.2 INTEGRATED SERVICES DIGITAL BROADCASTING (ISDB)

Japanissa on kuljettu kautta historian HDTV:n kehitystyössä edellä muuta maailmaa. Japanin valtiollisella televisioyhtiöllä NHK:lla (Nippon Hōsō Kyōkai) ja maan elektroniikkateollisuudella on ollut tässä merkittävä rooli. Japaniin kehitettiin myös oma digitaalisen television standardi ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting), joka perustuu DVB-standardiin. ISDB ei ole maailmanlaajuisesti laajalle levinnyt standardi sillä, sitä käytetään lähinnä Japanissa. Tosin Brasiliassa käyttöön otettu järjestelmä pohjautuu ISDB:hen. ISDB on itse asiassa kokoelma ARIB:n standardeja, joista osa kuvataan myös ITU-R-standardeissa. [3.]

ISDB koostuu kolmesta standardista, jotka ovat ISDB-S (satellite), ISDB-C (cable) ja ISDB-T (terrestrial). ISDB-S on satelliittiverkon lähetystandardi, ISDB-C kaapeliverkon lähetystandardi ja ISDB-T antenniverkon lähetystandardi. Vaikka pakkausformaattina käytetään yleisesti vielä MPEG-2:sta, tukee ISDB myös H.264-pakkausformaattia. [3.]

2.3 ADVANCED TELEVISION SYSTEMS COMMITTEE (ATSC)

ATSC on digitaalisen television standardi, joka tulee korvaamaan analogisen NTSC-lähetystandardin. NTSC:n tavoin on ATSC-standardi käytössä lähinnä Pohjois-Amerikassa. Koska Pohjois-Amerikka on suurelta osin harvaan asuttua, valittiin signaalin modulointitavaksi 8-VSB-modulaatio. 8-VSB-modulaatio mahdollistaa signaalin vastaanottamisen myös melko kaukana lähettimestä. [3.]

Pakkausformaattina käytetään yleisesti vielä MPEG-2:sta. ATSC-standardiin kehitetty E-VSB-modulaatio (enhanced VSB) mahdollistaa, MPEG-2-pakkauskoodekin lisäksi, käyttää myös tehokkaampaa H.264-pakkausformaattia. Lisäksi se tuo parannusta lähetyksien vastaanottoon lähettimen kantoalueen rajoilla. [3.]

2.4 DIGITAL VIDEO BROADCASTING (DVB)

DVB-standardi on maailmalle laajimmin levinnyt digitaalisen television standardi. Myös Suomi kuuluu DVB-lähetyksstandardin maihin. DVB on itse asiassa kokoelma ETSI:n standardeja. [3.]

DVB koostuu useasta eri standardista, joista merkittävimmät ovat DVB-S (satellite), DVB-C (cable), DVB-T (terrestrial) ja DVB-H (handheld). DVB-S on satelliittiverkon lähetyksstandardi, DVB-C kaapeliverkon lähetyksstandardi, DVB-T antenniverkon lähetyksstandardi ja DVB-H on lähetyksstandardi kannettaville laitteille. Vaikka pakkausformaattina käytetään yleisesti vielä MPEG-2:sta, tukee DVB myös H.264-pakkausformaattia. Erityisesti teräväpiirtoläheteissä H.264-pakkausformaatti tulee yleistymään nopeasti. [3.]

DVB-standardeja kehitetään jatkuvasti. Esimerkiksi vuonna 2005 ratifioitiin satelliittiverkon DVB-S2-lähetyksstandardi. Käyttämällä DVB-S2-standardia voidaan satelliitista saatavaa bittivirtaa kasvattaa noin 30 %. Tämä kapasiteetin lisäys yhdistettynä H.264:n tarjoamaan tehokkaampaan kuvan pakkaukseen mahdollistaa teräväpiirtolähetyksissä jopa 1080p-formaattiin siirtymisen. Terrestriaaliverkkoon kehitetään myös uutta standardia. DVB-T2-standardin on määrä valmistua vuosina 2008-2009. [9.]

2.5 HIGH-DEFINITION VIDEO (HDV) JA AVCHD

HDV eli High-Definition Video ei varsinaisesti ole standardi, vaan tekniikka, jonka JVC ja Sony ovat kehittäneet. Tekniikka tuotiin markkinoille vuonna 2002 ja sen tarkoituksena oli tuoda teräväpiirtotarkkuuteen yltävä videokuvaus kuluttajatasolle.

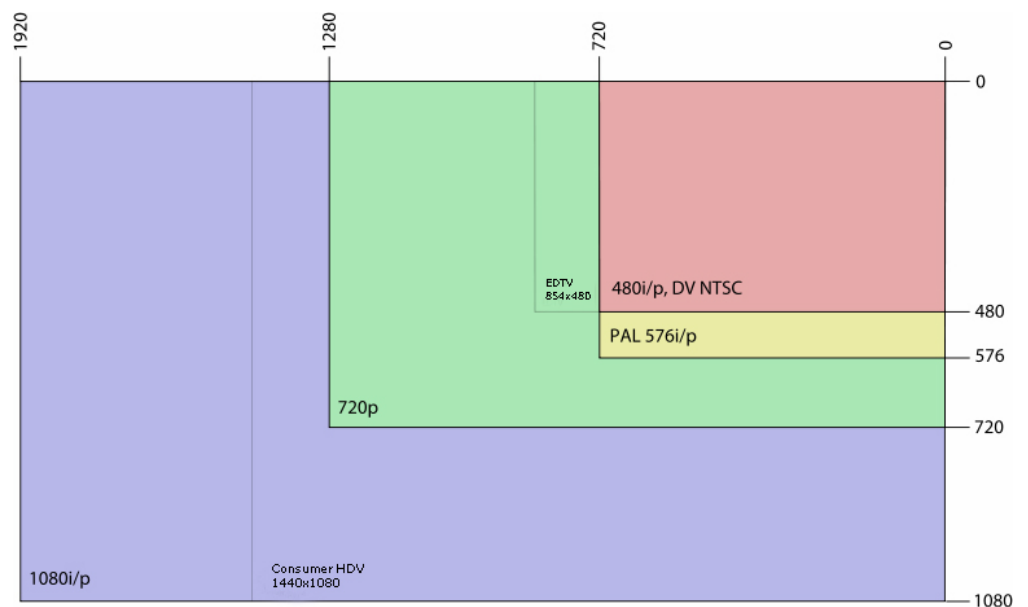
Näyttää kuitenkin siltä, että HDV saattaa jäädä hyvinkin lyhytikäiseksi tekniikaksi. HDV:n jälkeen kehitetty AVCHD (Advanced Video Codec High Definition) on syrjäyttämässä HDV:n teräväpiirtoisena videokuvausformaattina. AVCHD:n kehittivät Panasonic ja Sony ja se lanseerattiin markkinoille vuon-

na 2006. Alla olevassa taulukossa verrataan HDV:n ja AVCHD:n teknisiä ominaisuuksia (taulukko 1).

Taulukko 1. HDV:n ja AVCHD tekniset ominaisuudet

	HDV	AVCHD
Tallennusmedia	DV- tai miniDV-nauha	levy, muistikortti, kiintolevy
Tallenteen muoto	Transport Stream, Packetized Elementary Stream	Transport Stream
Väriavaruus	Y'CbCr	Y'CbCr, xvYCC
Värien kvantisointi	8-bit	8-bit
Värinäytteistys	4 : 2 : 0	4 : 2 : 0
Kuvasuhde	16 : 9	16 : 9
Videosignaalit	720p24, 720p25, 720p30p, 720p50, 720p60, 1080p24, 1080p25, 1080p30p, 1080i50, 1080i60	720p24, 720p50, 720p60, 1080p24, 1080i50, 1080i60
Resoluutio	1280 x 720, 1440 x 1080	1280 x 720, 1440 x 1080, 1920 x 1080
Pakkausformaatti	MPEG-2	H.264

Kuten taulukostakin käy ilmi, on pakkausformaatin vaihtuminen MPEG-2:sta H.264:ään suurin yksittäinen ero näillä formaateilla. Alla oleva kuva taas havainnollistaa eri resoluutioiden välisiä eroja niiden esittämässä tarkkuudessa (kuva 1).



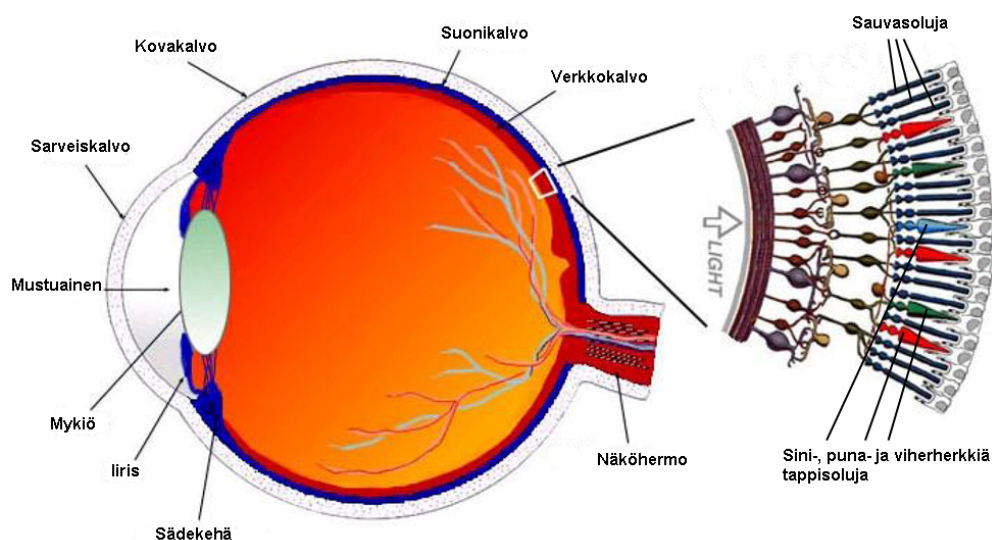
Kuva 1. Yleisimmin käytetyt resoluutiot

3 VÄRIAVARUUDET

3.1 Näköaisti ja ihmisen silmän ominaisuudet

Ihminen havaitsee ympäristössään olevan sähkömagneettisen säteilyn näkyvänä valona. Näkyvän valon aallonpituus sijoittuu noin 400-700 nanometrin kaistalle.

Silmän rakenne ja sen toiminnan kannalta oleelliset osat on esitetty kuvassa kaksi. Iiris säätelee silmään pääsevän valon määrää silmäterän keskellä olevan aukon eli pupillin avulla. Sarveiskalvo ja mykiö taittavat valonsäteen silmän takaosassa olevalle verkkokalvolle eli retinalle. Verkkokalvo taas koostuu valoherkistä sauva- ja tappisolusta, jotka muuntavat valon sähköiksi signaaleiksi. Nämä signaalit kulkeutuvat verkkokalvolta näköhermoon ja sieltä edelleen aivoihin prosessoitavaksi. [1.; 2.]

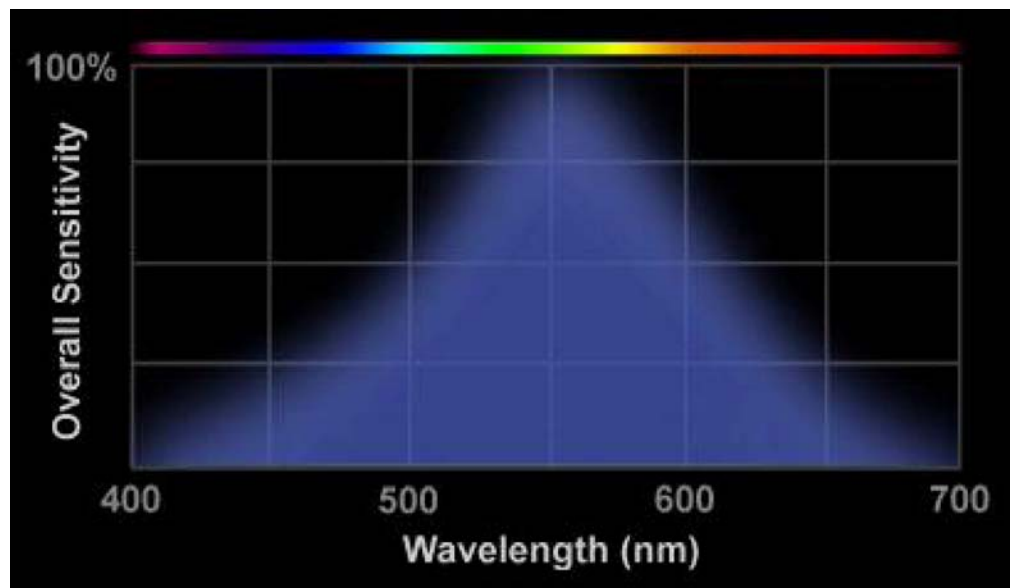


Kuva 2. Silmän rakenne

Sauvasolut reagoivat herkästi valoärsykkeisiin, mutta ne kykenevät havainnoimaan ainoastaan akromaattisia värejä eli mustaa, valkoista ja harmaasävyjä. Ihminen aistii siis sauvasoluilla valon intensiteettiä. Tappisoluja on päävärien mukaisesti kolmea tyyppiä: puna-, viher- sekä siniherkkiä. Eri tappisolutyypit reagoivat valon aallonpituuksiin eri lailla. Tappisolujen ärsykeistä muodostuu ihmisen näköaistissa siis värit. Koska ihmisen verkkokalvolla on noin 120 miljoonaa tappisolua verrattuna 6-7 miljoonaan sauvasoluun, on ihmisen näköaisti, erityisesti liikkuvalla kuvalla, huomattavasti herkempi valon intensiteetille eli luminanssille kuin valon värille eli kromi-

nanssille. Tätä ihmisen näkökyvyn ominaisuutta käytetään hyväksi kuvasignaalin pakkauksessa mm. kromasignaalin alinäytteistyksessä (ks. kpl 3.6). [1.; 2.]

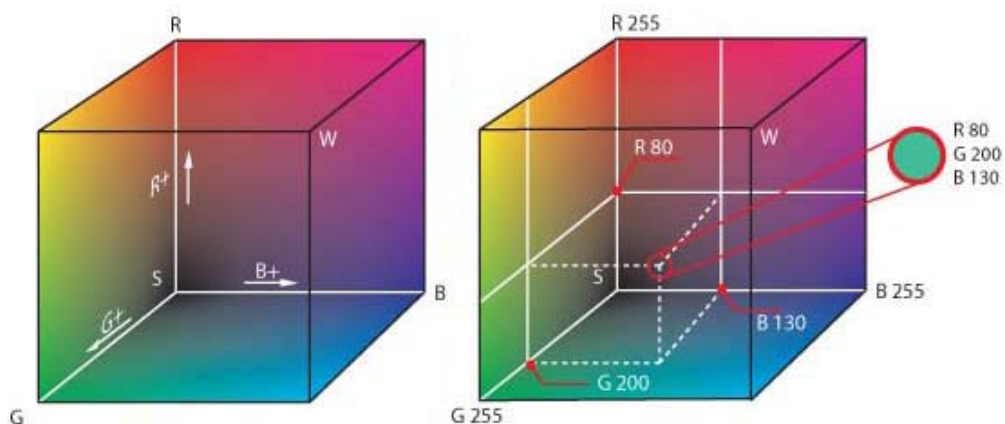
Ihmisen näköaisti reagoi eri tavoin myös eri väreihin (kuva 3). Koska ihmisen väriaistimuksen herkkyys on suurimmillaan vihreän sävyissä, otetaan se huomioon myös videotekniikassa. Tätä ominaisuutta hyödynnetään, kun RGB-signaali muunnetaan Y'UV-, Y'PbPr- tai Y'CbCr-muotoiseksi (ks. kpl 3.5). [1.; 3.]



Kuva 3. Näköaistin herkkyys eri väreihin

3.2 RGB-videosignaali

Videotekniikassa on yleisesti käytössä RGB-värimalli. Kirjaimet RGB tulevat englannin kielen kolmen päävärin nimistä: punainen, *red*, vihreä, *green* ja sininen, *blue*. RGB on siis väriavaruus, jossa värejä muodostetaan yhdistelemällä päävärien: punaisen, vihreän ja sinisen värin intensiteettejä toisiinsa (kuva 4). Tällaista päävärejä yhdistelevää värimallia kutsutaan additiiviseksi.



Kuva 4. RGB-värikuutio

Kuluttajatasen videolaitteissa käytetään 8-bittistä RGB-väriavaruutta, kun taas ammattitason laitteet tukevat 8-bittisen väriavaruuden lisäksi myös 10-bittistä väriavaruutta. 10-bittisen väriavaruuden ”ylimääräiset” 2-bittiä sisältävät videoinformaation vähiten merkitsevät bitit (LSB). Näin pyritään minimoimaan kvantisoinnista aiheutuvia vääristymiä sekä videoprosessoinnista syntyviä kumulatiivisia virheitä. [3.]

8-bittisellä väriavaruudella tarkoitetaan sitä, että jokainen pääväri esitetään 8-bitin tarkkuudella. Näin ollen koko väriavaruus käsittää kaiken kaikkiaan 2^{24} väriä eli noin 16,7 miljoonaa eri väriä. [4.]

Puhuttaessa komponenttividéosignaalista tarkoitetaan videosignaalin olevan erotettu kahteen tai useampaan komponenttiin. Tunnetuimmat komponenttividion muodot ovat analogiset Y'UV ja Y'PbPr sekä digitaalinen Y'CbCr, joissa erillisiä komponentteja on kolme. Myös S-Video sekä mm. SCART-kaapelilla siirrettävä RGB-signaali ovat tunnettuja analogisen komponenttividéosignaalin muotoja.

3.3 R'G'B':n nimellisarvot sekä footroom ja headroom

Järjestelmässä jossa jokainen pääväri ilmaistaan kahdeksalla bitillä, gammakorjattu RGB-signaali (R'G'B') (ks. kpl 3.4) saa nimellisarvonsa väliltä 0-255. Koska 0 ja 255 on varattu signaalin synkronointiin, on kaikista tummimman mustan taso tällöin nimellisarvoltaan 1 ja kirkkaimman valkoisen taso arvoltaan 254. 10-bittisen järjestelmän nimellisarvot saadaan väliltä 0-1023. Tällöin nimellisarvot 0-3 ja 1020-1023 on varattu signaalin synkronointiin. [3., 6.]

Käytännössä tilanne ei ole näin yksinkertainen, sillä koko ajan yleistyvissä digitaalisissa videolaitteissa, R'G'B'-signaali onkin hieman erilainen. Rautatasolla nimellisarvot ovat samoja, mutta liitäntätasolla arvot hieman muuttuvat. ITU-R BT.601- ja ITU-R BT.709-standardien mukaan, 8-bittisen Y'CbCr-komponenttivideon (ks. kpl 3.5.3) lumasignaalin, Y', arvoon lisätään +16, jolloin se saa nimellisarvonsa väliltä 16-235. Vastaavasti kromasignaalien arvoihin, Cb ja Cr, lisätään +128, jolloin niiden nimellisarvot vaihtelevat välillä 16-240. Lumasignaalilla arvoaluetta 0-15 kutsutaan nimellä footroom ja aluetta väliltä 235-255 headroom. [4.; 6.]

Y'PbPr-signaalilla (ks. kpl 3.5.2) nimellisarvot 0 ja 255 on varattu signaalin synkronointiin. Sen sijaan footroom ja headroom eivät ole Y'PbPr-väriavaruuteen standardoituja eikä niitä käytetä. [4.; 6.]

Valitettavasti video masteroidaan kuitenkin siten, että videodata alittaa usein referenssimustan (16) tason sekä ylittää referenssivalkoisen (235) tason. Tämä aiheuttaa sen, että kirkkaimmat objektit, kuten pilvet ja muut kirkkaat esineet, menettävät yksityiskohtansa ja kuvan vaaleimmat kohdat palavat puhki. Tumman sävyissä ei alarajan leikkautuminen näy kuvassa niin selvästi, mutta se aiheuttaa kuitenkin näkyviä virheitä referenssitason ylittävillä alueilla. Onneksi harjaantumaton silmä ei näitä kuvan virheitä yleensä havaitse. Mutta jos tietää mitä katsoo, voi näitä virheitä havaita melko helposti. [13.]

Markkinoilla on jo jonkin aikaa ollut high-end-tason dvd-soittimia, jotka toistavat myös luman nimellisarvoalueet 1-15 sekä 235-254. Tällöin soitin toistaa ns. blacker than black- sekä whiter than white- tai peak-white-värisävyt. [13.]

3.4 Gammakorjaus

RGB ei ole kuitenkaan kovin tehokas menetelmä esittämään videoinformaatiota. Siitä muodostetaankin usein, värierokoodauksella erilliset luma- ja krominanssisignaalit. Väriavaruus esitetään joko Y'UV-, Y'PbPr- tai Y'CbCr-muodossa. Ensin RGB-signaalille täytyy kuitenkin tehdä, kulloisenkin näyttötyypin mukaan, gamma-korjaus. Esimerkiksi kuvaputkinäytölle, jonka elektronityyppi toimii eksponentiaalisesti, gamma-korjattu RGB-arvo (R'G'B') saadaan seuraavalla tavalla:

RGB-signaali normalisoidaan siten, että jokainen pääväri saa arvon väliltä 0 - 1. Tämän jälkeen lasketaan gamma-korjatut RGB-arvot ($R'G'B'$) kulloisenkin näyttölaitteen mukaisella gamman arvolla (taulukko 2). [3.; 6.]

Taulukko 2. Gammakorjattujen RGB-arvojen laskukaavat [3]

Jos $R, G, B < 0,018$		
$R' = 4,5 * R$	$G' = 4,5 * G$	$B' = 4,5 * B$
Jos $R, G, B \geq 0,018$		
$R' = 1,099 * R^\gamma - 0,099$	$G' = 1,099 * G^\gamma - 0,099$	$B' = 1,099 * B^\gamma - 0,099$

Esimerkiksi kuvaputkinäytöille gamman arvo on: $\gamma = (1/0,45) \approx 2,2$. Tämä gamman arvo on yleisesti käytössä kaikissa televisiojärjestelmissä (NTSC-, PAL- ja SECAM-järjestelmissä).

Taulutelevisioiden ja videotykkien toistokäyrä ei putkitelevisioiden tavoin ole eksponentiaalinen vaan lineaarinen. Tämän vuoksi näissä laitteissa gammaa käsitellään eri tavalla. Laitteet on suunniteltu vastaanottamaan gammakorjattua signaalia, mutta gammakorjattu signaali kompensoidaan näyttölaitteen toistokäyrää vastaavaksi. [3.; 4.]

3.5 Värierokoodaus ja eri väriavaruudet

RGB ei siis ole kovin tehokas menetelmä esittää videoinformaatiota. Koska ihmisen näköaisti reagoi RGB-väreihin eri herkkyydellä, voidaan tätä ominaisuutta käyttää hyödyksi videosignaalin muuttamisessa tehokkaampaan muotoon. Värierokoodauksella (color difference coding) RGB-signaalista muodostetaan erilliset luma- ja kromasignaalit ja signaali alinäytteistetään $Y'UV$ -, $Y'PbPr$ - tai $Y'CbCr$ -muotoiseksi. [3.]

3.5.1 $Y'UV$ -väriavaruus

$Y'UV$ -väriavaruus sekoitetaan usein $Y'PbPr$ - ja $Y'CbCr$ -komponenttisygnaalien kanssa. Sitä käyttävät kaikki televisiojärjestelmät. $Y'UV$ ei siis ole komponenttisygnali, kuten $Y'PbPr$ ja $Y'CbCr$, vaan komposiittivideosignaali. $Y'UV$ -signaalissa luma (Y') sekä värierosignaalit (U) ja (V) kulkevat kaikki moduloituna yhdessä kaapelissa. Luma (Y') saadaan summaamalla R' , G' ja B' signaalien arvot yhteen, painottamalla näitä arvoja ih-

misen suhteellisella värien havainnointikyvyllä. Kaavat Y'UV-arvojen saamiseksi on esitetty alla olevassa taulukossa kolme. [3.; 5.]

Taulukko 3. Y'UV-arvojen laskukaavat [3.]

$Y' = 0,299R' + 0,587G' + 0,114B'$
$U = -0,147R' - 0,289G' + 0,436B'$ $U = 0,492(B' - Y')$
$V = 0,615R' - 0,515G' - 0,100B'$ $V = 0,877(R' - Y')$

3.5.2 Y'PbPr-väriavaruus

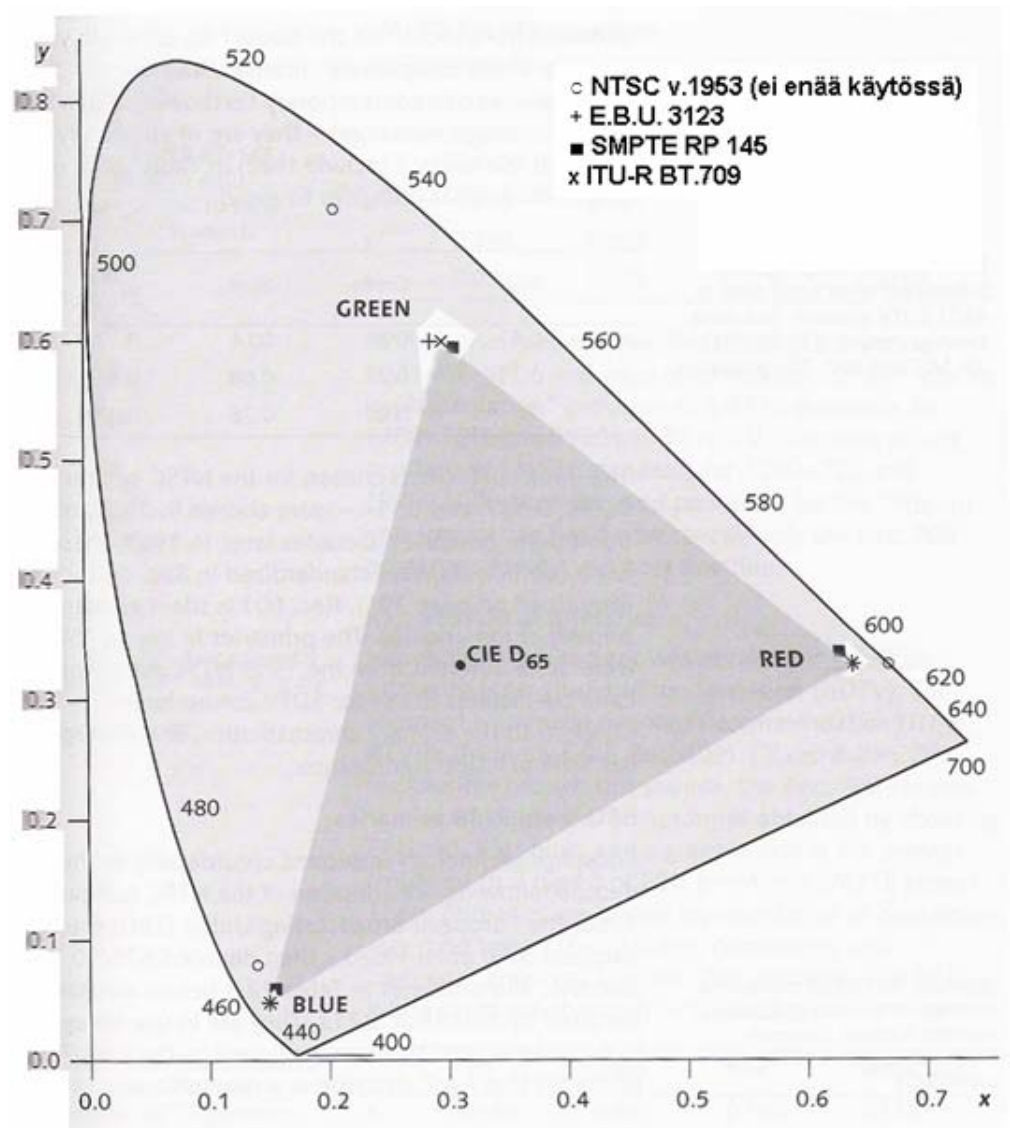
Y'PbPr sekoitetaan valitettavan usein sekä Y'UV:n että Y'CbCr:n kanssa. Y'PbPr:llä tarkoitetaan kuitenkin R'G'B':stä värierokoodattua väriavaruutta. Kyseessä on analoginen komponenttvideosignaali. Pb- sekä Pr-signaalit alipäästösuodatetaan siten, että kukin vie noin puolet Y'-signaalin tarvitsemasta kaistasta. Alla olevassa taulukossa verrataan Y'PbPr- ja Y'CbCr komponenttvideosignaalien kaavoja toisiinsa (taulukko 4). [4.]

Taulukko 4. Y'PbPr- ja Y'CbCr-komponenttvideosignaalien kaavojen vertailu

Y'PbPr	Y'CbCr
SDTV ja EDTV (ITU-R BT.601)	SDTV ja EDTV (ITU-R BT.601)
${}^{601}Y' = 0,299R' + 0,587G' + 0,114B'$	${}^{601}Y' = 16 + (219 * {}^{601}Y') = 16 + [219 * (0,299R' + 0,587G' + 0,114B')]$ ${}^{601}Y' = 16 + (65,418R' + 128,553G' + 24,966B')$
$P_B = \frac{0,5}{1-0,144} (B' - {}^{601}Y') = \frac{1}{1,772} (B' - {}^{601}Y')$ $P_B = -0,168736R' - 0,331264G' + 0,5B'$	$C_B = 128 + \frac{112}{0,886} (B' - {}^{601}Y')$ $C_B = 128 + (-37,797R' - 74,203G' + 112B')$
$P_R = \frac{0,5}{1-0,299} (R' - {}^{601}Y') = \frac{1}{1,402} (R' - {}^{601}Y')$ $P_R = 0,5R' - 0,418688G' - 0,081312B'$	$C_R = 128 + \frac{112}{0,701} (R' - {}^{601}Y')$ $C_R = 128 + (112R' - 93,786G' - 18,214B')$
HDTV (ITU-R BT.709)	HDTV (ITU-R BT.709)
${}^{709}Y' = 0,2126R' + 0,7152G' + 0,0722B'$	${}^{709}Y' = 16 + (219 * {}^{709}Y') = 16 + [219 * (0,2126R' + 0,7152G' + 0,0722B')]$ ${}^{709}Y' = 16 + (46,559R' + 156,629G' + 15,812B')$
$P_B = \frac{0,5}{1-0,0722} (B' - {}^{709}Y') = \frac{1}{1,8556} (B' - {}^{709}Y')$ $P_B = -0,114572R' - 0,385428G' + 0,5B'$	$C_B = 128 + \frac{112}{0,9278} (B' - {}^{709}Y')$ $C_B = 128 + (-25,664R' - 86,336G' + 112B')$
$P_R = \frac{0,5}{1-0,2126} (R' - {}^{709}Y') = \frac{1}{1,5748} (R' - {}^{709}Y')$ $P_R = 0,5R' - 0,454153G' - 0,045847B'$	$C_R = 128 + \frac{112}{0,7874} (R' - {}^{709}Y')$ $C_R = 128 + (112R' - 101,730G' - 10,270B')$

Y'PbPr-väriavaruus määritellään SDTV:n osalta ITU-R BT.601-standardissa. Päävärien kromaattisuuskoordinaatit x,y,z-koordinaatistossa määritellään kuitenkin eri tavoin SMPTE RP 145- sekä E.B.U. 3213-standardeissa (kuva 5). SMPTE:n standardia käytetään NTSC-televisiojärjestelmää käyttävien

maiden 480i-järjestelmissä, kun taas E.B.U.:n standardia käytetään PAL-televisiojärjestelmää käyttävien maiden 576i-järjestelmissä. Lisäksi nyt jo ka-
toamassa olevalle HDTV-formaatille, 1035i:lle (MUSE), on määritelty oma
standardinsa SMPTE 240M. Tätä melko monilukuista standardikokonaisuut-
ta hankaloittaa vielä se, että maailmalla on käytössä ainakin neljä sähköisiltä
ominaisuuksiltaan erilaista liitännätapaa Y'PbPr:lle. [4.; 6.]



Kuva 5. CIE 1931, 2° kromaattisuusdiagrammi

EDTV:n (Enhanced-Definition Television) osalta Y'PbPr on standardoitu ITU-
R BT.1358:aan. EDTV-järjestelmissä käytetään joko 480p- tai 576p-
resoluutiota. 480p-resoluutiota käytetään NTSC-televisiojärjestelmän mais-
sa, kun taas 576p-resoluutiota käytetään PAL-televisiojärjestelmää käyttä-
vissä maissa. Tosin väriavaruus Y'PbPr:n kannalta on ITU-R BT.601-
standardin kanssa yhteneväinen. [3.; 6.]

Onneksi HDTV:n osalta on siirretty käyttämään maailmanlaajuisesti yhte-
näistä, ITU-R BT.709-standardin määrittelemää, Y'PbPr-väriavaruutta (kuva
4). Alla olevassa taulukossa on määritelty kaavat luma- ja kromasignaalien
saamiseksi sekä SDTV:ssä että HDTV:ssä (taulukko 5). [3.; 4.; 6.]

Taulukko 5. Y'PbPr-arvojen laskukaavat [6.]

SDTV ja EDTV (ITU-R BT.601)
${}^{601}Y' = 0,299R' + 0,587G' + 0,144B'$
$P_B = \frac{0,5}{1-0,144} (B' - {}^{601}Y') = \frac{1}{1,772} (B' - {}^{601}Y')$ $P_B = -0,168736R' - 0,331264G' + 0,5B'$
$P_R = \frac{0,5}{1-0,299} (B' - {}^{601}Y') = \frac{1}{1,402} (R' - {}^{601}Y')$ $P_R = 0,5R' - 0,418688G' - 0,081312B'$
HDTV (ITU-R BT.709)
${}^{709}Y' = 0,2126R' + 0,7152G' + 0,0722B'$
$P_B = \frac{0,5}{1-0,0722} (B' - {}^{709}Y') = \frac{1}{1,8556} (B' - {}^{709}Y')$ $P_B = -0,114572R' - 0,385428G' + 0,5B'$
$P_R = \frac{0,5}{1-0,2126} (R' - {}^{709}Y') = \frac{1}{1,5748} (R' - {}^{709}Y')$ $P_R = 0,5R' - 0,454153G' - 0,045847B'$

3.5.3 Y'CbCr-väriavaruus

Kuten Y'PbPr, sekoitetaan Y'CbCr valitettavan usein sekä Y'UV:n että
Y'PbPr:n kanssa. Y'CbCr:llä tarkoitetaan kuitenkin R'G'B':stä värierokoodat-
tua väriavaruutta, ja se on digitaalinen komponenttividéosignaali. [3.]

Kun R'G'B'-väriavaruus käsittää noin 16,7 miljoonaa eri väriä, käsittää
Y'CbCr-väriavaruus vain noin 2,75 miljoonaa eri väriä. Tämän takia studio-
olosuhteissa kannattaa kaikissa välivaiheissa välttää R'G'B':n muuntamista
Y'CbCr:ksi. [4.]

Y'CbCr-väriavaruus määritellään SDTV:n osalta ITU-R BT.601-standardissa,
EDTV:n osalta ITU-R BT.1358-standardissa ja HDTV:n osalta ITU-R BT.709
-standardissa. [4.; 6.]

Videosignaali Y'CbCr:ssä muodostetaan siis värierokoodaamalla R'G'B'-
signaali ja muuntamalla se luma- (Y') sekä kroma-komponentteihin (Cb ja Cr).
Näin 8-bittisen Y'CbCr:n nimellisarvoalueiksi saadaan luman osalta 16-235

ja kroman osalta 16-240 (ks. kpl 3.3). Tämän jälkeen Y'CbCr-signaalin luma- ja kromasignaalit näytteistetään, jotta siihen saadaan haluttu kompressiosuhde. Alla olevassa taulukossa esitetään kaavat Y'CbCr-signaalin muodostamiseksi R'G'B':stä (taulukko 6). [3.; 4.; 6.]

Taulukko 6. Y'CbCr-arvojen laskukaavat [6.]

SDTV ja EDTV (ITU-R BT.601)	
${}^{601}Y' = 16 + (219 * {}^{601}Y') = 16 + [219 * (0,299R' + 0,587G' + 0,144B')]]$ ${}^{601}Y' = 16 + (65,418R' + 128,553G' + 24,966B')$	
$C_B = 128 + \frac{112}{0,886} (B' - {}^{601}Y')$	$C_B = 128 + (-37,797R' - 74,203G' + 112B')$
$C_R = 128 + \frac{112}{0,701} (B' - {}^{601}Y')$	$C_R = 128 + (112R' - 93,786G' - 18,214B')$
HDTV (ITU-R BT.709)	
${}^{709}Y' = 16 + (219 * {}^{709}Y') = 16 + [219 * (0,2126R' + 0,7152G' + 0,0722B')]]$ ${}^{709}Y' = 16 + (46,559R' + 156,629G' + 15,812B')$	
$C_B = 128 + \frac{112}{0,9278} (B' - {}^{709}Y')$	$C_B = 128 + (-25,664R' - 86,336G' + 112B')$
$C_R = 128 + \frac{112}{0,7874} (R' - {}^{709}Y')$	$C_R = 128 + (112R' - 101,730G' - 10,270B')$

Y'CbCr-signaalin näytteistyksessä käytetään useita näyteenottotaajuuksia. Näyteenottotaajuus määräytyy kuvan resoluution- ja kehystaajuuden mukaan sekä sen mukaan minkälainen kompressiosuhde signaalille halutaan (ks. kpl 3.6). [3.; 4.]

3.6 Kromasignaalien alinäytteistäminen

Pakkaamattoman videosignaalin siirto vaatii todella paljon kaistaa. Alla olevassa taulukossa on esitetty muutamia pakkaamattomia videosignaaleja sekä niiden siirtämiseen tarvittavat kaistanleveydet (taulukko 7).

Taulukko 7. Pakkaamattoman videosaunan tarvitsemia kaistanleveyksiä

Kaava kaistanleveyden laskemiseksi
$\text{resoluutio}[\text{pix}] * \text{kehystaajuus}[\text{Hz}] * 3(\text{RGB}) * \text{näytteenottotarkkuus}[\text{bit}/\text{pix}] = \text{kaistanleveys}[\text{bit}/\text{s}]$
4:4:4 576i25 (esim. SDTV-lähete)
$720 * 576 \text{pix} * 25 \text{Hz} * 3 * 8 \text{bit} / \text{pix} \approx 249 \text{Mbit} / \text{s}$
4:4:4 1080p25 (esim. HDTV-lähete)
$1920 * 1080 \text{pix} * 25 \text{Hz} * 3 * 8 \text{bit} / \text{pix} \approx 1244 \text{Mbit} / \text{s}$

Tarvittava kaistanleveys saadaan siis kertomalla yhteen resoluutio, kehystaajuus, päävärienvärien lukumäärä (RGB) sekä niiden näytteenottotarkkuus.

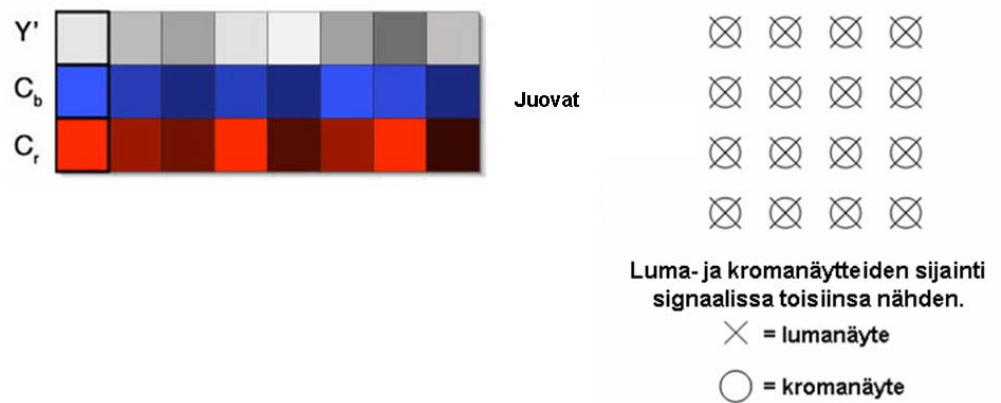
Kromasignaalin alinäytteistäminen on siis tärkeä osa kuvan pakkaamista pienempään tilaan. Koska ihmisen näköaisti on herkempi havaitsemaan eroavaisuuksia luminanssissa kuin kromianssissa, voidaan kromasignaali alinäytteistää. Videosaunan tarvitsema kaistanleveys saadaan alinäytteistyksestä jopa puolitetuuta ilman, että kuvan laatu kärsisi siitä. [4.]

Kun Y'CbCr-signaali alinäytteistetään, käytetään siinä useita näytteenottoaajuuksia. Näytteenottoaajuus oli alun perin taajuuden 3,375 MHz kerrannainen. Näin ollen, jos Y'CbCr-signaali alinäytteistettiin vaikkapa 4:2:2-alinäytteistyksestä, lumasignaalin näytteenottoaajuus oli $4 * 3,375 \text{ MHz} = 13,5 \text{ MHz}$ ja kromasignaalin $2 * 3,375 \text{ MHz} = 6,75 \text{ MHz}$. Nykyään näytteenottoaajuuden kerrannaisuuden käyttämisestä on kuitenkin luovuttu, ja nykyään luvut merkitsevät luma- ja kroma- näytteiden keskinäistä suhdetta videosaunassa. Liitteessä kaksi on esitetty yleisimmin käytettyjen resoluutioiden näytteiden määrä juovaa kohti sekä näytteenottoaajuudet (ks. liite 2). [3.; 6.]

Jotta Y'CbCr-signaali voidaan esittää näyttölaitteessa, täytyy se muuntaa aina kuitenkin R'G'B'-muotoon. Tällöin Y'CbCr-signaalista täytyy ensin saada muodostettua 4:4:4- tai 4:2:2-muotoinen signaali. Jos alinäytteistys on tehty jotain muuta menetelmää käyttäen (esim. 4:2:0) joudutaan puuttuvat kroma- näytteet interpoloimaan MPEG-dekooderissa. Valitettavasti eri MPEG-dekooderit suoriutuvat tästä tehtävästä vaihtelevalla menestyksellä ja kuvaan saattaa tulla havaittavia virheitä, jotka tunnetaan nimillä interlaced chroma problem (ICP) ja chroma upscaling error (CUE) (ks. kpl 3.6.5). [15.]

3.6.1 4:4:4-alinäytteistys

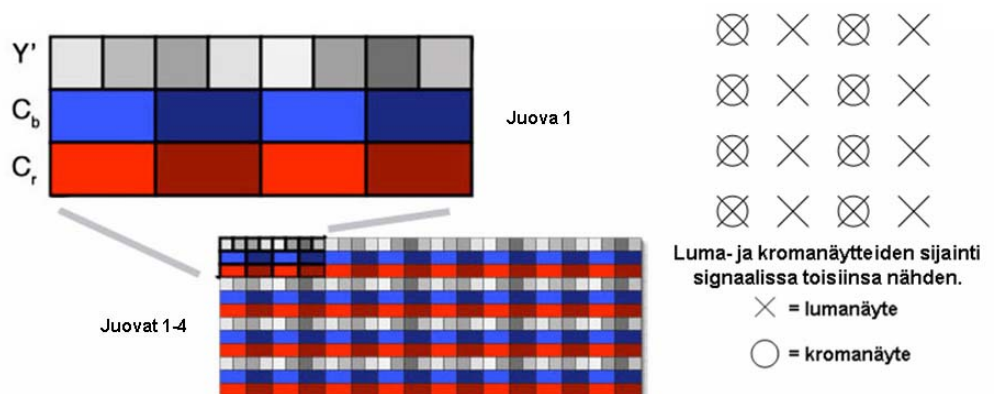
4:4:4-alinäytteistysmenetelmässä jokaista luma-näytettä kohti otetaan myös C_b- ja C_r-näytteet (kuva 6). Tämä on paras menetelmä alinäytteistää R'G'B'-signaali Y'CbCr:ksi, mutta tällöinkin kuva altistuu kvantisoinnista aiheutuville virheille. 4:4:4-alinäytteistysmenetelmä on käytössä laitteiden sisäisessä signaalin siirrossa sekä ammattilaistason laitteissa ja siitä puhuttaessa täytyy muistaa, että merkintää 4:4:4 saatetaan käyttää myös R'G'B'-signaalille. Tällöin signaalia ei ole lainkaan alinäytteistetty! [3.]



Kuva 6. Kaavio progressiivisen kuvan 4:4:4-alinäytteistyksestä

3.6.2 4:2:2-alinäytteistys

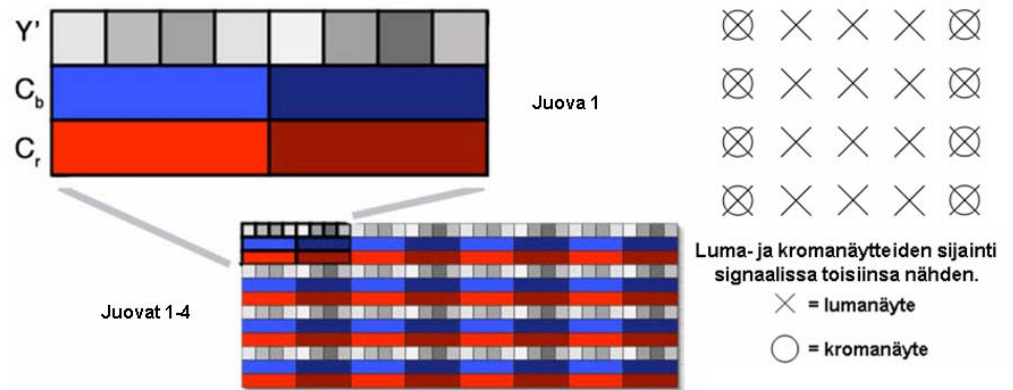
4:2:2-alinäytteistyksessä kromasignaalien näytteenottotaajuus on puolet lumasignaalin näytteenottotaajuudesta. 4:2:2-alinäytteistysmenetelmä on käytössä ainoastaan ammattilaistason laitteissa kuten videokameroissa. Kromasignaalin vaakasuuntainen resoluutio on tällöin puolet lumasignaalin vaakasuuntaisesta resoluutiosta (kuva 7). [3.]



Kuva 7. Kaavio progressiivisen kuvan 4:2:2-alinäytteistyksestä

3.6.3 4:1:1-alinäytteistys

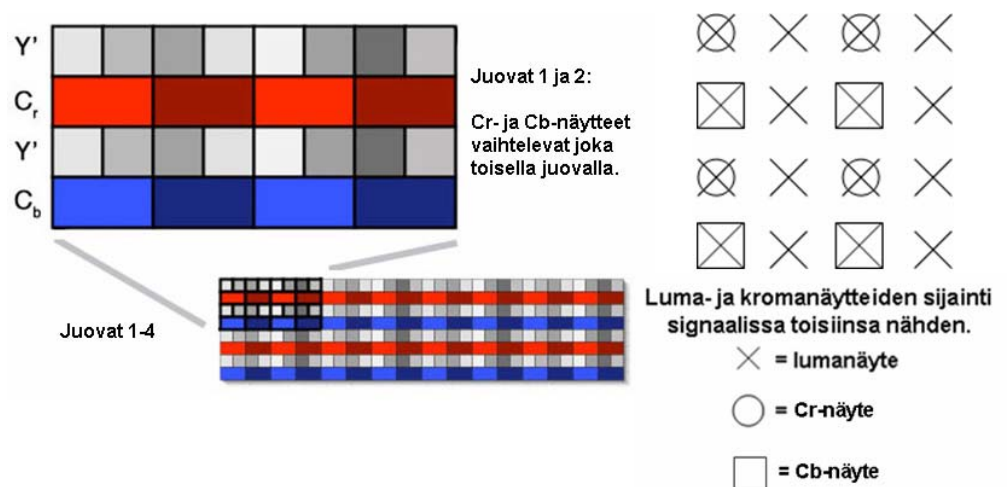
4:1:1-alinäytteistystä käytetään yleisimmin 480 vaakajuovan digitaalisissa videokameroissa. Kromasignaalien vaakasuuntainen resoluutio pienenee tällöin neljäsosaan lumasignaalin resoluutiosta (kuva 8). [3.]



Kuva 8. Kaavio progressiivisen kuvan 4:1:1-alinäytteistyksestä

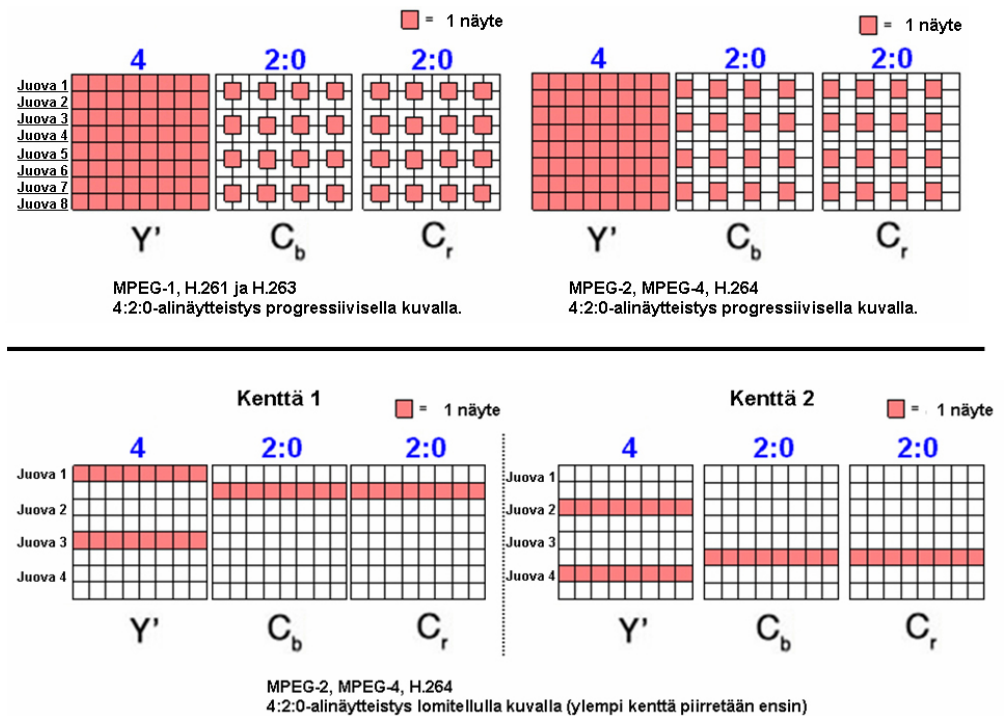
3.6.4 4:2:0-alinäytteistys

4:2:0-alinäytteistystä käytetään yleisesti kuluttajaelektronikassa, koska se soveltuu hyvin liikkuvan kuvan pakkaamiseen. Esimerkiksi kaikki myynnissä olevat DVD-, HD-DVD- ja Blu-ray-elokuvat koodataan käyttämällä 4:2:0-alinäytteistystä. Myös 576 vaakajuovan digitaalisissa videokameroissa ja digitelevisiossa käytetään sitä (kuva 9). 4:2:0-alinäytteistyksessä kromasignaalien horisontaalinen ja vertikaalinen resoluutio pienenee puoleen lumasignaalin resoluutiosta. [3.]



Kuva 9. Kaavio lomitellun kuvan 4:2:0 alinäytteistyksestä

4:2:0-alinäytteistystä käytetään progressiivisen ja lomitettun kuvan pakkaamiseen niin MPEG-1:ssä, MPEG-2:ssa kuin MPEG-4:ssäkin. Sen lisäksi sitä käytetään myös H.261:ssä, H.263:ssa ja H.264:ssä. Progressiivisella ja lomitellulla kuvalla kromanäytteet sijoittuvat lumanäytteisiin nähden eri kohtiin ja kun puuttuvia kromanäytteitä interpoloidaan MPEG-dekooderissa, niiden laskennassa käytetään progressiivisella ja lomitellulla kuvalla erilaisia matemaattisia algoritmeja (kuva 10). [3.]



Kuva 10. Kaavio 4:2:0-alinäytteistyksestä

Kun esimerkiksi DVD-levyllä käytetään 4:2:0-alinäytteistystä progressiiviselle kuvalle, juovien kromanäytteet sijoittuvatkin kahden juovan väliin. Eli kun alkuperäinen materiaali on ollut 4:4:4-muodossa, on MPEG-2-enkooderissa kahden juovan kromanäytteistä laskettu ensin keskiarvo ja jaettu saatu keskiarvo molemmille juoville. Tällöin juovat 1 ja 2 saavat normaalisti omien juoviensa lumanäytteet, mutta kromanäytteiden arvoiksi juovien 1 ja 2 keskiarvot. [14.]

Jos käytetään kuitenkin 4:2:0-alinäytteistystä lomitellulle kuvalle, muuttuu yhtälö hieman monimutkaisemmaksi. Nyt käytetään kahta peräkkäistä kenttää, joista kokonainen MPEG-kuva saadaan muodostetuksi. Tällöin lumanäytteet näytteistetään molemmille kentille normaalisti juova juovalta ja kromanäytteiden arvojen laskemiseksi käytetään MPEG-2-enkooderissa matemaattista

algoritmia. Kuvan kymmenen mukaisesti kentässä 1, juovien 1 ja 3 kromanäytteiden arvot saadaan laskemalla 75 % alkuperäisen materiaalin juovan 1 kromanäytteen arvosta ja lisäämällä siihen 25 % alkuperäisen materiaalin juovan 3 kromanäytteen arvosta. Painotusarvot 75 % ja 25 % saadaan, koska kromanäytteen sijainti kentässä 1 on kolme kertaa lähempänä juovaa 1 kuin juovaa 3. Vastaavasti kentässä 2, juovat 2 ja 4 saavat kromanäytteen arvonsa 75 % alkuperäisen materiaalin juovan 4 kromanäytteen arvosta ja lisäämällä siihen 25 % alkuperäisen materiaalin juovan 2 kromanäytteen arvosta. [14.]

Käytännössä MPEG-2-enkooderit käyttävät kuitenkin useampaa kuin kahta juovaa datapisteinään kromanäytteiden laskemiseksi. Lisäksi käytössä on huomattavasti mutkikkaampia algoritmeja kuin suhdeluvut 75/25. Järjestelmän ollessa näin mutkikas ei ole ihme, että ongelmia on ilmennyt kromasignaalin muodostamisessa sekä MPEG-2-enkooderien että MPEG-2-dekooderien välille (ks. kpl 3.6.5). [14.]

3.6.5 *Chroma upsampling error ja interlaced chroma problem*

Kromasignaalin alinäytteistys vaikuttaa heikentävästi kuvanlaatuun ja saattaa aiheuttaa kuvaan näkyviä ongelmia. Nämä ongelmat kuvassa tunnetaan kromabugin nimellä. Chroma upsampling error (CUE) sekä interlaced chroma problem (ICP) ovat molemmat kromabugin ilmentymiä. Molemmat ”bugit” eli ongelmat näyttävät katsojan silmään hyvin samankaltaisilta virheiltä. Erietyisesti kohdissa, joissa on kahden voimakkaan värin välinen raja, toinen väreistä saattaa levitä toisen värin puolelle vaakasuuntaisina juovina, jolloin kuvan terävyys kärsii. Varsinkin punaisen värin kanssa ongelma on ilmeinen. Liitteessä kolme on esitetty esimerkkejä kromabugin ilmentymistä (ks. liite 3). [14.]

Interlaced chroma problem ei ole teknisesti ottaen bugi, vaan tekniikan mukanaan tuoma ominaisuus, joka on kuitenkin kuvanlaadun kannalta muodostunut ongelmaksi. Liikkuvalla kuvalla ongelma ei ole niin ilmeinen, mutta varsinkin liikkumattomissa kuvissa eri kenttien kromasignaalit voivat mennä sekaisin, aiheuttaen häiriöitä kuvassa esiintyvien objektien rajoille (kuva 11). Ongelma pystytään nykyään häivyttämään hyvien dvd-soittimien MPEG-dekooderissa toteutetulla moniportaisella FIR-filtterillä (finite impulse response) sekä hyvällä lomituksenpoistopiirillä. [14.]



Kuva 11. Interlaced chroma problem (ongelmakohdat suurennettu)

MPEG-dekooderi käyttää kahta eri algoritmia interpoloidessaan puuttuvat kromänäytteet 4:2:0-videosignaalista. Yleensä dekooderi käyttää lomitellulle kuvasignaaliille tarkoitettua algoritmia, mutta se voi vahingossa käyttää progressiiviselle kuvalle tarkoitettua algoritmia. Chroma upsampling error ilmenee, jos MPEG-dekooderi käyttää väärää algoritmia kromasignaalien interpoloimiseen. Alla olevassa kuvassa on esitetty kromasignaalin vääristyminen väärin valitun algoritmin seurauksena (kuva 12). [14.]



Kuva 12. Interpoloidun kromasignaalin vääristyminen

3.7 Deep Color ja xvYCC

Tulevaisuudessa saatamme nähdä väriavaruuksia, jotka ylittävät nykyisen 8-bittisen RGB- tai Y'CbCr-väriavaruuden. Deep Color, jota HDMI 1.3-standardi jo tukee, laajentaa olemassa olevaa RGB- tai Y'CbCr-väriavaruutta tarjoten 10-, 12- ja 16-bittisen väriskaalan. Saatavien värisävyjen määrä olemassa olevasta RGB-värikuutiosta laajentuisi tällöin miljoonista miljardeihin. Suurempi värisävyjen määrä näkyisi kuvanlaadussa rikkaampina väreinä sekä vähentäisi taulutelevisiossa värien kaistoittumisena tunnettua ongelmaa. [20.]

xvYCC-väriavaruus sen sijaan tarjoaa 1,8 kertaa enemmän värejä kuin mitä RGB- tai Y'CbCr-väriavaruus tarjoavat. xvYCC-väriavaruus antaa siis mahdollisuuden esittää näyttölaitteessa sellaisia uusia värejä, joita ei RGB- tai Y'CbCr-väriavaruuksien standardien mukaan pystytä lainkaan esittämään. Kuvanlaadussa suurempi väriavaruus näkyisi rikkaampina väreinä sekä vähentäisi värien kaistoittumisena tunnettua ongelmaa. [20.]

4 KEHYS- JA KENTTÄTAAJUUKSET HDTV:SSÄ

4.1 Kehys- ja kenttätaajuus

HDTV-materiaalia tarjotaan useissa formaateissa. Kuvan resoluution lisäksi saattaa videokuvan kehys- tai kenttätaajuus vaihdella. Käytettäessä kehystaajuus-nimitystä (en. frame rate) tarkoitetaan kuvan olevan lomittelematon eli progressiivista, jolloin kaikki kuvan vaakajuovat piirretään yhtä aikaa. Kenttätaajuutta (en. field rate) käytettäessä tarkoitetaan kuvan olevan lomitetua, jolloin parillisista ja parittomista vaakajuovista muodostetut kuvat piirretään näyttöruudulle erillisinä kenttinä. Jotta lomittelematon- ja lomitetu videosignaali eivät menisi sekaisin, käytetään tässä tutkimuksessa selvyiden vuoksi lomittelemattomasta termiä progressiivinen.

Televisiotekniikassa päädyttiin käyttämään kuvakenttiä, koska kokonaisen kehyksen piirtäminen samalla kertaa ei olisi teknisesti ollut tuolloin mahdollista toteuttaa riittävän laadukkaasti. Kun kuvaputkitelevisiossa ruudulle piirretään elektronisuihkulla piste, himmenee tuo piste ruudulla melko nopeasti. Jos koko kuva-alan päivittäminen tehtäisiin vaakajuova kerrallaan ylhäältä alas edeten, alareunan piirtohetkellä kuvan yläosa olisi ehtinyt tummua niin voimakkaasti, ettei katsoja näkisi kuvaa tasavärisenä. Kuvapisteen kirkkauden pumppaaminen näkyisi siis kuvan selvänä välkkymisenä. Välkkymisen visuaalisen vaikutuksen vähentämiseksi kuvaputkiruuduissa käytetään lomitettua piirtomenettelyä. Tällä tavoin kirkkausero näkyy kuvan eri osien sijaan vierekkäisten juovien välillä. Käytettäessä suurta virkistystaajuutta eivät vierekkäisten juovien piirtämisessä käytetyt fosforipisteet ehdi kunnolla sammua, joten ihmissilmää saadaan huijattua näkemään ruudulla kokonaisia kuvia puolikuvien sijaan. [16.; 17.]

Maailmalla käytetään erilaisia kehys- ja kenttätaajuuksia saman materiaalin esittämiseen televisiossa. Alla olevassa taulukossa on esitetty yleisimmin käytössä olevat kehys- ja kenttätaajuudet (taulukko 8). Erilaisten taajuuksien käyttöön on alun perin päädytty kulloisenkin maan verkkovirran taajuudesta johtuvista syistä. Television alkuaikoina huomattiin vastaanottimien ottavan häiriötä verkkovirrasta. Tämä ilmeni pystysuunnassa liikkuvina raitoina. Häiriöiden minimoimiseksi otettiin käyttöön sama kenttätaajuus kuin verkkovirralla, jolloin raidat saatiin pysymään paikoillaan tai liikkumaan niin hitaasti ylhäältä alas, ettei liikettä havainnut. Verkkovirrasta aiheutuvat häiriöt eivät

onneksi nykyajan näyttölaitteita enää vaivaa, mutta tuolta ajalta peräisin olevat kenttätaajuudet ovat yhä edelleen olemassa. Pohjois-Amerikassa standardoitiin 59,94 herzin ja Euroopassa 50 herzin kenttätaajuudet ja näitä kenttätaajuuksia käytetään yhä edelleen. [4.]

Taulukko 8. Yleisimmät kehys- ja kenttätaajuudet

Kehystaajuus	Kenttätaajuus
23,976	50
24	59,94
25	
29,97	
30	
50	
59,94	
60	

Kehys- ja kenttätaajuuksista puhuttaessa on lähdemateriaalilla erittäin suuri merkitys. Elokuvat kuvataan kaikki filmille, jolloin elokuvakameran sulkimen nopeus määrittää käytetyn kehystaajuuden. Filmimateriaalilla kehystaajuus on aina 24 fps (frames per second). Televisioon kuvattu videomateriaali on kuitenkin lähtökohtaisesti lomiteltua. PAL-lähetysstandardin maissa käytetty kenttätaajuus on 50 fps (fields per second) ja NTSC-lähetysstandardin maissa kenttätaajuus on 59,94 fps (fields per second). Jotta tämä lomiteltu kuva saataisiin näkymään ongelmitta myös kuvan progressiivisesti piirtävissä näyttölaitteissa, joudutaan turvautumaan lomituksen poistoon (en. deinterlacing) (ks. kpl 5.1). [4.]

Elokuvat, jotka esitetään elokuvateattereissa, kuvataan siis filmille 24 fps kehystaajuudella. Jotta elokuvia sekä muuta filmille kuvattua materiaalia voitaisiin esittää myös televisiossa, joudutaan kuvan kehystaajuutta muuttamaan. Tästä prosessista käytetään nimitystä telecine, jolloin käytetään hyödyksi erilaisia pulldown-menetelmiä (ks. kpl 4.5). Kehys- sekä kenttätaajuuden muuttamiseen tarvitaan myös muitakin menetelmiä, jotka esitellään omassa kappaleessaan (ks. kpl 4.4). [16.]

4.2 Kriittinen välkyntätaajuus

Kuten jo aiemmin todettiin, on ihmisen näköaisti herkempi havaitsemaan eroja luminanssissa kuin krominanssissa (ks. kpl 3.1). Mikäli olosuhteet ovat

oikeat, ihmisen näköaisti havaitsee videokuvassa myös herkästi välkyntää ja nykimistä. [1.]

Jos liikkuvaa kuvaa esitetään vähintään kymmenen kuvaa sekunnissa, ihmisen näköaisti havaitsee tuon kuvan liikkuvan eikä vain sarjana erillisiä kuvia. Kuva näyttää nykivältä ja välkkyvältä, jos kuvia ei näytetä riittävän nopeasti. Ihmisen näköaistin kriittinen välkyntätaajuus on kuitenkin riippuvainen monesta seikasta, jotka nostavat tuota välkyntäaajuuden havaittavuuden rajataajuutta. Mitä kirkkaampi ja suurempi kuva on, sitä herkemmin ihminen altistuu välkyntäaajuuden havaitsemiselle. Myös katseluetäisyys sekä ympäristön kirkkaus vaikuttavat kriittiseen välkyntäaajuuteen. Mitä kauempaa ja mitä pimeämmässä ympäristössä kuvaa katsellaan, sitä pienempi on kriittinen välkyntäaajuus. Televisioissa käytetään siis vähintään 50 Herzin kuvanpäivitysnopeutta ihmisen fysiologiaan perustuvista syistä. Mikäli kuva esitetään ruudulla 50 kertaa sekunnissa, nykimistä ja välkyntää on hyvin vaikea havaita ja liiketoisto näyttää sulavalta. [1.]

Elokuvateattereissa ja filmiprojektoreissa filmikela pyörii nopeudella 24 kuvaa sekunnissa. Välkyntäaajuuden vähentämiseksi käytetään suljinta, joka nopeuttaa 24 kuvaa sekunnissa pyörivän filmin välähtämäänsä kankaalla 48 tai 72 kertaa sekunnissa.

4.3 Filmin muuntaminen videoksi

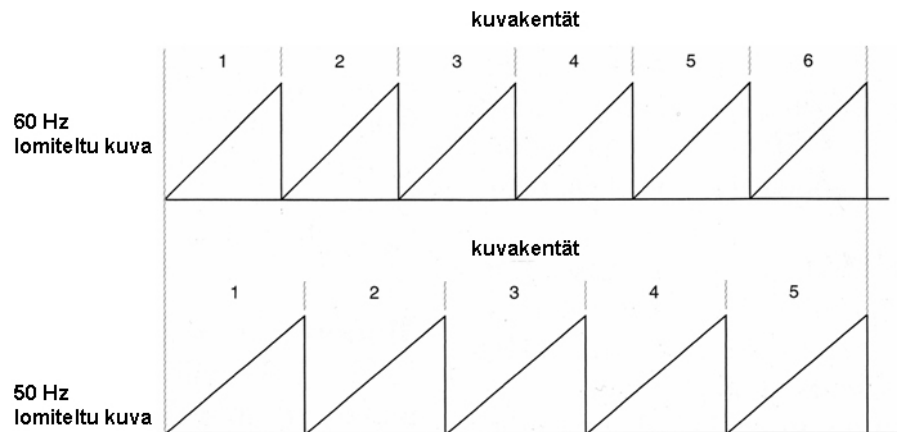
Koska käytössä on useita kehys- ja kenttätaajuuksia sekä tekniikaltaan erilaisia näyttölaitteita, täytyy videosignaali muuntaa näyttölaitteelle sopivaan muotoon. Kuvaputkitelevisiot näyttävät kuvan lomitellussa muodossa. Uudemmissa näyttölaitetekniikoissa, kuten taulutelevisioissa ja videotykeissä, käytetään kuvan lomittelematonta eli progressiivista esitysmuotoa. Jotta kuva saadaan muutettua erilaisista kehys- ja kenttätaajuuksista näyttölaitteen tukemaan muotoon, täytyy näyttölaitteessa tai ohjelmalähteessä suorittaa videokuvalle lomitusta tai lomituksen poisto. [3.]

Alkuperäisestä filmille kuvatusta materiaalista, joka filmillä esitetään 24 peräkkäisenä kuvana sekunnissa, muodostetaan sähköinen versio muunnosprosessilla, josta käytetään termiä telecine (lyh. TK). Jotta 24 kuvakehyksestä saadaan muunnettua televisioihin sopiva kehystaajuus (25 fps ja 29,97 fps), joudutaan kehystaajuuden muuntamiseen käyttämään erilaisia pull-down-menetelmiä. Kun filmiltä siirretyn materiaalin kehystaajuus on muun-

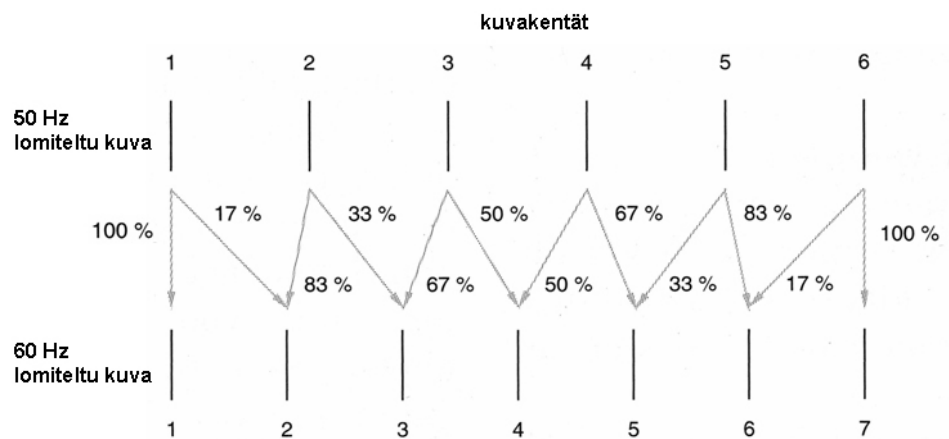
nettu sopivaksi, voidaan sille tehdä lomitukset (en. interlacing). Televisiolähettyksiin sopivat 50 fps ja 59,94 kenttätaajuudet saadaan jakamalla 25 fps ja 29,94 fps kehystaajuudet kahdeksi kuvakentäksi. Pulldown-menetelmät esitellään tarkemmin hieman tuonnempana (ks. kpl 4.5). [3.]

4.4 Kehys- ja kenttätaajuuden muuttaminen

Jotta kuva saataisiin näkymään näyttölaitteella, joudutaan kehys- tai kenttätaajuutta varsin usein muuttamaan. Yksinkertainen tapa muuttaa kehys- tai kenttätaajuutta on pudottaa osa kehyksistä tai kentistä pois (kuva 13). Tämä menetelmä tosin aiheuttaa nykimistä. Hieman kehittyneempi tapa muuntaa kehys- tai kenttätaajuus on interpolointi (kuva 13). Interpoloimalla päästään eroon kuvan nykimisestä, mutta tällöin kuvan tarkkuus kärsii. Esimerkiksi kameran vaakapanoroinneissa kapea objekti näkyisi yhtenä vain joka kuudennessa kentässä. Niiden välillä olevissa viidessä kentässä katsoisimmekin kahta objektiä yhtä aikaa, joista toisessa objekti on juuri siirtymässä kyseiseen paikkaan ja toisessa se olisi jo siirtymässä pois. Käyttämällä liikekompensointia päästään huomattavasti tarkempaan kuvanlaatuun. Laadukas liikekompensatio vaatii kuitenkin paljon laskentatehoa ja on siksi kallis toteuttaa. [3.; 4.]



Kenttätaajuuden muunnos 60 herzistä 50 herziin. Joka kuudes kenttä pudotetaan pois.



Kenttätaajuuden muunnos 50 herzistä 60 herziin käyttämällä interpolointia. Ei liikekompensaatiota.

Kuva 13. Kehys- ja kenttätaajuuden muuntaminen

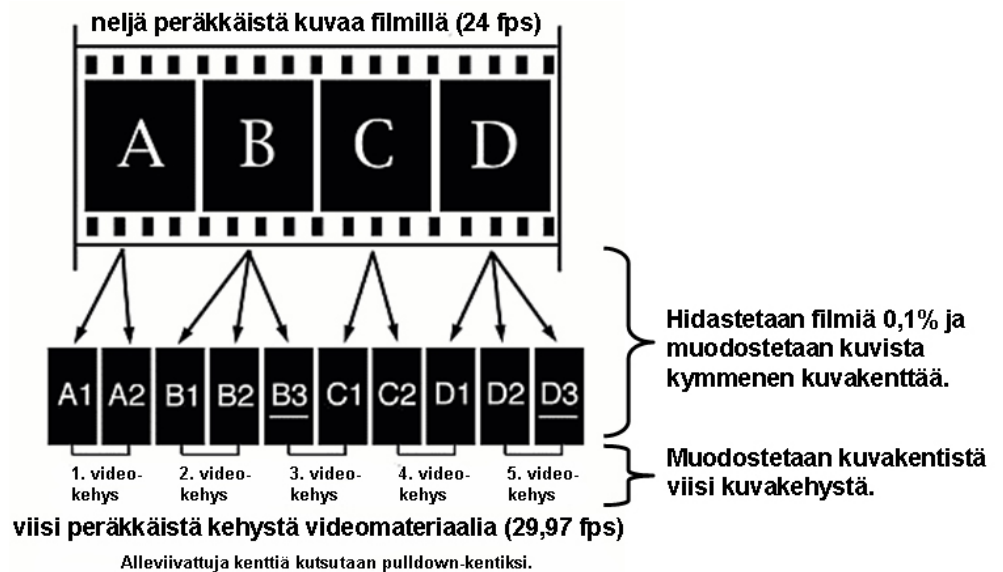
4.5 Filmin skannaus ja muuntaminen videoksi

Suuri osa televisiossa esitettävästä materiaalista kuvataan yhä edelleen filmille. Ennen kuin filmille kuvattu, 24 fps kehystaajuinen, materiaali voidaan lähettää televisiolähetysenä tai ennen kuin siitä voidaan tehdä vaikkapa DVD-levy, täytyy filmistä tehdä sähköinen kopio sekä muuttaa kehystaajuutta. Tässä työssä tuosta muunnosprosessista käytetään termiä telecine. Telecine-termiä käytetään yleisesti elokuva- ja televiisiteollisuudessa. Telecine-nimitys tulee sanoista television ja cinema. [16.]

Telecine tunnetaan prosessin lisäksi myös varsinaisena laitteena, jolla filmimateriaali muunnetaan sähköiseen muotoon. Käyttämällä erilaisia pulldown-menetelmiä saadaan tuosta sähköisestä 24 fps filmikopiosta muunnettua kuvalle haluttu kehystaajuus. Tätä prosessia kutsutaan usein myös menetelmäksi, jolla filmimateriaali muunnetaan videomateriaaliksi. [16.]

4.5.1 2-3 pulldown

2-3 pulldown-menetelmää käytetään, kun 24 fps kehystaajuus muunnetaan 29,97 fps kehystaajuudelle. Menetelmästä käytetään yleisesti nimitystä 2:3 pulldown. Ensimmäinen vaihe muunnoksessa on hidastaa filmiä 0,1 %, jolloin filmin kehysnopeus laskee nopeuteen 23,976 fps. Tämän jälkeen neljästä peräkkäisestä filmillä olevasta kuvakehyksestä muodostetaan kymmenen kuvakenttää, joista muodostetaan viisi kuvakehystä. Kun nämä viisi uutta kuvakehystä näytetään samassa ajassa kuin alkuperäiset neljä, saadaan kehystaajuudeksi 29,97 fps (kuva 14). [3.; 16.]

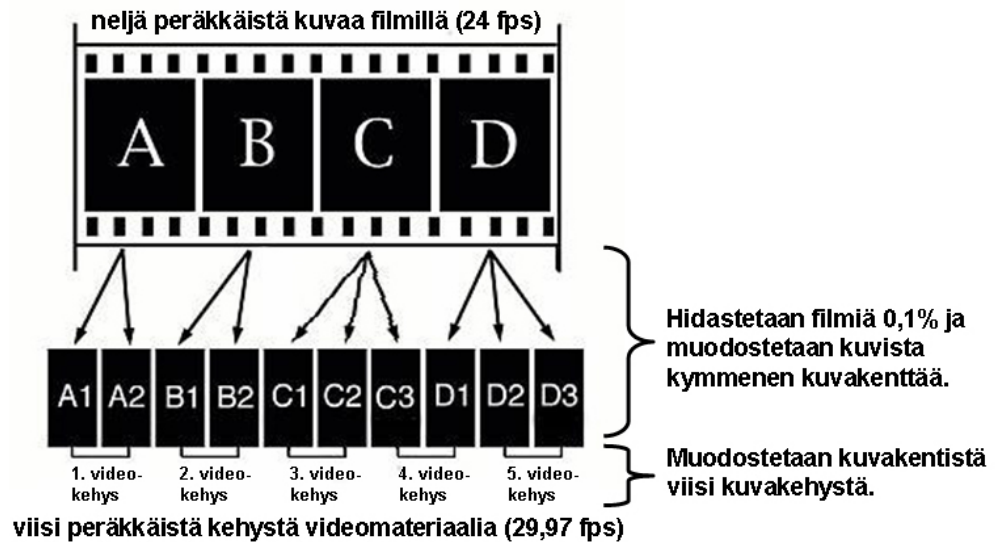


Kuva 14. 2-3 pulldown

2-3 pulldown tekee kaksi kuvakenttää filmin kuvasta A, kolme kuvakenttää filmin kuvasta B, kaksi kuvakenttää filmin kuvasta C ja kolme kuvakenttää filmin kuvasta D, jonka jälkeen telecine-kierros alkaa taas uudelleen kuvasta A. Tämän jälkeen jokaisesta kuvakehyksestä muodostetaan kaksi kuvakenttää, jolloin saavutetaan 59,94 fps kenttätaajuus. [3.; 16.]

Kuvan 14 mukaisella menettelyllä videomateriaalin kolmas ja neljäs kuvakehys muodostetaan yhdistämällä kaksi eri ajanhetkinä kuvattua kuvakenttää. Luonnollisesti tämä heikentää kuvanlaatua. Sen lisäksi 2-3 pulldown tuo su-lavasti liikkuvaan kuvaan hieman nykimistä (en. telecine judder). Tämä voi-daan havaita erityisesti hitaissa vaakapanoroinneissa. Nykimistä on kuiten-kin tottumattoman silmän melko vaikea havaita, joten ongelma ei ole kovin-kaan suuri. Kuvan 14 mukaista 2-3 pulldownia on käytetty aina 80-luvun lo-

pulle saakka, jolloin kehyspuskurissa ei voinut olla kuin yksi kuvakehys kerrallaan. Nykyisten kehyspuskureiden salliessa useampien kuvakehysten puskuroinnin, suositellaan 2-3 pulldownille kuvan 15 mukaista menettelytapaa. [3.; 16.]



Kuva 15. 2-3 pulldown nykypäivänä

Yllä olevasta kuvasta nähdään, että videomateriaalin kuvanlaatua saadaan parannettua, koska alkuperäisiä filmille kuvattuja kuvia yhdistetään tällä menetelmällä vain neljänteen videokehukseen. Valitettavasti tämä menetelmä tuottaa videokuvaan hieman enemmän nykimistä (en. telecine judder). Koska 2-3 pulldownia käyttämällä pyritään saavuttamaan 59,94 fps kenttätaajuus, ei kyseistä menetelmää käytetä muualla kuin NTSC-lähetysstandardia käytävissä maissa. [3.; 16.]

2-3 pulldown-menetelmää voidaan käyttää myös 59,94 fps kehystaajuuden saavuttamiseksi. Tällöin jokaisesta kuvakentästä muodostetaan kuvakehys ja puuttuvat juovat joudutaan interpoloimaan. PAL-standardin maissa käytetään hieman erilaista menetelmää, 2-2 pulldownia (ks. kpl 4.5.2). [3.; 16.]

4.5.2 2-2 pulldown

Filmille kuvattu 24 fps:n elokuva, joudutaan PAL-lähetysstandardin maissa muuntamaan 25 fps:n kehystaajuudelle. Menetelmästä käytetään yleisesti myös nimitystä 2-2 pulldown. MPEG-enkoodauksessa filmin kulkua nopeutetaan telecine-laitteella noin 4,17 %, jolloin saavutetaan haluttu 25 fps kehystaajuus. Tämän jälkeen jokaisesta kuvakehuksesta muodostetaan kaksi kuvakenttää, jolloin saavutetaan 50 fps kenttätaajuus. [3.; 16.]

Tämä nopeutus vaikuttaa luonnollisesti filmille kuvatun materiaalin pituuteen. Esimerkiksi kahden tunnin elokuva lyhenee tästä 4,17 % nopeutuksesta noin viisi minuuttia. Myös elokuvan ääniraidan säveltaso nousee hieman, minkä takia enkoodauksessa olisi suositeltavaa käyttää säveltason korjausta. Tämä menetelmä ei vaikuta liikkuvan kuvan sulavuuteen, ja kuvanlaatu säilyy hyvänä. [3.; 16.]

4.5.3 24:1 pulldown

24:1 pulldown-menetelmällä saadaan filmin 24 fps:n kehystaajuus muutettua 25 fps:n kehystaajuudeksi. Tällä menetelmällä jokaisesta filmille kuvatusta kuvasta muodostetaan ensin kaksi kuvakenttää. Lisäksi joka kahdennesta toista kuvasta muodostetaan vielä, yksi ylimääräinen, kolmas kuvakenttä. Näin 24 peräkkäisestä kuvakehyksestä saadaan 50 kuvakenttää, joista voidaan yhdistää 25 kuvakehystä. Tällä menetelmällä ääniraidan säveltaso ei nouse eikä elokuvan pituus lyhene. Menetelmä tosin tuo liikkuvaan kuvaan puolen sekunnin välein toistuvan nykäisyn (en. telecine judder). [3.; 16.]

4.5.4 3:3 pulldown

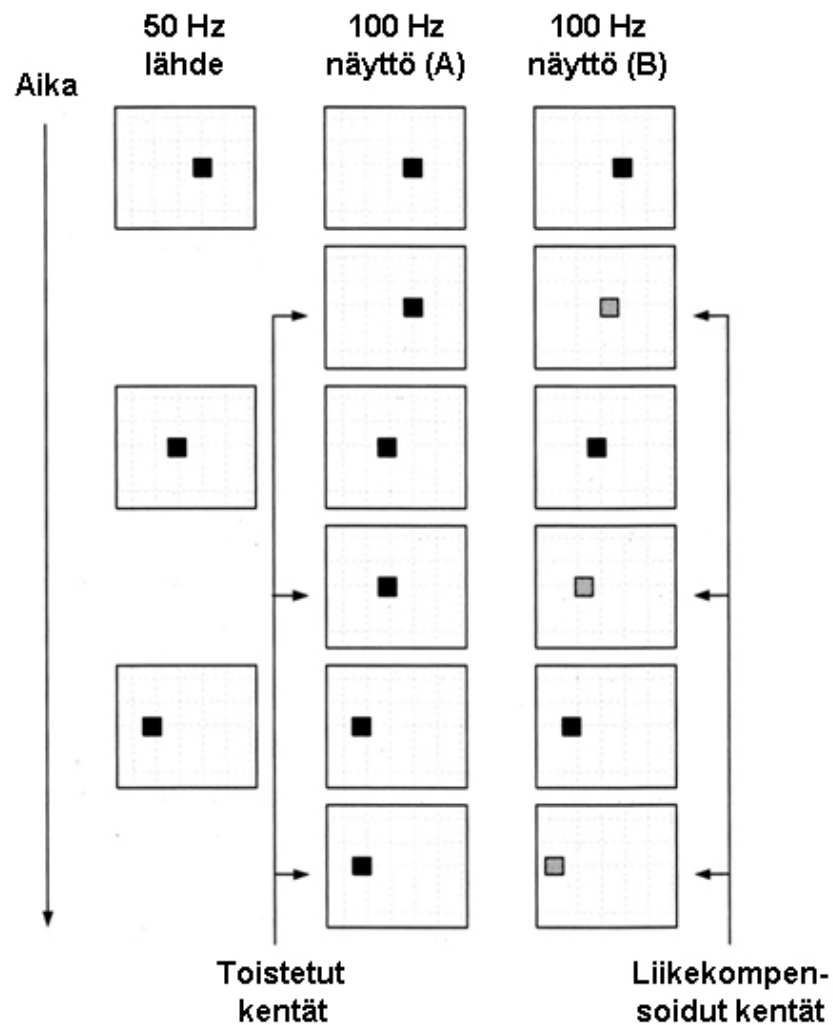
3:3 pulldown on menetelmä, jolla 24 fps:n kehystaajuus esitetään joissain näyttölaitteissa 72 herzin taajuudella. Tällä menetelmällä jokainen kuvakehys esitetään kolme kertaa yhden sijasta. [3.]

4.5.5 100 herzin tekniikka

Ennen kuin putkitelevisio poistui markkinoilta, käytettiin laadultaan paremmissa malleissa 100 herzin kenttätaajuutta. Kun putkitelevioiden kuvakoko kasvoi yli 28 tuuman, tarvittiin uutta tekniikkaa parantamaan kuvakenttien vaakajuovien välistä välkyntää. 100 herzin tekniikalla oli tarkoitus vähentää tuota välkyntää. Kuvasta saatiinkin paljon levollisempi, mutta kuvan vaakasuuntaisten linjojen jatkuva pieni ylös-alas-liike nousi aiempaa voimakkaammin esiin, sillä kuvakenttiä yksinkertaisesti vain toistettiin tuplasti suuremmalla kenttätaajuudella järjestyksessä: F₁, F₁, F₂, F₂, F₃, F₃, F₄, F₄, ... (kuva 16). [3.]

Hieman kehittyneempi toteutus 100 herzin tekniikasta esittää kentät paikallaan olevalle kuvalle järjestyksessä: F₁, F₂, F₁, F₂, F₃, F₄, F₃, F₄, ..., kun taas liikkuvalla kuvalla järjestyksessä: F₁, F₁, F₂, F₂, F₃, F₃, F₄, F₄ jne. [3.]

Filmimateriaalilla, jonka kehystaajuus on 24 fps, eivät yllä olevat kenttäjärjestykset kuitenkaan sovellu, koska kenttätaajuuden kasvattaminen aiheuttaisi tällöin havaittavaa nykimistä (en. telecine judder). Tällöin paras mahdollinen kuvanlaatu savutetaan käyttämällä liikekompensaatiota, jolloin kahden kentän väliin interpoloidaan matemaattisilla algoritmeilla kokonaan uusi kenttä (kuva 16). Kenttäjärjestykseksi saadaan nyt $F_1, F_1', F_2, F_2', F_3, F_3', F_4, F_4', \dots$, missä F_n' on liikekompensoitu kuvakenttä. Tämä menetelmä on kuitenkin kallis ja vaikea toteuttaa eikä läheskään kaikista laitteista löydy laadukkaasti toteutettua lomituksenpoistopiiriä toteuttamaan kuvalle hyvälaatuista liikekompensointia. Edellä mainituista esimerkeistä voimme huomata, että jo kuvaputkitelevisiion aikakaudella käytettiin erilaisia tekniikoita lomituksen poistossa sekä kehitettiin erilaisia menetelmiä vähentää lomituksen poistosta aiheutuvia ongelmia (ks. kpl 5). [3.]



Kuva 16. 100 Hz:n tekniikka

5 LOMITUKSEN POISTO JA SKAALAUS

5.1 Lomituksen poisto

Lomituksen poistolla (en. deinterlacing) tarkoitetaan menetelmiä, joilla lomitellettu materiaali muutetaan lomittelemattomaksi. Jos materiaali on lähtökohdaisesti lomiteltua, on lomituksen poisto periaatteellisella tasolla mahdotonta tehdä kuvanlaadun heikentymättä. Tämä johtuu siitä, että lomitellulla materiaalilla kaksi peräkkäistä kuvakenttää ovat eri aikaan kuvattuja. Kuvakenttien välillä on joko 20 millisekunnin (PAL) tai noin 17 millisekunnin (NTSC) eri ajanhetki. Näin ollen ei yksinkertainen kahden peräkkäisen kuvakentän yhdistäminen tule useinkaan kyseeseen. Yksittäisen kuvakentän puuttuvat juovat joudutaan tällöin interpoloimaan lomituksenpoistopiirillä. Lomituksen poistosta käytetään joskus myös synonyymiä inverse telecine tai IVTC. [17.]

Valtaosa nykyaikanakin esitettävästä materiaalista on yhä edelleen lomiteltua. Esimerkiksi digi-tv-lähetykset, videonauhat sekä dvd-levyt tarjoavat kuvaa, joka on lomiteltua. Valmiiksi lomitellun videokuvan esittäminen putkitelevisiolla on helppoa ja kuvanlaadultaan usein erinomaista, koska kuvan prosessoimiseen tarvittavia tekniikoita ei tarvitse juurikaan käyttää. Siirryttäessä putkitelevisioiden aikakaudelta nykypäivään ja näyttölaitteisiin, joissa videokuva esitetäänkin progressiivisesti ja useimmiten tarkemmalla resoluutiolla kuin mitä lähdemateriaali tarjoaa, joudutaan kuva lähes aina prosessoimaan näyttölaitteen tukemaan muotoon. Kuva siis skaalataan sellaiseen formaattiin, jonka näyttölaite osaa esittää. [3.; 4.]

Kuvan skaalaamisesta puhuttaessa tarkoitetaan usein tekniikkaa, jolla kuvaan lisätään laskennallisesti lisää pikseleitä, jotta kuvan resoluutio saataisiin vastaamaan näyttölaitteen ominaisresoluutiota. Skaalaus on kuitenkin kaksivaiheinen prosessi, jossa kuvasignaali täytyy ensin muuntaa progressiiviseksi ja vasta tämän jälkeen lasketaan kuvaan siihen lisättävät pikselit. Lomituksen poistolla (en. deinterlacing) saadaan lomitellusta videomateriaalista lomittelematonta eli progressiivista. Vaikka kuvasignaalille tehtyä prosessointia kutsutaankin kokonaisuudessaan skaalaukseksi, on lopullisen kuvanlaadun kannalta lomituksen poistolla kuitenkin huomattavasti suurempi merkitys kuin laskennallisella kuvan tarkkuuden lisäämisellä. Kuten liikekompensointikin, tarvitsee hyvä lomituksen poisto paljon laskentatehoa ja on siksi kallis toteuttaa. [3.; 4.]

Lomituksen poisto voidaan periaatteellisella tasolla jakaa kahteen toteutustapaan: videomoodiin ja filmimoodiin. Lomituksen poistoon on olemassa kuitenkin useita erilaisia tekniikoita ja ne esitellään seuraavissa kappaleissa. [3.; 4.]

5.2 Videomoodi: Intrafield-prosessointi

Lomituksen poisto videomoodissa voidaan toteuttaa kahdella tavalla, joko intrafield- tai interfield-prosessoinnilla. Intrafield-prosessoinnissa lomituksen poisto tehdään yhdestä alkuperäisestä kuvakentästä saatavan informaation avulla. Lomitetun kuvan muuntaminen lomittamattomaksi ilman tietoa viereisistä kentistä aiheuttaa kuvan pystysuuntaisen erottelukyvyn puoliintumisen ja näin ollen kuvasta menetetään paras tarkkuus. Pystysuuntaisen resoluution puoliintuminen havaitaan parhaiten kuvassa esiintyvien kohteiden reunoilla porrastumisena. Intrafield processing tunnetaan alan termistössä paremmin nimellä ”bobbing”. [3.; 4.]

5.2.1 Juovien kahdennus

Helpoin tapa poistaa kuvakentästä lomitus on kaksinkertaistaa kyseisen kentän juovat. Juovien kahdennus menetelmänä tunnetaan paremmin termillä juovatuplaus. Juovatuplauksella luodun kuvakehyksen pystysuuntainen resoluutio kuitenkin puoliittuu ja yksityiskohdat kärsivät (kuva 17). [3.; 4.]



Kuva 17. Esimerkki juovatuplauksen vaikutuksesta kuvanlaatuun

5.2.2 Juovien interpolointi

Kuten kuvasta 16 voidaan havaita, ei juovatuplaus tuota kuvanlaadullisesti erityisen hyvää lopputulosta. Parempaan lopputulokseen päästään interpoloimalla kuvaan puuttuvat juovat. Tällöin puuttuva juova saadaan ottamalla kahden juovan välinen keskiarvo. Tässäkin menetelmässä pystysuuntainen

resoluutio puolittuu. Parempi lopputulos saavutetaan käyttämällä puuttuvien juovien interpoloinnissa FIR-filtteriä, jolloin kaava puuttuvan juovan laskemiseen on alla olevan taulukon kaltainen (taulukko 9). [3.; 4.]

Taulukko 9. Juovien interpolointikaavat

Keskiarvo	$out_n = in_{n-1} + in_{n+1} / 2$
FIR-filtteri	$out_n = 160*(in_{n-1} + in_{n+1}) - 48*(in_{n-3} + in_{n+3})$ $+ 24*(in_{n-5} + in_{n+5}) - 12*(in_{n-7} + in_{n+7})$ $+ 6*(in_{n-9} + in_{n+9}) - 2*(in_{n-11} + in_{n+11})$

Juovien interpoloinnissa saavutetaan hyvä lopputulos etsimällä kuvasta selviä vinosuuntaisia linjoja ja interpoloimalla nuo osat pystysuunnan sijaan vinon linjan mukaisesti. Tällä tavoin saadaan porrastuneiden reunojen määrää vähennettyä merkittävästi.

5.3 Videomoodi: Interfield-prosessointi

Interfield-prosessoinnissa lomituksen poisto tehdään yhdistämällä kaksi peräkkäistä kuvakenttää toisiinsa. Interfield-prosessointi tunnetaan paremmin termillä "weaving". [3.; 4.]

Televisiosta vastaanottamamme kuvasignaali on aina lomiteltua. Kahden kuvakentän välillä ehtii siis kulua 20 (PAL) tai 17 (NTSC) millisekunnin verran aikaa. Tämä aiheuttaa weaving-menetelmää käytettäessä perustavanlaatuisen ongelman. Mikäli kaksi eri aikaan kuvattua kenttää yhdistetään, kaikki otosten välillä liikkuneiden kuvakohteiden reunat eivät olekaan täsmälleen samoissa kohdin yhdistetyssä kuvakehyksessä. Kuvassa tämä näkyy siten, että liikkuneiden kohteiden reunat muuttuvat sahalaitaisiksi. Käytännössä weaving-menetelmällä kuvan pystysuuntainen erottelukyky säilyy ainoastaan liikkumattomien kohteiden alueilla. [3.; 4.]

Useimmissa nykytelevisioissa lomituksen poistossa käytetään liiketunnistukseen perustuvaa tekniikkaa. Kun kuvassa on paljon liikettä, laite poistaa lomituksen bobbing-algoritmilla. Kun kuvassa on vähän liikettä, lomitusta poistetaan weaving-algoritmilla. Idealisessa tapauksessa verrataan aina joka tois-

ta kuvakenttää toisiinsa, jolloin verrattaisiin joko parillisista tai parittomista muodostuvia kuvakenttiä toisiinsa. Tällöin kehyspuskurissa olisi aina kaksi edellistä kuvakenttää, joihin liiketunnistukseen perustuva vertailu tehtäisiin. [3.; 4.]

Liiketunnistukseen perustuva lomituksenpoistotapa on helppo havaita katsomalla uutislähetystä, jossa kuvan alareunassa juoksee liikkuvia otsikoita. Kun tekstien takana näytetään samaan aikaan lähes liikkumatonta uutisankuria, televisio siirtyy poistamaan lomituksen weaving-menetelmällä, jolloin tekstit näyttävät sahalaitaisilta (kuva 18). Kun televisiokuva siirtyy uutisstudiodista näyttämään liikkuvampaa kuvaa, televisio siirtyy poistamaan lomituksen bobbing-menetelmällä. Tällöin kuvan pystyerottelu heikkenee, mutta tekstit eivät näytä enää niin rosoisilta. [18.]



Kuva 18. Esimerkki liiketunnistukseen perustuvasta lomituksenpoistosta

5.3.1 *Liikeadaptiivinen lomituksen poisto*

Liikeadaptiivinen lomituksen poisto yhdistää bobbing- ja weaving-menetelmät. Lomituksenpoistomenetelmä valitaan paikallisesti kuvan eri osa-alueille, jolloin kuvassa paikallaan pysyville kohteille käytetään weaving-menetelmää ja liikkuville kohteille käytetään bobbing-menetelmää. Koska kahden eri menetelmän välinen raja-alue näkyisi kuvassa, käytetään näissä osissa kuvaa kahden eri menetelmästä yhdistettyä siirtymä-algoritmia. Mikäli kuvassa siirrytään paikallaan pysyvältä osasta liikkuvampaan osaan, painottaa algoritmi intrafield prosessoitua arvoa. Vastaavasti jos kuvassa siirrytään liikkuvasta osasta paikallaan pysyvään osaan, painottaa algoritmi interfield-prosessoitua arvoa. Liikeadaptiivista menetelmää pidetään hyvänä menetelmänä poistaa kuvasta lomitus. [3.]

Edellä mainittua menetelmää parempi lopputulos saavutetaan, jos lomituksenpoistotapa valitaan liikkeen mukaan jokaiselle kuvapisteelle erikseen. Pikselikohtainen analyysi vaatii skaalainpiiriltä erittäin paljon laskentatehoa ja on siksi kallis toteuttaa. [3.]

5.3.2 *Liikekompensoitu lomituksen poisto*

Liikekompensoitu lomituksen poisto on vielä huomattavasti liikeadaptiivista menetelmääkin monimutkaisempi lomituksenpoistomenetelmä. Se perustuu liikevektoreiden ohjaamaan lomituksen poistoon. Tyydyn tässä kappaleessa toteamaan vain, että menetelmä on olemassa ja se tehdään aina ammattilaisten toimesta. Liikekompensoitu lomituksen poisto tehdään useimmiten ammattilaistason formaattimuuntajassa. [3.]

5.4 **Filmimoodi**

Lomitus voidaan poistaa myös tavalla, jolla alkuperäinen kuvakehys saadaan palautettua alkuperäisekseen lomituksen jälkeenkin. Digi-tv:ssä ja dvd-levyillä käytössä oleva MPEG-2-kuvanpakkaus mahdollistaa kenttäkohtaisten lippujen käytön. Lippujen tarkoituksena on kertoa lomituksenpoistopiirille, onko kyseessä alun perin filmille kuvattua progressiivista materiaalia vai lomiteltua videomateriaalia. Pelkkiin lippuihin luottamalla lomituksen poistossa ei onnistuta kovinkaan hyvin, koska liput enkoodataan valitettavan usein väärin! Sen lisäksi keho editointi voi sotkea kuvakenttien järjestyksen. [18.]

Lomituksen poisto filmimoodissa onnistuu myös, mikäli lomituksenpoistopiiri tunnistaa, että materiaalissa käytetään 2-3 pulldownia (ks. kpl 4.5.1). Toisin sanoen lomituksenpoistopiiri tunnistaa kuvakenttien toistuvan videokuvassa 2-3 pulldownin mukaisessa järjestyksessä, missä kaksi ensimmäistä puolikuvaa ovat samasta kuvakehyksestä ja kolme seuraavaa toisesta jne. Tällöin kaksi peräkkäistä kuvakenttää yhdistetään weaving-menetelmällä ja kolmas ylimääräinen kuvakenttä pudotetaan yksinkertaisesti pois. Tämä menetelmä tunnetaan paremmin termillä inverse telecine. [3.]

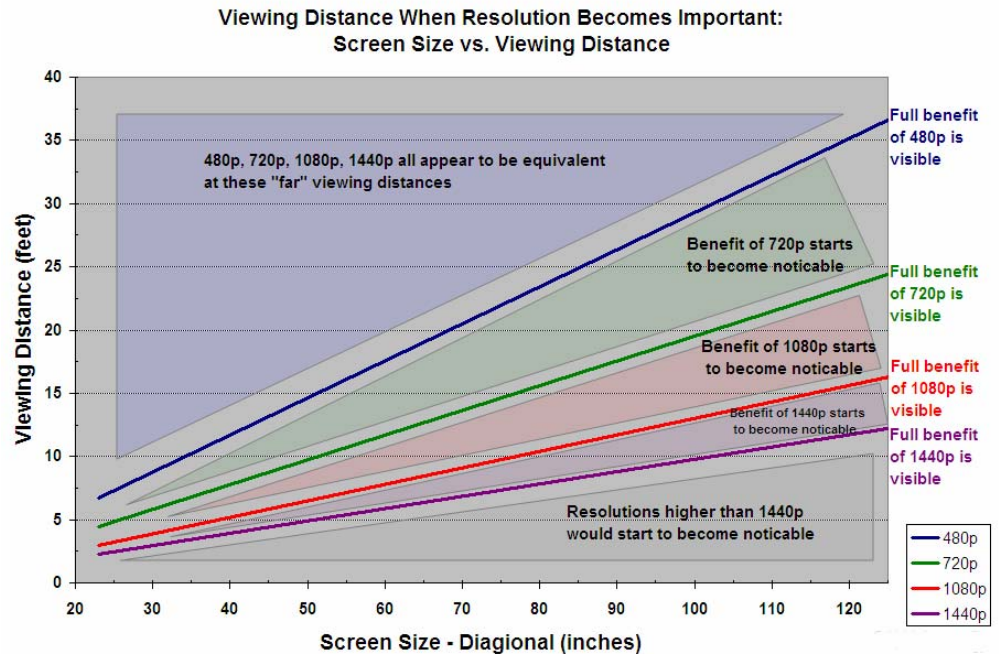
Kolmas tapa on yrittää tutkia lomitettua kuvaa kehyspuskurissa, jolloin kehyspuskurissa yhdistetään weaving-menetelmällä peräkkäiset kuvakentät ja tutkitaan löydetäänkö syntyneestä kuvakehyksestä sahalaitaisia reunoja. Mikäli näitä ei löydy, esitetään yhdistetty kuvakehys sellaisenaan. Löydetäessä sahalaitoja siirrytään lomituksen poistossa videomoodin mukaisiin menetelmiin. [3.; 18.]

6 YHTEENVETO

Kun Suomessa keskityttiin digitaalisen television siirtymään, ehti markkinoilla syntyä sillä aikaa jo televisiotekniikan seuraava kehitysvaihe, teräväpiirtotelevisio. Uusien näyttölaitteiden pystyessä huomattavasti digitv:tä tai dvd-levyä tarkempaan kuvanlaatuun, syntyy kysyntää myös teräväpiirtoiselle sisällölle. Koska teräviirtokanava vie huomattavasti enemmän kallista lähetyskaistaa kuin tavallinen digikanava, on epätodennäköistä, että maanpäällisessä lähetysverkossa tultaisiin näkemään lähivuosina maksuttomia teräväpiirtokanavia. Satelliitti- ja ip-verkon tarjoama lähetyskapasiteetti antaa palveluntarjoajille otollisen tilaisuuden tarjota teräväpiirtoista materiaalia ja samalla kasvattaa tilaajakantaansa. Tällä hetkellä maksulliset kanavapaketit elävät muutenkin vahvaa kasvukautta ja mikäli teräväpiirto siirtyy yksinomaan maksulliseksi palveluksi, jatkuu tämä kehitystrendi vielä vuosia.

Teräväpiirtotelevisiota tullaan tarjoamaan tulevaisuudessa uudella H.264-pakkauskoodekillä. Tämä mahdollistaa useampien teräväpiirtokanavien välittämisen samassa kanavanipussa. Uusi MPEG-2:sta tehokkaampi videon pakkauskoodekki mahdollistaa myös sen, että tulevaisuudessa yhä suurempi osa teräväpiirtoisesta materiaalista tullaan näkemään 1080p-resoluutiolla.

Voidaan sanoa, että televisiotekniikan tulevaisuus näyttää vähintäänkin mielenkiintoiselta. Kehitystyön olla on mm. 2K-, 4K- ja 8K- (UHDV) tekniikoita, joilla näyttölaitteen resoluutiota pyritään yhä entisestään kasvattamaan. Tosin näyttölaitteiden saavutettua 1080p-resoluution on kuvan tarkkuudessa saavutettu tietynlainen merkkipaalu. Näyttölaitteen resoluution kasvattaminen 1080p-tarkkuudesta ei tuo enää merkittävää parannusta kuvanlaatuun sillä ihmisen näköaisti on jo pitkälti saturoitunut tästä tarkkuudesta. Kuvassa 19 on esitetty miten kuvan tarkkuus, kuvakoko ja katseluetäisyys vaikuttavat havaittuun tarkkuuteen.



Kuva 19. Kuvakoon ja katseluetaisyyden vaikutus kuvasta havaittavaan tarkkuuteen [21.]

Kuvasta 19 voidaan havaita, että katsoessamme normaalilta katseluetaisyydeltä tyypillisen kokoisesta näyttölaitteesta liikkuvaa kuvaa, ei ylimääräisestä tarkkuudesta ole juurikaan etua. Ihmisen näköaisti ei tuota ylimääräistä tarkkuutta kykene erottamaan. Tällöin loogisena jatkumona on kehittää videokuvan syvyysvaikutelmaa. Esimerkiksi DVB-standardiin on jo kuvattu tekniikka, jolla syvyystieto saadaan välitettyä lähetyksessä. Tekniikoita, joilla videokuvaan saataisiin lisättyä kolmas ulottuvuus, kehitetään jatkuvasti. Vaikka ensimmäisiä kolmiulotteisia näyttöjä on markkinoille ehditty jo valmistaakin, on kolmiulotteisuus ja holograafiset näytöt vasta aika kaukaista tulevaisuuskuvaa. Elokuvateattereissa ja tietokoneiden näytöillä päästään kolmiulotteisuudesta todennäköisesti nauttimaan jo hieman aikaisemmin.

Nykyisten kehitystrendien perusteella näyttölaitteiden värinvalintaan, kehystaajuuden kasvattamiseen sekä virrankulutukseen tullaan keskittämään yhä enemmän tuotekehityspanoksia. Näyttölaitteiden keskimääräinen koko tulee entisestään jatkamaan kasvuaan samoin kuin niissä käytettävät kehystaajuudet. Näyttölaitteiden kehystaajuuksissa tullaan siirtymään 100 Hz ja 120 Hz tekniikoihin. Kyseisiin kehystaajuuksiin on käytännöllistä siirtyä, koska ne ovat 24 Hz ja 25 Hz kehystaajuuksien moninkertoja. Kehystaajuuden kasvattamisella saadaan kuvasta entistä levollisempi ja samalla saadaan vähennettyä pulldownista aiheutuvaa nykimistä. Lomituksenpoisto- ja skaalainpiiri-

en halventuessa yhä useampaan videolaitteeseen pystytään integroimaan hyvälaatuinen kuvaprosessori.

Näyttölaitteissa käytettävän väriavaruuden kasvattamisen lisäksi paneelien pitkän aikavälin värinointoon tullaan kiinnittämään huomiota. Ajan myötä tummuvien LCD- ja plasmapaneelien värinointoa saadaan parannettua integroimalla televisioon kalibrintiteknikkaa. Esimerkiksi näyttölaite voisi automaattisesti piirtää jokaisen 150 käyttötunnin jälkeen ruudulle harmaapalkiston, josta näyttölaitteen runkoon integroitu kamera ottaisi kuvia kalibrintia varten. Harmaapalkistosta otettujen kuvien perusteella näyttölaite pystyisi kalibroimaan kuvansa optimaaliseksi ja kompensoimaan tummumista. Myös ympäröivien valaistusolosuhteiden mukaan säätyvät näyttölaitteet kehittyvät. Nykyisten laitteiden pystyessä tunnistamaan valon intensiteetin ja säätämään kuvaa valaistusolosuhteiden mukaan, saadaan näyttölaitteen säätöparametreihin mukaan myös vallitsevan valon värilämpötila.

Videokuva käy läpi valtavan määrän erilaista prosessointia, ennen kuin sitä päästään varsinaisesti katsomaan näyttölaitteesta. Osa tuosta prosessoinnista tehdään tuotanto- tai lähetysvaiheessa ja osa näyttölaitteessa itsessään. Tuotantovaiheessa tehtävän kuvan prosessoinnin tekevät alan ammattilaiset huipputason laitteilla. Tällöin kuvan prosessoimiseen voidaan käyttää myös riittävästi aikaa, jolloin lopputuloksesta saadaan paras mahdollinen. Lähetysvaiheessa kuvan prosessointi on myös ammattilaisten vastuulla ja käytössä ovat tehokkaat laitteet. Kuvan prosessointi tulee kuitenkin usein tehdä reaaliajassa. Reaaliaikainen prosessointi rajoittaa tehokkaita kuvankäsittelylaitteita tarjoamasta parasta mahdollista kuvanlaatua. Katsojien omissa näyttölaitteissa tehtävä prosessointi riippuu pitkälti, miten kalliilla laitteilla prosessointi tehdään laadun vaihdellessa huonosta erittäin hyvään.

VIITELUETTELO

- [1] Robin, Michael & Poulin, Michel, *Digital Television Fundamentals: Design and Installation of Video and Audio Systems*. 2. painos. McGraw-Hill Professional. 2000.
- [2] Bjålie, Jan G. & Haug, Egil & Sand, Olav & Sjaastad, Øystein V. & Toverud, Kari C. , *Ihminen Fysiologia ja anatomia*. WSOY. 1999.
- [3] Jack, Keith, *Video Demystified A Handbook for the Digital Engineer*. 4. painos. Newnes. 2005.
- [4] Poynton, Charles, *Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces*. Morgan Kaufmann Publishers. 2003.
- [5] Watkinson J., *The MPEG Handbook MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4*. 2. painos. Focal Press. 2004.
- [6] Society of Motion Pictures and Television Engineers, *SMPTE Standards, Recommended Practices and Engineering Guidelines CD-ROM*. Society of Motion Pictures and Television Engineers. October 2006.
- [7] HTV lehdistöiedote [verkkodokumentti]. 15.6.2004 [viitattu 11.10.2006]. Saatavissa: <http://www.welho.fi/?f=252&ex=y&d=23691>.
- [8] Digitoday [verkkodokumentti]. 1.9.2005 [viitattu 11.10.2006]. Saatavissa: http://www.digitoday.fi/page.php?page_id=66&news_id=200514786.
- [9] Proessori [verkkodokumentti]. 31.10.2007 [viitattu 5.11.2007]. Saatavissa: <http://www.proessori.fi/uutiset/uutinen2.asp?id=51089>.
- [10] Tietokone [verkkodokumentti]. 2.11.2006 [viitattu 16.4.2007]. Saatavissa: http://www.tietokone.fi/uutta/uutinen.asp?news_id=28620&tyyppi=1.

- [11] Tietokone [verkkodokumentti]. 1.11.2007 [viitattu 5.11.2007]. Saatavissa: http://www.tietokone.fi/uutta/uutinen.asp?news_id=31821&tyyppi=1.
- [12] Proessori [verkkodokumentti]. 12.9.2007 [viitattu 5.11.2007]. Saatavissa: <http://www.proessori.fi/uutiset/uutinen2.asp?id=50835>.
- [13] AVSForum [verkkodokumentti]. 11.1.2005 [viitattu 25.11.2006]. Saatavissa: <http://www.avsforum.com/avs-vb/showthread.php?t=494606>.
- [14] Hometheaterhifi [verkkodokumentti] 1.1.2003 [viitattu 13.11.2006]. Saatavissa: http://www.hometheaterhifi.com/volume_8_2/dvd-benchmark-special-report-chroma-bug-4-2001.html.
- [15] Hometheaterhifi [verkkodokumentti] 11.3.2005 [viitattu 13.11.2006]. Saatavissa: http://www.hometheaterhifi.com/volume_7_4/dvd-benchmark-part-5-progressive-10-2000.html.
- [16] Wikipedia [verkkodokumentti] 19.10.2007 [viitattu 30.10.2007]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Telecine>.
- [17] Wikipedia [verkkodokumentti] 14.10.2007 [viitattu 30.10.2007]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Deinterlacing>.
- [18] Mikrobitti [verkkodokumentti] 1.1.2007 [viitattu 18.11.2007]. Saatavissa: <http://www.mbnet.fi/nettijatkot/2007/01/tvtekniikat/>.
- [19] EBU Technical Review [verkkodokumentti] 30.10.2006 [viitattu 18.11.2007]. Saatavissa: http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_308-hdtv.pdf.
- [20] ABCcables.com [verkkodokumentti] [viitattu 18.11.2007]. Saatavissa: <http://www.abccables.com/info-xvcc-and-deep-color.html>.
- [21] carltonbale.com [verkkodokumentti] [viitattu 18.11.2007]. Saatavissa: <http://www.carltonbale.com/2006/11/1080p-does-matter/>.

ATSC-, DVB- JA ISDB-LÄHETYSSTANDARDIEN VERTAILUTAULUKKO

	ATSC (Amerikka)	DVB (Eurooppa, Aasia)	ISDB (Japani)
videon pakkaus	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2
audion pakkaus	Dolby Digital	MPEG-2, Dolby Digital, DTS	Dolby Digital
multipleksointi	MPEG-2 Transport Stream	MPEG-2 Transport Stream	MPEG-2 Transport Stream
terrestriaaliverkon modulaatio	8-VSB	COFDM	BST-OFDM
terrestriaalikanavan kaistanleveys	6 MHz	6 MHz, 7 MHz tai 8 MHz	6 MHz, 7 MHz tai 8 MHz
kaapeliverkon modulaatio	16-VSB*	QAM	QAM
kaapelikanavan kaistanleveys	6 MHz	6 MHz, 7 MHz tai 8 MHz	6 MHz, 7 MHz tai 8 MHz
satelliittiverkon modulaatio	QPSK, 8PSK	QPSK	PSK

* useimmat ATSC-kaapelijärjestelmät käyttävät kuitenkin QAM-modulaatiota

Resoluutiot ja taajuudet

ISDB	Kehys- tai kenttätaajuus (p = progressiivinen i = lomiteltu)						
	23.976p 24p	50i	59.94i 60i	25p	29.97p 30p	50p	59.94p 60p
1280 x 720	X				X		X
1280 x 1080							
1440 x 1080							
1920 x 1080	X		X		X		X
ATSC	Kehys- tai kenttätaajuus (p = progressiivinen i = lomiteltu)						
	23.976p 24p	50i	59.94i 60i	25p	29.97p 30p	50p	59.94p 60p
1280 x 720	X				X		X
1280 x 1080	X		X		X		
1440 x 1080	X		X		X		
1920 x 1080	X		X		X		
DVB	Kehys- tai kenttätaajuus (p = progressiivinen i = lomiteltu)						
	23.976p 24p	50i	59.94i 60i	25p	29.97p 30p	50p	59.94p 60p
1280 x 720	X			X	X	X	X
1280 x 1080	X	X	X	X	X		
1440 x 1080	X	X	X	X	X		
1920 x 1080	X	X	X	X	X		

**TAULUKKO YLEISIMMIN KÄYTETYISTÄ RESOLUUTIOISTA, NIIDEN NÄYTTEENOT-
TOTAAJUUKSISTA SEKÄ NÄYTTEIDEN MÄÄRÄSTÄ JUOVAA KOHTI**

SDTV ITU-R BT.601-5 ja SMPTE 267M				
Resoluutio	720x480i	720x576i	960x480i	960x576i
Taajuus	29,97Hz	25Hz	29,97Hz	25Hz
Kuvasuhde	4:3	4:3	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)				
- Y' (luma)	13,5 (13,5)	13,5 (13,5)	18 (18)	18 (18)
- Cb, Cr (kroma)	6,75 (13,5)	6,75 (13,5)	9 (18)	9 (18)
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	858 (858)	864 (864)	1144 (1144)	1152 (1152)
- Cb, Cr (kroma)	429 (858)	432 (864)	572 (1144)	576 (1152)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	720 (720)	720 (720)	960 (960)	960 (960)
- Cb, Cr (kroma)	720 (720)	720 (720)	480 (960)	480 (960)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	480	576	480	576
EDTV ITU-R BT.1358 ja SMPTE 293M				
Resoluutio	720x480p	720x576p	960x480p	960x576p
Taajuus	59,94Hz	50Hz	59,94Hz	50Hz
Kuvasuhde	4:3	4:3	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)				
- Y' (luma)	27 (27)	27 (27)	36 (36)	36 (36)
- Cb, Cr (kroma)	13,5 (27)	13,5 (27)	18 (36)	18 (36)
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	858 (858)	864 (864)	1144 (1144)	1152 (1152)
- Cb, Cr (kroma)	429 (858)	432 (864)	572 (1144)	576 (1152)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	720 (720)	720 (720)	960 (960)	960 (960)
- Cb, Cr (kroma)	720 (720)	720 (720)	480 (960)	480 (960)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	480	576	480	576

TAULUKKO YLEISIMMIN KÄYTETYISTÄ RESOLUUTIOISTA, NIIDEN NÄYTTEENOTTOTATAAJUUKSISTA SEKÄ NÄYTTEIDEN MÄÄRÄSTÄ JUOVAA KOHTI

HDTV SMPTE 296M				
Resoluutio	1280x720p	1280x720p	1280x720p	1280x720p
Taajuus	23,976Hz	24Hz	25Hz	29,970Hz
Kuvasuhde	16:9	16:9	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)	74,25/1,001 (74,25/1,001)	74,25 (74,25)	74,25 (74,25)	74,25/1,001 (74,25/1,001)
- Y' (luma)	37,125/1,001 (74,25/1,001)	37,125 (74,25)	37,125 (74,25)	37,125/1,001 (74,25/1,001)
- Cb, Cr (kroma)				
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	4125 (4125)	4125 (4125)	3960 (3960)	3300 (3300)
- Cb, Cr (kroma)	2062,5(4125)	2062,5(4125)	1980 (3960)	1650 (3300)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	1280 (1280)	1280 (1280)	1280 (1280)	1280 (1280)
- Cb, Cr (kroma)	640 (1280)	640 (1280)	640 (1280)	640 (1280)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	720	720	720	720
HDTV SMPTE 296M				
Resoluutio	1280x720p	1280x720p	1280x720p	1280x720p
Taajuus	30Hz	50Hz	59,94Hz	60Hz
Kuvasuhde	16:9	16:9	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)	74,25 (74,25)	74,25 (74,25)	74,25/1,001 (74,25/1,001)	74,25 (74,25)
- Y' (luma)	37,125 (74,25)	37,125 (74,25)	37,125/1,001 (74,25/1,001)	37,125 (74,25)
- Cb, Cr (kroma)				
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	3300 (3300)	1980 (1980)	1650 (1650)	1650 (1650)
- Cb, Cr (kroma)	1650 (3300)	990 (1980)	825 (1650)	825 (1650)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	1280 (1280)	1280 (1280)	1280 (1280)	1280 (1280)
- Cb, Cr (kroma)	640 (1280)	640 (1280)	640 (1280)	640 (1280)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	720	720	720	720
HDTV ITU-R BT.709-5 SMPTE 274M				
Resoluutio	1920x1080i	1920x1080i	1920x1080i	
Taajuus	25Hz	29,97Hz	30Hz	
Kuvasuhde	16:9	16:9	16:9	
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	
Näytteenottotaajuus (MHz)	74,25 (74,25)	74,25/1,001 (74,25/1,001)	74,25 (74,25)	
- Y' (luma)	37,125 (74,25)	37,125/1,001 (74,25/1,001)	37,125 (74,25)	
- Cb, Cr (kroma)				
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	2640 (2640)	2200 (2200)	2200 (2200)	
- Cb, Cr (kroma)	1320 (2640)	1100 (2200)	1100 (2200)	
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	1920 (1920)	1920 (1920)	1920 (1920)	
- Cb, Cr (kroma)	960 (1920)	960 (1920)	960 (1920)	
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	1080	1080	1080	

TAULUKKO YLEISIMMIN KÄYTETYISTÄ RESOLUUTIOISTA, NIIDEN NÄYTTEENOTTOTATAAJUUKSISTA SEKÄ NÄYTTEIDEN MÄÄRÄSTÄ JUOVAA KOHTI

HDTV ITU-R BT.709-5 SMPTE 274M				
Resoluutio	1920x1080p	1920x1080p	1920x1080p	1920x1080p
Taajuus	23,976Hz	24Hz	25Hz	29,97Hz
Kuvasuhde	16:9	16:9	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)	74,25/1,001 (74,25/1,001)	74,25 (74,25)	74,25 (74,25)	74,25/1,001 (74,25/1,001)
- Y' (luma)	37,125/1,001	37,125	37,125	37,125/1,001
- Cb, Cr (kroma)	(74,25/1,001)	(74,25)	(74,25)	(74,25/1,001)
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	2750 (2750)	2750 (2750)	2640 (2640)	2200 (2200)
- Cb, Cr (kroma)	1375 (2750)	1375 (2750)	1320 (2640)	1100 (2200)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	1920 (1920)	1920 (1920)	1920 (1920)	1920 (1920)
- Cb, Cr (kroma)	960 (1920)	960 (1920)	960 (1920)	960 (1920)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	1080	1080	1080	1080
HDTV ITU-R BT.709-5 SMPTE 274M				
Resoluutio	1920x1080p	1920x1080p	1920x1080p	1920x1080p
Taajuus	30Hz	50Hz	59,94Hz	60Hz
Kuvasuhde	16:9	16:9	16:9	16:9
Koodaus- järjestelmä	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)	4:2:2 (4:4:4)
Näytteenottotaajuus (MHz)	74,25 (74,25)	148,5 (148,5)	148,5/1,001 (148,5/1,001)	148,5 (148,5)
- Y' (luma)	37,125	74,25	74,25/1,001	74,25
- Cb, Cr (kroma)	(74,25)	(148,5)	(148,5/1,001)	(148,5)
Näytteiden lkm. / juova				
- Y' (luma)	2200 (2200)	2640 (2640)	2200 (2200)	2200 (2200)
- Cb, Cr (kroma)	1100 (2200)	1320 (2640)	1100 (2200)	1100 (2200)
Näytteiden lkm. / digit. aktiivinen juova				
- Y' (luma)	1920 (1920)	1920 (1920)	1920 (1920)	1920 (1920)
- Cb, Cr (kroma)	960 (1920)	960 (1920)	960 (1920)	960 (1920)
Kuvassa esiintyvien aktiivisten juovien lkm.	1080	1080	1080	1080

ESIMERKKUVIA CHROMA UPSAMPLING ERRORIN ILMENEMISESTÄ

EI KROMABUGIA

KROMABUGI



ESIMERKKUVIA CHROMA UPSAMPLING ERRORIN ILMENEMISESTÄ

Oikein interpoloitu kroma Väärin interpoloitu kroma

Filteröimätön kuva
(6-portainen filttteri)



Filteröity kuva
(6-portainen filttteri)



EI KROMABUGIA



KROMABUGI



EI KROMABUGIA (ILMAN LUMAA)



KROMABUGI (ILMAN LUMAA)

