

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Romass PAULIKS

Doktora studiju programmas “Telekomunikāciju un datoru tīkli” doktorants

VIDEO PĀRRAIDES PAKALPOJUMU KVALITĀTES PĒTĪJUMI PAKEŠU TĪKLOS

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Profesors Dr. sc. ing.,
I. SLAIĐIŅŠ

Rīga 2016

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā ir pētīts, kā video attēla kvalitāti vērtē skatītājs, un kā šis vērtējums ir saistīts ar video signāla un pārraides kanāla tehniskajiem parametriem. Video ir secīga attēlu virkne, kurā attēlotas kustīgas un nekustīgas ainas (sižeti), savukārt video kvalitāte ir šīs attēlu secības kvalitātes novērtējums.

Darbs ietver literatūras analīzi par video straumēšanas tehnoloģijām, izmantojot IP protokolu. Pirmkārt, ir veikts pārskats par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu. Otrkārt, ir veikts pārskats par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā ir izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem. Treškārt, ir izveidota atbilstoša testgultne eksperimentu veikšanai, lai varētu emulēt dažādus video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus.

Kā neatņemama pētījumu sastāvdaļa ir darba ietvaros izstrādātā metodika, kura apraksta procedūru, kā veikt video kvalitātes novērtēšanu, t.sk. kā nodrošināt video straumēšanu un pakešu zuduma, trīces un aiztures emulācijas, kā nodrošināt vizuāli redzamus bojājumus (artefaktus), kā atlasīt un novērtēt testēšanā izmantotos video sižetus, kā atlasīt un pārbaudīt respondentus, kuri piedalīsies testos, kā izvēlēties piemērotas video kvalitātes novērtēšanas metodes, kā iegūtos testa rezultātus apstrādāt, kā tos novērtēt un analizēt, lai noskaidrotu un novērtētu video signālu kodēšanas un pārraides rezultātā radīto bojājumu ietekmi uz cilvēka video kvalitātes vērtējumu, kā arī, kādi testgultnes un aprīkojuma tehniskie parametri jānodrošina eksperimentālos testos. Darba ietvaros ir radīta video kvalitātes novērtēšanas testgultne un metodika, kā arī izstrādātas rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metodei, ar kuras palīdzību var iegūt kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu *MOS (Mean Opinion Score)*.

Darba rezultāti ir prezentēti un apspriesti 8 starptautiskās zinātniskās konferencēs un atspoguļoti 7 zinātniskās publikācijās, un daļa no darba praktiskajiem rezultātiem ir iekļauti mācību grāmatā.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, nobeigumu, literatūras sarakstu, 40 attēlus, 35 tabulas, 83 formulas un 20 pielikumus, kopā – 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir minēti 263 avoti.

ANNOTATION

The Doctoral Thesis investigates how the quality of the video picture is assessed by the viewer, and how this assessment is related to the technical parameters of the video signal and broadcasting channel. The video is a successive chain of pictures, which represents animated and fixed scenes (stories), while the video quality is the assessment of the quality of this picture sequence.

The Thesis includes the analysis of the literature on video streaming technologies using IP protocol. Firstly, there is carried out the review on operation principles, main elements and their parameters, which can influence the video quality assessment, of video signal transmission and compression technologies. Secondly, there is carried out the review on video quality assessment methods and as the result there are chosen methods corresponding to the research experimental tests. Thirdly, there is developed appropriate test bed for carrying out the experiments in order to emulate different technical parameters of video coding and broadcasting.

As an integral part of the research there is within the framework of the research worked out methodology which describes the procedure of how to carry out video quality assessment, including how to ensure video streaming and the emulations of package losses, tremors, and delays, how to ensure visible damage (artefacts), how to select and assess video scenes used in testing, how to select and check the respondents who are taking part in the tests, how to choose appropriate video quality assessment methods, how to process the obtained test results, how to assess and analyse them in order to find out and evaluate the influence of the damage created as the result of video coding and broadcasting on person's subjective quality assessment, as well as what technical parameters of the test bed and equipment should be provided for experimental tests. During the research there has been created the test bed for video quality evaluation and the methodology as well as elaborated recommendations for the video quality evaluation method which helps to acquire either the evaluation of the quality and acceptance *MOS (Mean Opinion Score)*.

The research results are presented and discussed in 8 international scientific conferences and reflected in 7 scientific publications, as well as part of the research practical results are included in the textbook.

The Doctoral Thesis is written in Latvian, and consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of literature; it includes 40 pictures, 35 tables, 83 formulas, and 20 appendixes, totally – 190 pages. The list of literature includes 263 titles.

SATURS

Anotācija	2
Annotation	3
Saturs	5
Attēlu saraksts	7
Tabulu saraksts	8
Termini un nosacītie apzīmējumi	9
Definīcijas, formulējumi un tulkojumi	17
Ievads	19
1. Video pārraides tehnoloģijas un kvalitātes nodrošināšana pakešu tīklos	33
1.1. Cilvēka vizuālās uztveres īpatnības	33
1.1.1. Redzes leņķis, izšķirtspēja un kustību uztvere	34
1.1.2. Gaismas uztvere	36
1.1.3. Krāsu uztvere	37
1.1.4. Optiskās ilūzijas, efekti un defekti	40
1.2. Video kompresijas tehnoloģijas	43
1.2.1. Video signālu ieguve, formēšana un kodēšana	43
1.2.2. Video plūsma, pakošana un konteineri	51
1.3. Video pārraides tehnoloģijas pakešu tīklos	53
1.4. Ciparu video pārraides tehnoloģijas	54
1.4.1. Video multipleksēšana un inkapsulācija	59
1.4.2. Video signālu pārvades interfeisi	63
1.4.3. Video signālu attēlošana un pārveidošana	67
1.5. Video pārraides datu plūsmas modeļi	69
1.6. Video pārraides parametru kvalitātes mērījumi	74
1.7. Kopsavilkums un secinājumi	80
2. Video kvalitātes novērtēšanas metodes	84
2.1. Novērtēšanas metodes, skalas un pielietojuma sfēras	84
2.1.1. Kvalitātes novērtēšanas metožu salīdzinājums	96
2.2. Objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodes	104
2.3. Objektīvās video kvalitātes novērtēšanas izmantojot SA un TA	111
2.4. Video kvalitātes prognozēšana pēc tehniskajiem parametriem	113
2.5. Kopsavilkums un secinājumi	126
3. Video kvalitātes novērtēšanas metodika	130
3.1. Testgultne un metodika	130
3.2. Testgultnes telpas sagatavošana	131

3.3.	Testgultnes aprīkojuma sagatavošana	132
3.4.	Monitora kalibrēšana.....	134
3.5.	Respondentu atlase eksperimentiem	137
3.5.1.	Cilvēka redzes testi – Ishihara, Snellen un Pelli-Robson.....	138
3.6.	Eksperimentos izmantotā video materiāla sagatavošana	142
3.6.1.	Objektīva video sižetu atlase un kvalitātes novērtēšana pēc SA un TA	144
3.6.2.	Objektīva video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc MSE un PSNR.....	145
3.7.	Video kvalitātes novērtēšana.....	145
3.8.	Kopsavilkums un secinājumi	146
4.	Video kvalitātes eksperimentālie pētījumi	150
4.1.	Video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu pielietojuma novērtēšana.....	150
4.2.	Sintētisko video sižetu kvalitātes vērtējums atkarībā no kompresijas parametriem un interfeisa	152
4.3.	Pakešu zuduma ietekmes uz video pārraides kvalitāti pētīšana	158
4.4.	Kopsavilkums un secinājumi	165
	Galvenie rezultāti un secinājumi	169
	Literatūras saraksts.....	179
	PIELIKUMI	190

ATTĒLU SARAKSTS

1-1. attēls. Redzes leņķis un asums	35
1-2. attēls. Optisko ilūziju paraugi	41
1-3. attēls. TV ekrānu proporcijas un izšķirtspēja.....	45
1-4. attēls. Izšķirtspēja 4:4:4, 4:2:2 un 4:2:0	48
1-5. attēls. Bloks, makrobloks, šķēle, kadrs un attēlu grupa GOP (I, P, B)	49
1-6. attēls. GOP kadru struktūras kustību vektori	50
1-7. attēls. Video plūsmas un pakešu veidošanas process.....	52
1-8. attēls. IP multiraides tīkla arhitektūra	58
1-9. attēls. Vispārināta IPTV tīkla arhitektūra	58
1-10. attēls. Multipleksēšana un pārraide	61
1-11. attēls. Inkapsulācija un straumēšana	62
1-12. attēls. Vispārināta TV un STB uzbūves blokshēma.....	68
1-13. attēls. Pakešu pārraides process ar aizturēm un trīci.....	78
2-1. attēls. ACR video fragmentu attēlošanas process	86
2-2. attēls. DCR video fragmentu attēlošanas process	87
2-3. attēls. SSMR video fragmentu attēlošanas process.....	88
2-4. attēls. PC video fragmentu attēlošanas process	88
2-5. attēls. SSCQE video fragmentu attēlošanas process.....	89
2-6. attēls. DSCQS video fragmentu attēlošanas process	90
2-7. attēls. Vērtējuma skala nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas testiem	92
2-8. attēls. Novērtēšanas metožu pielietojums (kodēšana vai pārraide)	98
2-9. attēls. Provizorisks rezultātu grafiks – divdimensionāls MOS	103
2-10. attēls. FR metode video kompresijas algoritmu kvalitātes mērījumiem.....	104
2-11. attēls. FR metode video pārraides kanāla kvalitātes mērījumiem.....	104
2-12. attēls. SA un TA vērtību ilustratīvs attēlojums	112
3-1. attēls. Video kodēšanas kvalitātes novērtēšanas blokshēma.....	133
3-2. attēls. Video pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas blokshēma	134
3-3. attēls. CCT aprēķina process.....	136
3-4. attēls. Ishihara testa kartiņu attēlu paraugi.....	138
3-5. attēls. Snellen Chart pārbaudes kartiņas attēla paraugs	140
3-6. attēls. Pelli-Robson pārbaudes kartiņas attēla paraugs	141
3-7. attēls. HRC video ieguve no SRC video fragmentiem	144
4-1. attēls. Viena ekrāna un divu ekrāna metožu izvēle.....	152
4-2. attēls. Vienekrāna MOS vērtības 720p, 1080i un 576p video signāliem.....	155
4-3. attēls. Divekrānu MOS vērtības 576p un 1080i video signāliem	157
4-4. attēls. MOS vērtības Puasona, Gausa un viennēmīgam sadalījumam.....	160
4-5. attēls. MOS vērtības 0.25% un 1% pakešu zudumam	161
4-6. attēls. I kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta.....	162
4-7. attēls. P kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta.....	163
4-8. attēls. PSNR atkarībā no video sižeta	164

TABULU SARAKSTS

1-1. tabula. Jēldatu (RAW) video signālu tehniskās specifikācijas	44
1-2. tabula. Datoru un TV ekrānu izmērs un proporcijas	46
1-3. tabula. YCbCr-RGB-YCbCr signālu konvertācija	46
1-4. tabula. Pilna diapazons YCbCr-RGB-YCbCr signālu konvertācija	47
1-5. tabula. YPbPr-RGB-YPbPr signālu konvertācija	47
1-6. tabula. Video konteineri un kodētāji	53
1-7. tabula. DVB apraides tehnoloģijas	55
1-8. tabula. IP straumēšanas un vadības protokoli	56
1-9. tabula. YUV-RGB-YUV krāsu telpu konvertācija	63
1-10. tabula. Video interfeisi (patērētāju un profesionālās klases)	64
1-11. tabula. Jēldatu SDI interfeisa specifikācijas	66
1-12. tabula. Pakešu zuduma eksperimenta nosacījumi	71
1-13. tabula. DVB tehnoloģiju pārraides vides parametru mērījumi	76
2-1. tabula. Vispārējās kvalitātes un ienesto bojājumu novērtējuma skalas (5 – balles)	91
2-2. tabula. Papildu kvalitātes novērtējuma skalas (9, 11 un 100 balles)	91
2-3. tabula. PC un SCACJ testu vērtējumu skala (7 balles)	93
2-4. tabula. Video signāla kvalitātes bojājumi	94
2-5. tabula. Video kvalitātes novērtēšanas metodes	95
2-6. tabula. MOS alternatīvas	97
2-7. tabula. Novērtēšanas metožu skalas	99
2-8. tabula. Novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas	100
2-9. tabula. Kvalitātes un akceptēšanas novērtējuma skalas	102
2-10. tabula. Objektīvie video kvalitātes novērtēšanas modeļi	110
2-11. tabula. Interneta telefonijas R – faktora vērtības	114
2-12. tabula. Provizorisks R, MOS, GoB un PoW konvertācijas tabula	116
3-1. tabula. Testēšanas telpas mikroklimats	132
3-2. tabula. Monitora parametri un kalibrēšana	133
3-3. tabula. RGB-CIE (xyz) korelācijas matricu aprēķins	136
3-4. tabula. Standarta video fragmentu raksturojums	142
4-1. tabula. Novērtēšanas skalu izvēle	151
4-2. tabula. Video interfeisu salīdzinājums (vienekrāns)	154
4-3. tabula. Video kodētāju salīdzinājums (divekrāns)	156
4-4. tabula. Sintētisko video sižetu SA un TA vērtības	157
4-5. tabula. MOS salīdzinot ar PSNR un I, P kadru bojājumu statistiku	161
4-6. tabula. MOS (0.25% un 1% pakešu zudumam) salīdzinot ar MSE un PSNR	164
4-7. tabula. Standarta video sižetu SA un TA vērtības	165

TERMINI UN NOSACĪTIE APZĪMĒJUMI

<i>1080p/i</i>	HD resolution i/p	HD jeb augsta izšķirtspēja 1920x1080
<i>16:9</i>	Aspect Ratio 16:9	Ekrāna proporcija; attēla samērs; attēla formāts 16:9
<i>2160p</i>	4K UHD TV resolution 3840x2160	4K UHD TV izšķirtspēja 3840x2160
<i>2D – 2D / 2DTV</i>	2 – dimensional TV	Divdimensiju TV
<i>3D – 3D / 3DTV</i>	3 – dimensional TV or Stereoscopic 3D TV	Trīsdimensiju (telpiska) TV vai stereoskopiska 3D TV
<i>4:3</i>	Aspect Ratio 4:3	Proporcijas; attēla samērs; attēla formāts 4:3
<i>4320p</i>	8K UHD TV resolution 7680x4320	8K UHD TV izšķirtspēja 7680x4320
<i>480p/i</i>	SD resolution 720x480	SD jeb standarta izšķirtspēja 720x480
<i>576p/i</i>	SD resolution 720x576	SD jeb standarta izšķirtspēja 720x576
<i>720p</i>	HD resolution 1280x720	HD jeb augsta izšķirtspēja 1280x720
<i>ACR</i>	Absolute Category Rating	Absolūtā novērtēšanas skala
<i>ACR – HR</i>	ACR Hidden Reference	Absolūtā novērtēšanas skala ar slēptu oriģināla signālu
<i>ATM</i>	Asynchronous Transfer Mode	Asinhronais pārsūtīšanas režīms; ATM režīms
<i>AVCHD</i>	Advanced Video Coding High Definition	Augstas izšķirtspējas uzlabots video kodētājs
<i>AVS</i>	Audio Video Standard	Audio video standarts
<i>ASI</i>	Asynchronous Serial Interface	Asinhrons virknes interfeiss
<i>AWB</i>	Automatic White Balance	Automātiska baltās krāsas balansa ieregulēšana
<i>AWGN</i>	Additive white Gaussian noise	Baltais Gausa troksnis
<i>BMA</i>	Block Matching Algorithm	Bloku atrašanas algoritms
<i>BNC</i>	Bayonet Neill–Concelman (coaxial cable connector)	BNC koaksiālā kabeļa spraudnis
<i>C/N</i>	Carrier to Noise Ratio	Nesēja un trokšņa attiecība
<i>CA</i>	Chromatic Aberration	Hromātiskā aberācija
<i>CABAC</i>	Context Adaptive Binary Arithmetic Coding	Konteksta adaptīva binārā aritmētiskā kodēšana
<i>CAVLC</i>	Context Adaptive Variable Length Coding	Konteksta adaptīva mainīga garuma kodēšana
<i>CBR</i>	Constant Bit Rate	Konstants bitu ātrums
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device	Lādiņaistes matrica; CCD matrica
<i>CCR</i>	Comparison Category Rating	Kategoriju salīdzinājuma novērtējums
<i>CCT</i>	Correlated Color Temperature	Krāsu korelācijas temperatūra

<i>CCVS / CVBS</i>	Composite Color Video and Sync or composite	Kompozītais krāsu video un sinhronizācija
<i>CIE</i>	International Commission on Illumination	Starptautiskā apgaismojuma komisija
<i>CIF</i>	Common Intermediate Format	Kopējais starpposma formāts, video formāts
<i>COFDM</i>	Coded Orthogonal frequency-division multiplexing	Kodēta ortogonālā frekvenčdales multipleksēšana
<i>CRT</i>	Cathode Ray Tube or CRT	Elektronstaru lampa; katodstaru lampa
<i>CPD</i>	Cycles per Degree	Ciklu skaits viena grāda ietvaros
<i>CWDM</i>	Coarse WDM	Rupja WDM
<i>DCI</i>	Digital Cinema Initiatives	Ciparu kino iniciatīvas grupa
<i>DCR</i>	Degradation Category Rating	Kategoriju degradācijas novērtējuma metode
<i>DCT</i>	Discrete Cosine Transform	Diskrētā kosinuss transformācija
<i>DF</i>	Delay Factor	Aiztures faktors
<i>Diff – MOS</i>	Difference / Differential MOS	Diferencālais MOS
<i>DMOS</i>	Degradate MOS	Degradācijas MOS
<i>DP</i>	Display Port	Displeja ports
<i>DPCM</i>	Differential Pulse Code Modulation	Diferencālā impulskoda modulācija
<i>DS</i>	Double Stimulus	Dubultstimula metodes
<i>DSCQS</i>	Double-Stimulus Continuous Quality Scale	Dubultstimula nepārtraukta kvalitātes novērtēšanas skala
<i>DSCS</i>	Double Stimulus Comparison Scale	Dubultstimula kvalitātes salīdzinājuma skala
<i>DSIS</i>	Double Stimulus Impairment Scale	Dubultstimula bojājumu salīdzinājuma skala
<i>DTS</i>	Decoding Time Stamps	Dekodēšanas laika momenta ziņojums
<i>DVB</i>	Digital Video Broadcasting	Ciparu videoapraide
<i>DVB – C/C2</i>	DVB Cable	DVB- kabeļu
<i>DVB – H</i>	DVB Handheld	DVB- plaukstdatora
<i>DVB – NGH</i>	DVB Terrestrial and satellite transmissions to handhelds	DVB- satelītu un plaukstdatoru
<i>DVB – S/S2</i>	DVB Satellite	DVB- satelītu
<i>DVB – SH</i>	DVB Satellite services to Handhelds	DVB- satelītu un plaukstdatoru
<i>DVB – T/T2</i>	DVB Terrestrial	DVB- zemes (virszemes)
<i>DVCPRO</i>	Digital Video Cassette PROfessional	Ciparu video kasešu ieraksta standarts
<i>DVI</i>	Digital Visual Interface	Interaktīvs ciparvideo interfeiss
<i>DVR</i>	Digital Video Recorder or PVR	Ciparu video rakstītājs
<i>DWDM</i>	Dense WDM	Blīva WDM
<i>EAV</i>	End of Active Video	Aktīvā video beigas, video apmale
<i>Eb/No</i>	Energy per bit / Noise power density dBm/Hz	Enerģija uz vienu bitu / Trokšņa jaudas blīvums dBm/Hz

<i>EBU</i>	European Broadcasting Union	Eiropas apraides savienība
<i>EPG</i>	Electronic Program Guide	Elektroniskais programmu gids
<i>ES</i>	Elementary Stream	Elementārā plūsma, video
<i>ETSI</i>	European Telecommunications Standards Institute	Eiropas telekomunikāciju standartu institūts
<i>EVM</i>	Error Vector Magnitude	Kļūdas vektora lielums
<i>FHDTV</i>	Full High Definition Television (Full HD TV), 1080p	Progresīvā augstas izšķirtspējas televīzija; (Full HD TV), 1080p
<i>FPS</i>	Frame Rate or Frames Per Second	Kadri sekundē; kadru nomaiņas ātrums
<i>FR</i>	Full Reference	Pilnas references (atsauces) signāls, oriģināls signāls
<i>GoB</i>	Good or Better	Laba vai labāka
<i>GOP</i>	Group of Pictures	Attēla elementu grupa
<i>H.264</i>	H.264/MPEG-4 AVC (Advanced Video Coding) P10	H.264/MPEG-4 AVC (Uzlabota video kodēšana) P10
<i>HbbTV</i>	Hybrid Broadcast Broadband TV	Hibrīda plaťjoslas apraides televīzija
<i>HDMI</i>	High Definition Multimedia Interface	Augstas izšķirtspējas multivides interfeiss
<i>HDS</i>	Adobe Flash HTTP Dynamic Streaming	Adobe Flash HTTP dinamiskās straumēšanas protokols
<i>HDTV</i>	High Definition Television	Augstas izšķirtspējas televīzija
<i>HE</i>	Head End	Video galvstacija
<i>HEVC</i>	High Efficiency Video Coding, H.265/MPEG-H P2	Augstas efektivitātes video kodēšana, H.265/MPEG-H P2
<i>HLS</i>	Apple HTTP Live Streaming	Apple HTTP tiešsaistes straumēšanas protokols
<i>HRC</i>	Hypothetical Reference Circuits	Hipotētiskais oriģināls (references) signāls/kanāls
<i>HTTP</i>	Hypertext Transfer Protocol	Hiperteksta pārsūtīšanas protokols
<i>HVS</i>	Human Visual System	Cilvēka vizuālās uztveres sistēma (modelis)
<i>HW</i>	Hardware	Aparatūra
<i>i</i>	Interlaced video or scanning	Rindpārleces video; skenēšana
<i>I – TV</i>	Internet TV	Interneta TV
<i>I/Q</i>	I/Q modulation	I/Q modulēšana
<i>ICMP</i>	Internet Control Message Protocol	Interneta vadības ziņojumu protokols
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts
<i>IETF</i>	Internet Engineering Task Force	Interneta tehniskā darba grupa
<i>IGMP</i>	Internet Group Management Protocol	Interneta grupu pārvaldības protokols
<i>IP</i>	Internet Protocol	Interneta protokols
<i>IPTV</i>	Internet Protocol TV	Interneta protokola TV
<i>ISMA</i>	Internet Streaming Media Alliance	Interneta multivides straumēšanas apvienība

<i>ISO/IEC</i>	International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission	Starptautiskā standartizācijas organizācija / Starptautiskā elektrotehnikas komisija
<i>ITS</i>	Institute for Telecommunication Sciences	Telekomunikāciju zinātņu institūts
<i>ITU</i>	International Telecommunication Union	Starptautiskā telekomunikāciju apvienība ITU
<i>ITU – R</i>	ITU Radiocommunication Sector	ITU radiosakaru komiteja
<i>ITU – T</i>	ITU Telecommunication Standardization Sector	ITU telekomunikāciju komiteja
<i>ITV</i>	Interactive TV	Interaktīva TV
<i>JND</i>	Just Noticeable Difference	Tikko pamanāma starpība
<i>JPEG</i>	Joint Photographic Experts Group	Apvienotā fotoekspertu grupa JPEG
<i>LAN</i>	Local Area Network	Lokālais tīkls LAN
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display	Šķidro kristālu displejs LCD
<i>LED</i>	Light Emitting Diode	Gaismas diode LED
<i>LRD</i>	Long Range Dependence	Ilglaicīga atkarība
<i>LTE</i>	Long Term Evolution	Ilgtermiņa evalūcija
<i>MBMS</i>	Multimedia Broadcast Multicast Services	Multivides apraides un multiraides pakalpojumi
<i>MBSFN</i>	Multicast Broadcast Single Frequency Network	Multiraides un apraides vienfrekvences tīkls
<i>MDI</i>	Media Delivery Index	Multivides datu piegādes indekss
<i>MER</i>	Modulation Error Ratio	Modulācijas kļūdu koeficients
<i>MHP</i>	Multimedia Home Platform	Multivides mājas platforma
<i>MJPEG</i>	Motion JPEG	Kustīgs JPEG
<i>MLD</i>	Multicast Listener Discovery	Multiraides uztvērēju atklāšana
<i>MLR</i>	Media Loss Rate	Multivides savienojuma zuduma koeficients
<i>MOS</i>	Mean Opinion Score	Vidējotais kvalitātes vērtējums (subjektīvais vērtējums)
<i>MOVIE</i>	MOtion-based Video Integrity Evaluation	Kustību pamatota video integritātes novērtēšana
<i>MPE</i>	Multiprotocol Encapsulation	Daudzu protokolu inkapsulācija
<i>MPEG</i>	Moving Pictures Expert Group	Kustīgu attēlu ekspertu grupa MPEG
<i>MPEG – 2</i>	H.262/MPEG-2	H.262/MPEG-2
<i>MPEG – 4</i>	H.264/MPEG-4 P2	H.264/MPEG-4 P2
<i>MPEG – PS</i>	H.222.0/MPEG-2 P1, MPEG-PS or PS	H.222.0/MPEG-2 P1, MPEG-PS vai PS
<i>MPEG – TS</i>	H.222.0/MPEG-2 Part 1, MPEG-TS, MTS or TS	H.222.0/MPEG-2 Part 1, MPEG-TS, MTS vai TS
<i>MSE</i>	Mean Squared Error	Vidējā kvadrātiskā kļūda
<i>MSUCQE</i>	MSU Continuous Quality Evaluation	MSU nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas metode

<i>MUSHRA</i>	Multiple Stimulus with Hidden Reference and Anchor	Novērtēšanas metode ar vairākiem stimuliem, ar slēptu oriģināla signālu un enkura signālu
<i>NR</i>	No Reference or Zero (ZR)	Bez atsauces signāla, oriģināls signāls nav pieejams
<i>NTIA</i>	National Telecommunications and Information Administration	Nacionālā telekomunikāciju un informācijas administrācija
<i>NTSC</i>	National Television System Committee	Nacionālā televīzijas standartu komiteja
<i>OS</i>	Operating System	Operētājsistēma
<i>OTN</i>	Optical Transport Network	Optiskais transporta tīkls
<i>OTT</i>	Over The Top television	OTT televīzija
<i>p</i>	Progressive video or scanning	Progresīvais video; skenēšana
<i>P2P</i>	Peer-to-Peer	Vienādranga tīkla
<i>PAL</i>	Phase Alternating Line	PAL standarts
<i>PC</i>	Pair Comparison	Pāru salīdzināšana
<i>PCM</i>	Pulse Code Modulation	Impulskoda modulācija; PCM
<i>PES</i>	Packetized Elementary Streams	Pakešu elementārplūsma
<i>PEVQ</i>	Perceptual Evaluation of Video Quality	Perceptuāla (uztveres) video kvalitātes novērtēšana
<i>PIM</i>	Protocol Independent Multicast	Protokolu neatkarīga multiraide
<i>PIM – SSM</i>	PIM- Source-Specific Multicast	PIM avota adreses orientēta multiraide
<i>PoW</i>	Poor or Worse	Slikta vai sliktāka
<i>PSNR</i>	Peak Signal to Noise Ratio	Maksimālā signāla un trokšņa attiecība
<i>PTS</i>	Presentation Time Stamps	Video attēlošanas laika norāde
<i>PVD</i>	Preferred Viewing Distance	Vēlamais skatīšanās attālums
<i>PVR</i>	Personal Video Recorder or DVR	Ciparu video rakstītājs
<i>PVS</i>	Processed Video Sequences	Apstrādāta video fragmentu secība
<i>QCIF</i>	Quarter Common Intermediate Format	Ceturtdaļa no kopējā starpposma formāta, video formāts
<i>QoE</i>	Quality of Experience	Uztveres (pieredzes) kvalitāte
<i>QoP</i>	Quality of Perception	Uztveres kvalitāte
<i>QoS</i>	Quality of Service	Pakalpojumu kvalitāte
<i>R&D</i>	Research and Development	Pētniecība un attīstība
<i>RCA</i>	RCA A/V signal connector	RCA audio un video signālu savienotājs
<i>RFC</i>	Request for Comments	Pieprasījums pēc komentāriem, RFC dokuments
<i>RGB</i>	Red, Green, Blue	RGB krāsu modelis; sarkanzaļzila krāsu modelis
<i>RLC</i>	Run-Lenght Coding	Nepārtrauktas virknes kodēšana
<i>RMS</i>	Root Mean Square	Vidējā kvadrātiskā novirze

<i>RR</i>	Reduced Reference	Ierobežotas references (atsauces) signāls, oriģināls signāls daļēji pieejams
<i>RTCP</i>	RTP Control Protocol	RTP vadības protokols
<i>RTD</i>	Round Trip Delay	Aprites laika aizture
<i>RTMP</i>	Adobe Flash Real Time Messaging Protocol	Adobe Flash reālā laika ziņojumu protokols
<i>RTP</i>	Real-time Transport Protocol	Reālā laika pārraides protokols
<i>RTSP</i>	Real Time Streaming Protocol	Reālā laika straumēšanas protokols
<i>RTT</i>	Round Trip Time	Aprites laiks
<i>S – Video</i>	Y/C interface and color space	Y/C video interfeiss un krāsu telpa
<i>S/N</i>	Signal to Noise Ratio	Signāla un trokšņa attiecība
<i>SA</i>	Spatial Activity or Index (SI)	Telpiskās aktivitātes indekss. Koeficients, kas raksturo attēla elementu daudzveidību viena kadra ietvaros
<i>SAD</i>	Sum of Absolute Differences	Absolūto vērtību atšķirību summa
<i>SAMVIQ</i>	Subjective Assessment of Multimedia Video Quality	Multivides subjektīvā kvalitātes novērtēšana
<i>SAMVIQ – HR</i>	SAMVIQ Hidden Reference	SAMVIQ ar slēptu oriģināla signālu
<i>SAV</i>	Start of Active Video	Aktīvā video sākums, video apmale
<i>SCACJ</i>	Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgment	Stimulu salīdzinājumu novērtēšana
<i>SCART</i>	Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorécepteurs et Téléviseurs	SCART video un audio interfeisa savienotājs
<i>SDI</i>	Serial Digital Interface	Virknes ciparu interfeiss
<i>SDH/SONET</i>	Synchronous Digital Hierarchy	Sinhronā ciparhierarhija; standarts SDH
<i>SDS</i>	Simultaneous Double Stimulus	Vienlaicīga dubltstimula metode
<i>SDSCE</i>	Simultaneous Double Stimulus for Continuous Evaluation	Vienlaicīga dubltstimula metode ar nepārtrauktu vērtēšanu
<i>SDTV</i>	Standard Definition Television	Standarta izšķirtspējas televīzija
<i>SECAM</i>	Séquentiel couleur à mémoire (Sequential Color with Memory)	SECAM standarts
<i>SFN</i>	Single Frequency Network	Vienfrekvences tīkls
<i>SLA</i>	Service Level Agreement	Līgums par pakalpojumu līmeni
<i>SMPTE</i>	Society of Motion Picture and Television Engineers	Kustīgu attēlu un televīzijas inženieru biedrība
<i>SRC</i>	Source Reference Channel vai Circuits	Oriģināla signāls vai kanāls
<i>SRD</i>	Short Range Dependent	Īslaicīga atkarība

<i>SS</i>	Single Stimulus	Vienstimula metodes
<i>SSCQE</i>	Single Stimulus Continuous Quality Evaluation	Vienstimula neaptrauktas kvalitātes novērtēšana
<i>SSD</i>	Sum of Squared Differences	Atšķirības kvadrāta summu
<i>SSIM</i>	Structural Similarity	Strukturālā līdzība
<i>SSMR</i>	Single Stimulus with Multiple Repetitions	Vienstimula kvalitātes novērtēšana ar vairākkārtēju atkārtosanos
<i>STB</i>	Set-top-Box	Televizora pierīce; TV dekodēris
<i>STC</i>	System Time Clock	Sistēmas iekšējais pulkstenis
<i>SW</i>	Software	Programmatūra
<i>TA</i>	Temporal Activity or Index (TI)	Telpa laika aktivitāte indekss. Koeficients, kas raksturo attēla mainīgumu laikā
<i>TCP</i>	Transport Control Protocol	Pārbaudes vadības protokols, protokols TCP
<i>TV</i>	Television	Televīzija
<i>UDP</i>	User Datagram Protocol	Lietotāja datogrammu protokols; protokols UDP
<i>UHDTV</i>	Ultra High Definition Television 4K and 8K UHDTV	Ultraaugstas izšķirtspējas televīzija 4K vai 8K UHDTV
<i>ULE</i>	Unidirectional Lightweight Encapsulation	Vienvirziena vienkāršota inkapsulācija
<i>UMTS</i>	Universal Mobile Telecommunications System	Universālā mobilo telesakaru sistēma
<i>VBR</i>	Variable Bit Rate	Mainīgs bitu ātrums
<i>VC – I</i>	SMPTE421M, Windows Media Video (VMW)	SMPTE421M, Windows Media Video (VMW)
<i>VCEG</i>	Video Coding Experts Group or Visual Coding Experts Group	Video kodēšanas ekspertu grupa vai vizuālās kodēšanas ekspertu grupa
<i>VGA</i>	Video Graphics Array	Videostandarts; videoadapteris; adapteris VGA
<i>VLC</i>	Variable Length Coding	Mainīga garuma kodēšana
<i>VMW</i>	Windows Media Video (VC-1, SMPTE421M)	Windows Media Video (VC-1, SMPTE421M)
<i>VoD</i>	Video on Demand	Pieprasījumu video
<i>VQA</i>	Video Quality Assessment	Video kvalitātes novērtēšana
<i>VQEG</i>	Video Quality Expert's Group	Video kvalitātes ekspertu grupa
<i>VQM</i>	Video Quality Metric	Video kvalitātes metrika
<i>W3C</i>	World Wide Web Consortium	Globālā tīmekļa konsorcijs
<i>WDM</i>	Wavelength Division Multiplexing	Viļņgarumdales multipleksēšana; blīvēšana
<i>Web</i>	World Wide Web or WWW	Tīmeklis; globālais tīmeklis
<i>Web – RTC</i>	Web Real-Time Communication	Tīmekļa reālā laika saziņas protokols
<i>WHATWG</i>	Web Hypertext Application Technology Working Group	Tīmekļa hiperteksta aplikāciju tehnoloģiju darba grupa

<i>WMSP</i>	Windows Media HTTP Streaming Protocol	Windows multivides HTTP straumešanas protokols
<i>WWW</i>	World Wide Web or Web	Tīmeklis; globālais tīmeklis
<i>YCbCr</i>	Digital Luma (Y), Chrominance (CbCr) interface	YCbCr ciparu video signāls
<i>YIQ</i>	Luma (Y), Chrominance (IQ) modulate	YIQ analogais kompozītais video signāls
<i>YPbPr</i>	Analog Luma (Y), Chrominance (PbPr) interface	YPbPr analogais komponentais video signāls
<i>YUV</i>	Luma (Y), Chrominance (UV)	YUV video signāls

DEFINĪCIJAS, FORMULĒJUMI UN TULKOJUMI

Artifacts – uz lietotāja ekrāna redzami attēla kropļojumi, kurus izraisa video signāla kompresija, displeju un video interfeisu tehniskās nepilnības, dažādas video signāla pārveides un konvertācijas, kā arī pārraides kanālā/traktā ienestie bojājumi (*Impairment*).

Bandwidth – joslas platums (parasti MHz). Kanāla frekvenču diapazons, kas vienas caurlaides joslas gadījumā ir starpība starp kanāla frekvenču augšējo un apakšējo robežu. Vairāku caurlaides joslu gadījumā tas sastāv no atsevišķo joslu platumu summas.

Best-effort – pēc labākās iespējas. Informācijas pārraides process datoru tīklos bez jebkādam tīkla datu plūsmas garantijām (*QoS*).

Broadcast – apraide, translācija. Vienu un to pašu datu pārraide visiem saņēmējiem (TV signālu apraide, translācija). Apraide nodrošina specifiska ziņojuma pārraidi visām datoru tīkla stacijām (*Ethernet* apraides ziņojumi).

Burst, packet data burst – uzplaiksnījums, sprādzienpārraide, paketes datu šalts. Pārraides tīkla darbības rezultātā noteiktos laika intervālos var rasties pakešu datu sprādzienpārraide, kas var izraisīt paketes datu šalts zudumus.

Delay – aizture, aizkave, kavējums. Pakešu pārsūtīšanas aiztures ir laika intervāls starp paketes nosūtīšanu un saņemšanu. Laika intervāls starp pieprasījuma nodošanu un tā izpildes sākumu, piemēram, *IGMP* paketes ziņojumi (*leave* un *join*) par TV programmas maiņu.

Emulation – emulācija, emulēšana. Speciālas programmatūras un aparatūras izmantošana, lai ar kādu datoru izpildītu programmas, kas izstrādātas citas sistēmas datoram, un, izmantojot tos pašus datus, iegūtu identiskus rezultātus. Tāda vienas datu apstrādes sistēmas imitēšana ar citu sistēmu, kur atdarinošā sistēma pieņem tos pašus datus, izpilda tās pašas programmas un iegūst tos pašus rezultātus kā atdarinātā sistēma. Piezīme: parasti emulē, izmantojot aparatūru vai aparātprogrammatūru. Dažādu protokolu piemērošana kādam noteiktam terminālim, lai nodrošinātu tā pievienošanu dažāda veida datu pārraides tīkliem.

Impairment – video signāla pārraides kanālā/traktā radušies bojājumi (pakešu zudums, aizture, trīce), kuri var radīt vizuāli redzamus attēla kropļojumus vai artefaktus (*Artifacts*).

Jitter – trīce. Maksimālā starpība starp dažādu pakešu pārsūtīšanas aizturēm. Ja aizture starp dažādām paketēm ir konstanta, tad trīce ir vienāda ar nulli.

Metrica – metrika. Metrika vai objektīvās kvalitātes novērtēšanas algoritmi, piemēram, *MSE* vai *PSNR*, kurus var izmantot cilvēka video kvalitātes prognozēšanai.

Modeling – modelēšana. Procesu, sistēmu vai to darbības aprakstīšana vai attēlošana ar matemātisku modeļu palīdzību.

Multicast – multiraide. Ziņojumu pārraides veids datoru tīklos, kad viens un tas pats ziņojums vienlaicīgi tiek nosūtīts vairākām, bet ne visām datoru tīkla stacijām, (TV programmu straumēšana atlasītai saņēmēju grupai, maršrutētāju dienesta informācijas izplatīšana).

Packet Loss – pakešu zudums. Parametrs, kas nosaka zaudēto pakešu attiecību procentos pret kopējo nosūtīto pakešu skaitu.

Simulation – simulācija, imitācija, modelēšana. Atsevišķu fiziskas vai abstraktas sistēmas izturēšanās raksturlielumu attēlošana ar datu apstrādes sistēmas palīdzību. Parādību un procesu pētīšanas metode, kurā pētāmo objektu aizstāj ar kādu citu sistēmu (modeli). Piemēram, pētāmo objektu aizstāj ar tā matemātisko aprakstu un imitāciju veic analītiski. Bieži izmanto dažādus imitēšanas veidus, kas balstās uz sistēmas darbības aprakstu ar datora programmu.

Self similar traffic – pašlīdzīga datu plūsma, piemēram, interneta, *LAN*, *WAN* un *VBR* video datu plūsmai ir pašlīdzīgs raksturs.

Streaming – straumēšana. Informācijas, parasti multivides audio vai/un video datņu pārraides process internetā, nodrošinot vienmērīgu informācijas plūsmu, kurai saņēmējs var piekļūt reāllaikā. Tā ir vienvirziena pārraide no servera klientam (skatītājam), kuri abi sadarbojas, lai pārraidāmā kustība netiktu pārtraukta. Klients nodrošina dažu sekunžu garu multivides audio vai/un video buferizāciju pirms to reprezentācijas skatītājam, lai tādējādi izvairītos no īslaicīgām aizkavēm.

Throughput – caurlaidspēja, caurlaide (parasti mērvienība – bit/s – jeb angļiski (*bits per second / bps*)). Par caurlaidspējas mēru parasti izmanto datu apstrādes ātrumu datoru sistēmā vai datu pārsūtīšanas ātrumu sakaru sistēmā. 1. Darba daudzuma mērs, ko veic dators dotajā laika periodā. 2. Bitu, rakstzīmju vai pakešu skaits, ko var pārsūtīt datu komunikācijas sistēma noteiktā laika vienībā, kad sistēma darbojas ar maksimālo slodzi.

Unicast – uniraide. Ziņojumu pārraides veids datoru tīklos, kas apzīmē datu apmaiņu starp vienu noteiktu nosūtītāju un vienu noteiktu saņēmēju.

Darbā izmantotie termini, to definīcijas un nosacītie apzīmējumi pamatā ir ņemti no Latvijas Zinātņu akadēmijas terminoloģijas komisijas akadēmisko terminu datubāze AkadTerm [1]. Citiem, līdz šim vēl nelatviskotiem terminiem autors darbā ir piedāvājis savu tulkojuma versiju.

IEVADS

21. novembris katru gadu tiek atzīmēta kā Vispasaules Televīzijas diena, kuru 1996. gadā iedibināja ANO Ģenerālā Asambleja. Nu jau vairāku gadu garumā ikgadējie *TNS Latvia* [2] statistikas dati apliecina, ka Latvijas iedzīvotāji gada laikā vidēji 4 – 5 stundas diennaktī skatās TV raidījumus visdažādākajos veidos, t.sk. sēžot, guļot, braucot automašīnā, skatoties monitorā, planšetdatorā vai mobilajā telefonā.

Mūsdienās pastāv ļoti daudz televīzijas, video un multivides satura pārraides tehnoloģiju, kuras darbā ir raksturotas, salīdzinātas un klasificētas, bet galvenie pētījumi ir veltīti reālā laika video pārraides tehnoloģijām, izmantojot IP protokolu. 21. gadsimtā ļoti strauji ir pieaudzis interneta lietotāju skaits, sevišķi mobilā interneta lietotāju skaits, un tas turpmākajos piecos gados pieaugs vēl straujāk [3]. Pieaugs arī internetā piedāvātā satura dažādība, kur pēdējā desmitgadē ļoti būtisku vietu ir ieņēmusi multivides datu plūsma. Multivides datu plūsma no kopējā interneta datu satura katru gadu aizņem arvien lielāku datu apjomu [3], t.sk. pašu lietotāju izvietotie attēli un video dažādos sociālajos tīklos (*draugiem.lv*, *odnoklasniki.ru*), video zvani (*skype*), video klipi (*youtube.com*, *vimeo.com*), īsfilmas, pilnmetrāžas video filmas un klasiskie TV pārraides kanāli. Pēdējos gados būtisku datu plūsmas apjoma pieaugumu internetā ir radījusi mākoņdatošana [4], t.i. datu uzglabāšanas un skaitļošanas tehnoloģijas, kuras nodrošina lietotāja datu, t.sk. multivides datu plūsmas izvietojumu interneta datu centros. Tirgus diktēta patērētāju vēlme izmantot augstākās kvalitātes video saturu būtiski pieaug, kā rezultātā ir jāņem vērā sakarības:

- jo augstāka video kvalitāte, jo augstāks lietotāja novērtējums;
- jo augstāka video kvalitāte, jo lielāks datu apjoms nepieciešams;
- jo lielāks datu apjoms, jo ātrdarbīgāki datu pārraides kanāli nepieciešami;
- jo augstāka video kvalitāte, jo augstākas veikspējas, datu uzglabāšanas, skaitļošanas un datu pārraides iekārtas nepieciešamas.

No iepriekš minētā var secināt, ka video kvalitātes paaugstināšana ir kā katalizators straujai televīzijas, video un multivides tehnoloģiju attīstībai. Savukārt straujā televīzijas, video un multivides tehnoloģiju attīstība sekmē citu tehnoloģiju attīstību, piemēram, pieprasījumu pēc ātrdarbīga interneta, augstākas veikspējas video un tīkla aprīkojuma, kā arī lielāka apjoma datu glabātuvēm.

Vēsturiski, kopš analogo melnbalto televīziju nomainīja krāsu TV, tehnoloģiju attīstība strauji ir gājusi attēla kvalitātes paaugstināšanas virzienā. Pārejot no analogās uz ciparu televīziju, radās nepieciešamība pēc pārraidāmās informācijas apjoma samazināšanas. To var

realizēt gan ar speciālām kompresijas metodēm (*lossless*), samazinot pārraidāmo datu apjomu bez zudumiem, nesamazinot attēla kvalitāti, gan izmantojot cilvēka redzes un uztveres īpatnības, tādējādi šīs kompresijas metodes (*lossy*) var dēvēt par attēla kvalitātes ierobežošanu ar zudumiem. Jaunu kompresijas tehnoloģiju radīšana aizsāka jaunu posmu ciparu televīzijas attēla kvalitātes paaugstināšanas virzienā. Jaunu kompresijas tehnoloģiju galvenais uzdevums ir paaugstināt vai nodrošināt nemainīgu attēla kvalitāti, samazinot kodēto datu apjomu, tādējādi radot iespēju vienas programmas vietā vienā kanālā (6, 7 vai 8 MHz) pārraidīt vairākas televīzijas programmas. Pēdējā desmitgadē ierasto kabeļu, zemes, mobilās un satelīta televīzijas tehnoloģiju saimi DVB (*Digital Video Broadcasting*) [5] ir papildinājusi interneta protokola televīzija IPTV (*Internet Protocol Television*) [6], kur televīzijas kanālu pārraidei izmanto pakešu komutācijas kanālus ar QoS (*Quality of Service*) [7] garantijām, parasti viena operatora tīkla ietvaros. Savukārt pēdējos gados arvien lielāku popularitāti iegūst OTT (*Over-the-top* vai *Over-the-Internet*) video [8] un interneta -TV (*Internet TV*), kuru var dēvēt par IPTV pēcteci, jo abos gadījumos tiek izmantots IP protokols. OTT un interneta - TV nav piesaistīts operatora tīklam un televīzijas kanālu pārraidei izmanto internetu bez QoS garantijām. IPTV, OTT un interneta - TV var nodrošināt interaktīvās televīzijas ITV (*Interactive Television*) pakalpojumus. Video pārraidei, izmantojot internetu vai pakešu komutācijas tīkla tehnoloģijas ar negarantētu (*best-effort*) datu plūsmas piegādes garantijām, ir jāņem vērā ar pakešu aizturēm (*delay*), trīci (*jitter*), uzliesmojumu (*burst*), kā arī tīkla mezglu buferu pārpildīti un pakešu zudumu (*packet loss*), kas var būtiski samazināt attēla kvalitāti. Kompresija attēlu kvalitāti ierobežo, bet pakešu zudumi, kuri rodas pārraides rezultātā, attēla kvalitāti samazina. Interneta - TV un OTT risinājumos var izmantot dažādus straumēšanas protokolus, pie populārākajiem var pieskaitīt tīmekļa protokola HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) orientētos straumēšanas protokolus, kuri nodrošina dinamisku video kvalitātes palielināšanu vai samazināšanu atkarībā no pieejamiem tīkla resursiem [9]. Pēdējā desmitgadē tehnoloģiju attīstība attēla kvalitātes paaugstināšanas virzienā ir bijusi viļņveidīga, kur jaunradītas kompresijas tehnoloģijas attēla kvalitāti var gan uzlabot, gan ierobežot, kur atsevišķi pārraides tehnoloģiju risinājumi attēla kvalitāti var arī pasliktināt. No iepriekš minētā var secināt, ka kompresija un pārraide būtiski ietekmē televīzijas kanālu video attēla kvalitāti.

Mūsdienās notiek lēna pāreja no tehnoloģiju centrēta QoS, piemēram, IntServ, DiffServ [10] un SLA (*Service Level Agreement*) [11] uz lietotāju centrētu QoE (*Quality of Experience*) kvalitātes novērtēšanu, [12], [13]. Šajā gadījumā tehnoloģiski centrēta [14] kvalitātes novērtēšana vai QoS ir jāsaprot kā objektīvi izmērāmi tīkla un pakalpojuma veiktspējas parametri [15], piemēram, aizture, trīce, pārraides ātrums, pakešu zudums, u.c. Savukārt

lietotāja centrētu kvalitātes novērtēšanu mēdz dēvēt par subjektīvo vai lietotāja uztveres kvalitāti [16], [17]. *QoE* ir lietotāja centrēts kvalitātes novērtēšanas kritērijs [18], kas ir radīts gan video attēla, bet arī multivides satura (video, audio, teksts), gan tīmekļa lietošanas kvalitātes novērtēšanai. Minētais arī ir uzskatāms par vienu no iemesliem, kāpēc līdz pat mūsdienām attiecībā uz dažāda multivides satura lietojumiem nav nostiprinājies viennozīmīgs definējums par *QoE*, toties starptautiska zinātnisko projektu darba grupa [19] ir veikusi daudz pētījumu par *QoE* [20].

QoE ietver gan subjektīvās, gan objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodes. Par subjektīvo *QoE* uzskata specializētus kvalitātes novērtēšanas eksperimentus, kuros piedalās cilvēki (respondenti). Par respondentiem izmanto tipiskus lietotājus (nespeciālistus) (*non-expert*) [21], kuriem nav specifisku zināšanu par video kvalitātes novērtēšanas procesu, t.sk. specifiskiem video kodēšanas un pārraides tehnoloģiju darbības principiem. Tikai specifiskos gadījumos tiek izmantoti ekspertu vērtējumi, piemēram, video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu sagatavošanai, video kodētāju izstrādes procesā, specifisku video kodēšanas parametru noskaņošanai, taču visos pārējos gadījumos tiek izmantoti tipisku lietotāju (nespeciālistu) video kvalitātes novērtēšanas testu rezultāti. Subjektīvās kvalitātes novērtēšanu parasti veic kontrolētos testgultnes apstākļos, atbilstoši standartizētām procedūrām [22] un [23], kas prasa ievērojamas investīcijas. Kā alternatīva kontrolētiem testgultnes apstākļiem ir reālie sadzīves apstākļi (mājās uz dīvāna, darbā pie galda, kafejnīcā, parkā, autobusā, u.tml.) [24] un [25], kur tehnisko parametru precīza fiksēšana nav iespējama un kvalitātes novērtēšanas eksperimentālos datus visbiežāk iegūst, izmantojot internetu (speciāli sagatavoti eksperimenti tīmeklī). Šo paņēmienu mēdz dēvēt par *crowdsourcing* [26], [27] un [28]. Par subjektīvās kvalitātes rādītāju vai raksturojošo parametru visbiežāk tiek izmantots MOS (*Mean Opinion Score*) [29], kuru var uzskatīt par *QoE de-facto* standartu, tomēr tas nav vienīgais statistikas parametrs [30]. *MOS* atspoguļo konkrētas kodēšanas vai pārraides sistēmas lietotāju vidējoto kvalitātes vērtējumu, piemēram, attēla kvalitātes vidējo vērtējumu [31]. Lai arī subjektīvais *QoE* novērtējums ir uzskatāms par vienīgo drošo paņēmienu, kā iegūt uzticamus rezultātus, tomēr tas ir ļoti laikietilpīgs, sarežģīts un dārgs process, kuru nepieciešams aizstāt ar datorizētu kvalitātes novērtēšanu, dēvētu par objektīvo *QoE* novērtēšanu vai prognozēšanu, kuru aprēķina no objektīviem parametru mērījumiem. Tāpēc vēl joprojām notiek intensīvs pētnieciskais darbs pie subjektīvo un objektīvo kvalitātes novērtēšanas metožu izstrādes un pilnveidošanas. Šajā promocijas darbā par subjektīvās *QoE* rādītāju ir izmantots *MOS*.

Praksē ir pieejami ļoti daudz un dažādi objektīvās kvalitātes novērtēšanas un prognozēšanas modeļi, bet vairumam no tiem nav nekādas saistības ar subjektīvo kvalitātes vai

MOS prognozēšanu. Tomēr atsevišķi no tiem ir izmantojami kā tīkla plānošanas rīki, piemēram, interneta telefonijas tīkla kvalitātes plānošana atbilstoši [32] vai video telefonijas pārraides plānošana atbilstoši [33]. Minētie *ITU-T* modeļi būtu izmantojami telekomunikāciju operatoru interneta un video telefonijas pakalpojuma kvalitātes novērtēšanai, kaut gan līdz šim šāds kvalitātes novērtējums nav ieviests praksē, jo veikt vairāk kā desmit dažādu parametru mērījumus, lai aprēķinātu iespējamo video pakalpojuma kvalitāti, ir ļoti sarežģīti un laikietilpīgi, varētu pat teikt, ka praksē to paveikt ir gandrīz neiespējami. *ITU-T* piedāvātie modeļi ir jāvienkāršo, būtiski jāsamazina parametru un to mērījumu skaits. Piemēram, [33] neskaidri un vispārināti ir definētas dažādu video parametru un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības, jo visu video parametru robežvērtības vēl nav izpētītas un aprobētas. Rezultātā var secināt, ka [33] modelis nav pilnvērtīgi izmantojams multimediju kvalitātes novērtēšanā, tam ir jānodrošina striktas parametru robežvērtības, kuras ir saistītas ar *MOS*. Minētais arī motivēja veikt pētījumus ar mērķi atrast kodēšanas un pārraides ietekmes parametru robežvērtības. Autors ir pārliecināts, ka televīzijas un video pārraides kvalitātes novērtēšanai, vajadzētu pietikt ar diviem parametriem: pakešu zudums un video sižeta saturs (sintētiski un dabiski video, *SA* un *TA* vērtības), kur katram no tiem ir jādefinē skaidri saprotami koeficienti ar eksperimentāli aprobētām robežvērtībām.

Svarīgākais un sarežģītākais ir pakalpojuma lietotāju kvalitātes novērtēšanas rezultātu sasaiste ar objektīvi izmērāmiem kodēšanas (kodēšanas bloki, izplūduši attēla bloki) un pārraides (pakešu aizture, trīce un zudums) parametriem, kuri varētu tikt izmantoti, izstrādājot un pilnveidojot objektīvās *QoE* metodes (algoritmi vai metrikas). Tas arī ir šajā promocijas darbā veikto pētījumu galvenais uzdevums.

Objektīvās kvalitātes metriku galvenais uzdevums ir automatizēti un ar augstu precizitāti prognozēt, kā cilvēks ar vizuālo uztveri vērtēs attēla kvalitāti, kuru mēdz dēvēt par cilvēka vizuālās uztveres modeli vai *HVS* (*Human Visual System*). Lai iegūtu datus par cilvēka vizuālo uztveri, ir jāveic vesela virkne skrupulozi pārdomātu kvalitātes novērtēšanas eksperimentu, kuru rezultātā ir iespējams aprēķināt *MOS*. Lai ar objektīvās kvalitātes metriku palīdzību varētu modelēt cilvēka vizuālo uztveri, tad objektīvi izmērāmiem kvalitātes parametriem ir jānodrošina pēc iespējas ciešāka korelācija ar *MOS*. Pie objektīvi izmērāmiem kvalitātes parametriem var pieskaitīt jebkuru tehnisku lielumu, kas attiecas uz *QoS*, piemēram, datu pārraides ātrums, aizture, trīce un pakešu zudums.

Neskatoties uz to, ka objektīvās kvalitātes metrikām ir daudz priekšrocību, tomēr nedaudzie trūkumi var izrādīties ļoti būtiski, jo objektīvās kvalitātes novērtēšanas metrikas (*QoE* metrikas) ņem vērā tikai ierobežotu skaitu cilvēka vizuālās uztveres īpatnību, tādējādi var

iegūt neprecīzus rezultātus. Vēl lielāks risks iegūt neprecīzus un nesaprotamus rezultātus ir, testējot metriku darbību neierastos apstākļos [34]. Tāpēc *QoE* metrikas ir jāizstrādā skaidri definētam pielietojumam, piemēram, nekustīgu attēlu kvalitātes novērtēšanai, tad tās precizitāte ir jāpārbauda un jānovērtē ar dažādiem kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem. No tā var secināt, ka pētnieciskais darbs pie cilvēka uztveres īpatnību sasaistes ar objektīviem parametriem turpināsies līdz tam brīdim, kad ar *QoE* metriku aprēķiniem un reāliem kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem varēs iegūt gandrīz identiskus rezultātus.

Video kvalitātes mērījumus un novērtēšanu var veikt vairākos līmeņos, atbilstoši *ISO/OSI* modelim to var veikt – bitu līmenī (*SNR* un *BER*), pakešu līmenī (pakešu zudums, trīce un aiztures) vai attēla elementu līmenī (*MPEG I, P* un *B*). Minētajos gadījumos tiek novērtēts konkrēts video pārraides vai kodēšanas sistēmas posms, piemēram, no galvstacijas (*HE*) līdz dekoderim (*STB*), vai arī no dekodera (*STB*) līdz ekrānam (*TV*). Savukārt, lai varētu novērtēt pēdējo video signāla posmu no ekrāna līdz skatītājam ir jāizmanto specializēti video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti. Tāpēc darbā ir veikti pārdomāti eksperimenti ar mērķi novērtēt dažādu video pārraižu pakalpojuma kvalitātes atkarību no pārraides kanāla un signāla tehniskajiem parametriem.

Darba galvenie pētījumi ir veltīti video pārraidei, izmantojot *IP* protokolu, bet *DVB* apraides darbības principi ir apskatīti tikai tik lielā mērā, cik tiem ir kopīgas iezīmes ar video straumēšanu, izmantojot *IP* protokolu.

Darba mērķis un uzdevumi

Pamatojoties uz iepriekš izklāstīto, šī **darba mērķis** ir noteikt video pārraides pakalpojuma kvalitātes atkarību no pārraides kanāla un signāla tehniskajiem parametriem.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, ir nepieciešams veikt **pamatuzdevumus**:

1. Veikt literatūras pārskatu par cilvēka vizuālās uztveres galvenajiem elementiem:
 - 1.1. Noskaidrot svarīgākos cilvēka vizuālās uztveres parametrus, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu.
2. Veikt literatūras pārskatu par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu:

- 2.1. Noskaidrot svarīgākos video signāla pārraides un kompresijas parametrus, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;
- 2.2. Izveidot testgultni video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai;
- 2.3. Izstrādāt vadlīnijas kvalitātes novērtējumu (*MOS*) iegūšanai un pilnveidot metodiku video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai, ar kuras palīdzību var modelēt video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus;
- 2.4. Veikt respondentu redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) pārbaudes.
3. Veikt analīzi par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlēties atbilstošas metodes eksperimentiem:
 - 3.1.1. Noskaidrot, kura no metodēm ir vieglāk uztverama un saprotama;
 - 3.1.2. Salīdzināt viena ekrāna un divu ekrānu metodes;
 - 3.1.3. Salīdzināt 5, 9, 11 un 100 baļļu skalas;
 - 3.1.4. Izstrādāt rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēlei un atlasīt svarīgākos metodes izvēles kritērijus;
 - 3.1.5. Izstrādāt vadlīnijas video kvalitātes novērtēšanas metodei, ar kuras palīdzību var iegūt divdimensionālu video kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.
4. Veikt video sižetu atlasu un novērtēšanu, kuri tiks izmantoti darba eksperimentos:
 - 4.1. Veikt video sižetu atlasu pēc satura (daba, dzīvnieki, sports, ziņas, u.tml.);
 - 4.2. Veikt video sižetu atlasu pēc telpas (*SA*) un telpaika (*TA*) mērījumiem;
 - 4.3. Noskaidrot vai sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir atkarīgs no *SA* un *TA* parametru vērtībām;
 - 4.4. Veikt oriģinālā un bojāto (kodēšanas vai pārraides rezultātā radušos bojājumu) video sižetu salīdzinājumu pēc *MSE* un *PSNR* mērījumiem.
5. Veikt video kvalitātes salīdzināšanas eksperimentus dažādiem video sižetiem un interfeisiem, veikt eksperimentu rezultātu statistisko apstrādi:
 - 5.1. Veikt video signālu un interfeisu kvalitātes novērtēšanu: komponentais ciparu (*YCbCr* 1080i), komponentais analogais (*YPbPr* 720p), kompozītais (*YIQ* 576p);
 - 5.2. Salīdzināt rezultātus un pārbaudīt, vai ir statistiski nozīmīgas atšķirības video kvalitātes novērtēšanā, izmantojot *PC* (viena ekrāna metode) un *SCJAC* (divu ekrānu metode);
 - 5.3. Veikt sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanu 1080i un 576p video signāliem, izmantojot komponento *YCbCr* un kompozīto *YIQ* video interfeisu;
 - 5.4. Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.

6. Veikt pakešu zuduma ietekmes uz video kvalitāti novērtēšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi:
 - 6.1. Mainīga ātruma video (*VBR*) plūsmai veikt pakešu atmešanu;
 - 6.1.1. Atmest 0.25%, 1%, 2% un 5% paketes no kopējā video sižeta apjoma;
 - 6.1.2. Pakešu atmešanai izmantot *Puasona*, *Gausa* un vienmērīgo varbūtību sadalījumu;
 - 6.2. Veikt video kvalitātes novērtēšanu:
 - 6.2.1. Veikt video kvalitātes novērtēšanu, izmantojot *ACR – HR* (0.25% un 1% pakešu zudumam);
 - 6.2.2. Veikt video kvalitātes novērtēšanu pēc *MSE* un *PSNR* (0.25%, 1%, 2% un 5% pakešu zudumam).
 - 6.3. Veikt bojāto video sižetu *GOP* kadru (*I* un *P* kadri) mērījumus.
 - 6.4. Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.

Pētījumu metodika

Izvirzīto uzdevumu izpildi var iedalīt trīs posmos:

1. Teorētiskajā daļā ir veikta literatūras analīze par video straumēšanas tehnoloģijām ar mērķi noskaidrot būtiskākos parametrus, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu, veikts kvalitātes vērtēšanas metožu salīdzinājums un veikta metožu izvēle, kā arī definēti principi video sižetu izvēlei.
2. Eksperimentālajā daļā ir izveidota testgultne un veikta virkne eksperimentu ar mērķi noteikt, kā dažādi video kodēšanas un pārraides tehniskie parametri ietekmē kvalitātes vērtējumu.
3. Aprēķinu un analīzes daļā ir veikta statistisko datu apstrāde ar mērķi atrast saistības starp video kvalitātes vērtēšanas eksperimentu un izmērāmiem video signāla un pārraides kanāla tehniskajiem parametriem.

Darba zinātniskie rezultāti un galvenie secinājumi

Darba jaunieguvumi

1. Izstrādāta un aprobēta video kvalitātes novērtēšanas metodika:

- 1.1. Respondentu altase pēc vecuma, dzimuma, izglītības, kā arī specifiskiem redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) testiem;
- 1.2. Respondenta datu statistiskā apstrāde (vidējā vērtējuma, standarta novirzes, ticamības intervāla, korelācijas, u.tml. aprēķini);
- 1.3. Eksperimentos izmantoto video sižetu atlases vadlīnijas, kā arī to novērtējums pēc telpas (*SA*) un telplaika (*TA*) mērījumiem;
- 1.4. Orģinālā un bojāto video sižetu salīdzinājums un kvalitatīvais un kvantitatīvais novērtējums pēc *MSE*, *PSNR*, *SSIM*, *VQM*, kā arī citām metrikām.
2. Izstrādātas rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēlei.
3. Izstrādātas vadlīnijas video kvalitātes novērtēšanas metodei, ar kuras palīdzību var iegūt divdimensionālu video kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu (*2D – MOS*).
4. Izstrādāts video straumēšanas risinājums, ar kura palīdzību var veikt video kodēšanas un pārraides rezultātā vizuāli redzamu artefaktu emulācijas – bloku efektu (*blocking*) un izplūdušu, neskaidru, attēla fragmentu ar samazinātu atšķirtspēju (*blurring*), u.tml.:
- 4.1. Video kodēšanas un video interfeisu (*YCbCr*, *YPbPr*, *YIQ* un *SDI*, *ASI*) emulācijas,
- 4.2. Video pārraides (aiztures, trīce un pakešu zudums) emulācijas, izmantojot trīs dažādus varbūtību sadalījuma likumus (*Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgais*).

Darba galvenie secinājumi

1. Eksperimentāli konstatēts, ka video kvalitātes novērtējums (*MOS*) ir būtiski atkarīgs no video sižeta satura ($r = 0.75$). Lai varētu savstarpēji salīdzināt, cik būtiskas ir šo dažādo video sižetu satura vērtējuma atšķirības, ieteicams izmantot divdimensionālu video sižetu novērtējumu (*2D – MOS*), kura katram video sižetam ir pieejams gan kvalitātes, gan akceptēšanas novērtējums.
2. Jo lielāka video sižeta telplaika (*TA*) vērtība un augstāka video sižeta tehniskā kvalitāte, jo sliktāks video sižeta novērtējums (*MOS*), kas apliecina to, ka šo sakarību ieteicams izmantot kā vienu no parametriem sintētisko video sižetu kvalitātes prognozēšanā. Video kvalitātes vērtējums ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telplaika vērtības ($r = -0.85$).
3. Par primāro un svarīgāko video kvalitātes novērtēšanas metodes atlases kritēriju var uzskatīt respondentu izvēli, kuru no piedāvātajām metodēm respondenti ir atzinuši par vienkāršāko – vieglāk uztveramu un saprotamu. Dodot izvēles iespēju izvēlēties viena vai divu ekrānu metodi, vairāk nekā 70% no respondentiem izvēlētos divu ekrānu metodi, nevis viena ekrāna metodi, tomēr darbā konstatēts, ka nav lietderīgi izmantot divu ekrānu metodi,

jo ar viena ekrāna metodi var iegūt statistiski līdzvērtīgus rezultātus ($r = 0.78$). Viena ekrāna metodēm izmanto 5, 9, 11 vai 100 baļļu skalas, kuras savstarpēji ir lineāri transformējamas, bet divu ekrānu 7 baļļu skalas vērtējumi nav transformējami uz 5, 9, 11 vai 100 baļļu skalām. Ieteicams izvēlēties viena ekrāna metodes, jo tās vienkāršotā veidā nodrošina savstarpēji salīdzināt dažādu metožu un skalu iegūtos rezultātus, kā arī tehniski vienkāršāk realizējama.

4. Svarīgi ievērot, ka pašlīdzības datu plūsmu ģenerēšanai ir izmantots mainīga ātruma video (*VBR*), lai nodrošinātu maksimāli reālistiskus IP pārraides tīkla apstākļus, jo tikai šādos apstākļos ir iespējama objektīvo video kvalitātes novērtēšanas metriku pilnveidošana un izstrāde, kā arī ticamu rezultātu ieguve, izmantojot video kvalitātes novērtēšanas metodes. Savukārt pakešu zuduma statistikas emulēšanai pašlīdzības datu plūsmā ieteicams izmantot gan *Puasona*, gan *Gausa*, gan arī *vienmērīgo* varbūtību sadalījuma likumus, jo video kvalitātes novērtējumā (*MOS*) starp šiem varbūtību sadalījuma likumiem nav novērotas būtiskas statistiskas atšķirības ($r = 0.5 - 0.7$).
5. Reālā laika video straumēšanas risinājumiem pakešu zudums nav vēlams, vai arī tam ir jābūt maksimāli mazam, ne lielākam par 0.25 %. Pakešu zuduma apjoms, kas ir lielāks par 0.25 %, t.sk. 1, 2 un 5 % ir liels, un nav pieņemams video straumēšanā. Eksperimentāli iegūtam pakešu zudumam 0.25 % atbilst $MOS = 2.4$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kur mēdz dēvēt par kvalitātes akceptēšanas robežvērtību.

Darba praktiskā vērtība

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti 3 starptautisko zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.
 - 1.1. Daļa no darba rezultātiem ir izmantoti SIA “Lattelecom” pakalpojuma “Interaktīvā televīzija” interneta - TV un *IPTV* lietotāja gala iekārtu *STB* video kvalitātes novērtēšanai;
 - 1.2. Darba rezultāti var kalpot kā rekomendācijas Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijai (*Regulators*), izstrādājot un adaptējot televīzijas programmu izplatīšanas pakalpojumu kvalitātes mērījumu sistēmu un metodiku.
2. Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas esošo video pārraides tīkla elementu testēšanai un nosakpošanai, kā arī jaunu risinājumu plānošanai un pētīšanai.
3. Ir izveidota **testgultne**, kā arī izstrādāta un aprobēta **metodika**, kura ir izmantojama:

- 3.1. Video subjektīvās un objektīvās kvalitātes novērtēšanai, t.sk. eksperimentālo izstrāžu un komerciālo produktu **testēšanai**;
- 3.2. Video kodēšanas un pārraides sistēmas elementu video kvalitātes, traucējumnoturības un veikspējas **pētīšanai**.
4. Promocijas darbs atbilst Latvijas Zinātnes padomes Zinātņu nozares **elektronika un telekomunikācijas** un apakšnozares **telekomunikāciju tīklu** tēmai – **apkalpošanas kvalitātes aprēķina metodes**.

Aizstāvamās tēzes

1. Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telplaika (*TA*) parametru vērtības ($r = -0.85$).
2. Video kvalitātes novērtēšanā viena ekrāna un divu ekrānu metodes dod statistiski līdzvērtīgus rezultātus ($r = 0.78$), bet, dodot izvēles iespēju, 70 % vērtētāju priekšroku dod divu ekrānu metodei.
3. Emulējot pakešu zudumus ar *Puasona*, *Gausa* vai *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu, video kvalitātes novērtējumiem *MOS* atšķirības nav statistiski nozīmīgas.
4. Video straumēšanā pakešu zudumi nedrīkst pārsniegt 0.25 %, jo tas atbilst video kvalitātes vērtējuma $MOS = 2.4$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par kvalitātes akceptēšanas robežvērtību.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika apspriesti astoņās starptautiskās zinātniskās konferencēs un vairākās biznesa un tehnoloģiju konferencēs, kā arī atspoguļoti septiņās publikācijās un zinātniskos izdevumos. Promocijas darba ietvaros ir izstrādātā mācību grāmata.

Starptautiskās zinātniskās un tehnoloģiju konferences:

1. ELECTRONICS'2012, Lietuva, Palanga, 18-20.jūnijs.
2. BMSB'2012- IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2012, Koreja, Seula, 27-29.jūnijs.
3. QoMEX'2012- International Workshop on Quality of Multimedia Expierence 2012, Austrālija, Melburna, 5-7.jūlijs.

4. ICIP'2012- IEEE International Conference on Image Processing 2012, ASV, Florida, Orlando, 30.septembris-3.oktobris.
5. ICMMP'2013- International Conference on Multimedia Processing 2013, Tunisija, Tunisija, 22-24.jūnijs.
6. ICIIP'2013- IEEE International Conference on Image Information Processing 2013, Indija, Shimla, 9-11.decembris.
7. BMSB'2014- IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2014, Pekina, Ķīna, 25-27.jūnijs.
8. APMediaCast'2015- IEEE Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting, 2015, Grand Inna Kuta Bali Indonesia, 23-25.aprīlis.
9. Atsevišķas pētījuma daļas ir prezentētas vairākās biznesa un tehnoloģiju konferencēs, piem., Broadband Forum 2011, IPTV World Forum 2012, IBC- International Broadcasting Convention 2013, u.c.

Publikācijas un zinātniskie izdevumi:

1. Pauliks R. „Objektīvās un subjektīvās kvalitātes vērtēšanas metodes interneta televīzijas pakalpojuma nodrošināšanai”, Saturs un zināšanas – ērti un interaktīvi lietojumi. Zinātniski praktiskās konferences materiālu krājums. Ventpils: 2008. 145-158 lpp.
2. Pauliks R., Slaidins I., “Impact of Video Content and Technical Specifications on Subjective Quality Assessment”, Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2012. – No. 6(122). – pp. 91–96. Citation indexed: Scopus, IEEE Xplore.
3. Pauliks R., Belahs K., Tretjaks K., “A survey on some measurement methods for subjective video quality assessment”, Journal of Multimedia Processing and Technologies, Vol. 3, No. 2, 2013, p. 113-123. Citation indexed: Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar.
4. Pauliks R., Belahs K., Tretjaks K., “Subjective Video Quality Assessment Methods”, Space Research Review, Vol. 2, 2013, p. 25-33.
5. Pauliks R., Slaidins I., “Quality Evaluation Of Synthetic Video In Simultaneous Double Stimulus Environment”, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP-2013), India 2013, p. 170-175. Citation indexed: Scopus, IEEE Xplore.
6. Schneps-Schneppe M. A., Pauliks R., “On the Role of Subjective Assessments in IPTV Quality Configuration”, Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 25–36. © Allerton Press, Inc., 2014. Citation indexed: Scopus, Springer.

7. Pauliks R., Slaidins I., Krauze A., Tretjaks K., “Assessment of IP packet loss influence on perceptual quality of streaming video”, Proceedings of the 2015 Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting (APMediaCast’2015), Indonesia 2015. Citation indexed: Scopus, IEEE Xplore.

Promocijas darba izstrādes gaitā ir izstrādāta mācību grāmata: Pauliks R., Krauze A., “Broadcast and Streaming Video Quality Measurements and Assessments. A practical Engineering Guide”, GlobeEdit. -OmniScriptum GmbH&Co.KG, 2015. -560p.

Promocijas darba rezultāti izstrādes laikā tika izmantoti vairāku projektu pētījumu daļas realizācijai:

- LR IZM Tirgus orientēto pētījumu projekts “Interneta televīzijas (IPTV) sistēmas kvalitātes mērījumu algoritmu pētījumi un pielietojumi programmatūras rīku izstrādei”, Nr. TOP08-12, (2009, 2010, 2011).
- LATLIT projekts “Use of multimedia and interactive television to improve effectiveness of education and training (Interactive TV)”, Nr. LLIV-343, (2012, 2013, 2014).
- Leonardo da Vinči projekts “Education Course of Digital TV Technologies for Vocational Educational Schools (DigTV)”, Nr. 2013-1-LV1-LEO05-05127, (2013, 2014, 2015).

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 190 lappuses. Darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām, izmantotās literatūras saraksta un pielikumiem.

Ievadā ir aprakstīti galvenie video kvalitātes novērtēšanas aspekti un problēmas, kā arī pamatota darbā veikto pētījumu aktualitāte un definēts darba virziens.

Pirmā nodaļa ir veltīta video kompresijas un pārraides tehnoloģiju pārskatam. Pirmā apakšnodaļa ir veltīta cilvēka vizuālās uztveres īpatnību aprakstam, t.sk. cilvēka redzes asums un atšķirtspējā, gaismas un krāsu redze, kā arī optiskās ilūzijas. Otrā apakšnodaļa ir veltīta video kompresijas tehnoloģiju pārskatam, uzskaitītas un raksturotas populārākās video kompresijas tehnoloģijas un *MPEG (Moving Pictures Expert Group)* kompresijas darbības principu apskatam t.sk. video signāla ieguve, formēšana, kodēšana, video plūsmu pakošana un sagatavošana transportēšanai aprakstam. Trešā apakšnodaļa ietver īsu video un televīzijas tehnoloģiju attīstības pārskatu. Ceturtās apakšnodaļas ietvaros ir aprakstītas populārākās televīzijas apraides tehnoloģijas, kā arī veikts padziļināts pārskats par video pārraides

tehnoloģijām, izmantojot *IP* protokolu. Aprakstītas video signālu pārraides tehnoloģijas un ciparu televīzijas tehnoloģijas, kuras nodrošina video signāla transportu no video signāla avota līdz skatītājam, t.sk. video signālu transportēšanu – komutēšanu un maršrutēšanu, video pārvades interfeisu, dekodēšanu, dažādus video signāla pārveidošanas paņēmienus un attēlošanu ekrānā. Piektā apakšnodaļa ir veltīta video pārraides datu plūsmas modeļu aprakstam. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīti dažādu televīzijas tehnoloģiju specifiskie pārraides kvalitātes mērījumi. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

Otrā nodaļa ietver video kvalitātes novērtēšanas metožu pārskatu. Pirmā apakšnodaļa ietver informāciju par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, skalām, to apzīmējumiem un dažādiem lietojumiem, t.sk. aprakstītas un savstarpēji salīdzinātas dažādas video kvalitātes novērtēšanas metodes, sniegtas rekomendācijas un izstrādāts risinājums jaunai metodei. Otrajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodēm, to dažādiem lietojumiem, t.sk. *MSE*, *PSNR* un *SSIM*. Trešajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvo video kvalitātes novērtēšanu izmantojot *SA* un *TA*. Ceturtajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par video kvalitātes prognozēšanu izmantojot objektīvos video kvalitātes parametrus. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

Trešā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas metodikas aprakstam. Pirmajās trijās apakšnodaļās ir apkopota informācija par eksperimentālajos pētījumos izmantotās testgultnes izveidošanas nosacījumiem, t.sk. kompresijas un pārraides aprīkojuma tehniskajiem raksturlielumiem, monitora kalibrēšana, kā arī testēšanas telpas uzbūvi, mikroklimatu un mērījumi. Ceturtajā apakšnodaļā aprakstīta eksperimentos piesaistīto respondentu atlases principi, t.sk. respondentu atlase pēc dzimuma, vecuma, nodarbošanās, kā arī atlase izmantojot redzes asuma, krāsu redzes un kontrasta jūtības testus. Piektajā apakšnodaļā aprakstīts testēšanā izmantotā video materiāla sagatavošanas un atlases prasības, t.sk. video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc *SA* un *TA*, kā arī video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc *MSE* un *PSNR*. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīta video kvalitātes novērtēšana – statistiskā datu apstrāde. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

Ceturtā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu aprakstam, kuros pētītas video attēla kvalitātes subjektīvo un objektīvo parametru sakarības. Pirmajā apakšnodaļā tika veikta dažādu vērtēšanas skalu un metožu salīdzināšana, lai izvēlētos piemērotākos apstākļus galvenajiem eksperimentiem. Otrajā apakšnodaļā pētīta dažādu video kompresijas variantu un interfeisu ietekme uz video kvalitātes vērtējumu. Pakešu zuduma ietekme uz video kvalitāti eksperimentāli pētīta trešajā apakšnodaļā. Nodaļas nobeigumā ir kopsavilkums un secinājumi.

Nobeigumā ir apkopoti un pamatoti darba galvenie rezultāti un secinājumi, kā arī norādīti turpmākie pētījuma virzieni.

Pielikumos ir pievienota tehniska rakstura informācija atbilstoši katras darba nodaļas aprakstam un testgultnes aprīkojuma, un testēšanas telpas tehniskās specifikācijas.

Izstrādājot promocijas darbu, ir ņemti vērā visi *SMART* (*specific, measurable, appropriate, result-oriented and trackable*) pamatprincipi: literatūras analīzes rezultātā identificēta tēmas aktualitāte un specificēts pētījuma lauks, pētījuma laikā veikti eksperimenti, analizēti mērījumu dati, identificētas nepilnības, atkārtoti mērījumi, precizējot un papildinot eksperimentus, kā rezultātā izstrādāta metodika, ar kuras palīdzību ir iespējams atkārtot pilnu pētījuma ciklu.

1. VIDEO PĀRRAIDES TEHNOLOĢIJAS UN KVALITĀTES NODROŠINĀŠANA PAKEŠU TĪKLOS

Pirmā nodaļa ir veltīta video kompresijas un pārraides tehnoloģiju pārskatam. Pirmā apakšnodaļa ir veltīta cilvēka vizuālās uztveres īpatnību aprakstam, t.sk. cilvēka redzes asums un atšķirtspējā, gaismas un krāsu redze, kā arī optiskās ilūzijas. Otrā apakšnodaļa ir veltīta video kompresijas tehnoloģiju pārskatam, uzskaitītas un raksturotas populārākās video kompresijas tehnoloģijas un *MPEG (Moving Pictures Expert Group)* kompresijas darbības principu aprakstam t.sk. video signāla ieguve, formēšana, kodēšana, video plūsmu pakošana un sagatavošana transportēšanai aprakstam. Trešā apakšnodaļa ietver īsu video un televīzijas tehnoloģiju attīstības pārskatu. Ceturtās apakšnodaļas ietvaros ir aprakstītas populārākās televīzijas pārraides tehnoloģijas, kā arī veikts padziļināts pārskats par video pārraides tehnoloģijām, izmantojot *IP* protokolu. Aprakstītas video signālu pārraides tehnoloģijas un ciparu televīzijas tehnoloģijas, kuras nodrošina video signāla transportu no video signāla avota līdz skatītājam, t.sk. video signālu transportēšanu – komutēšanu un maršrutēšanu, video pārvades interfeisu, dekodēšanu, dažādus video signāla pārveidošanas paņēmienus un attēlošanu ekrānā. Piektā apakšnodaļa ir veltīta video pārraides datu plūsmas modeļu aprakstam. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīti dažādu televīzijas tehnoloģiju specifiskie pārraides kvalitātes mērījumi. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

1.1. Cilvēka vizuālās uztveres īpatnības

Video kvalitātes mērījumus un novērtēšanu var veikt vairākos līmeņos – bitu līmenī, pakešu līmenī vai attēla elementu līmenī. Visos gadījumos tiek novērtēts konkrēts video pārraides vai kodēšanas tehnisko sistēmu kopums, piemēram, galvstacijas (*HE*), dekoderis (*STB*) vai ekrāns (*TV*), bet netiek novērtēts pēdējais, svarīgākais posms – video signāla kvalitāte no ekrāna līdz skatītājam. Lai to paveiktu ir jāveic specializēti video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti, kur tehniskie pārraides vai kodēšanas sistēmas parametri ir jāsaista ar cilvēka vizuālas uztveres robežvērtībām. Tāpēc ir jāveic literatūras pārskats par cilvēka vizuālās uztveres īpatnībām, un jānoskaidro svarīgākie cilvēka vizuālās uztveres parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu.

Cilvēka vizuālo uztveri var uzskatīt par vienu no sarežģītākajām, lielākā daļa cilvēka smadzeņu neironi ir saistīti tieši ar vizuālo uztveri [35]. Šajā nodaļā izklāstītā informācija ir

specificēta, koncentrējoties uz galvenajiem aspektiem, kuri attiecas uz attēlu un video apstrādi [36]. Cilvēka uztveres īpatnības, izmanto attēlu, video apstrādes un datora redzes eksperti, lai veiktu pētījumus, izstrādātu algoritmus, dažādas kvalitātes mērījuma un novērtēšanas metodes [37] saistībā ar cilvēka uztveres bioloģiskajiem un psiholoģiskajiem procesiem, kuri vēl līdz šim brīdim nav pilnībā izpētīti un izprasti. Cilvēka redzes modelim, turpmāk tekstā bieži tiks lietots apzīmējums *HVS* (*Human Visual System*). Cilvēka vizuālo uztveri formē atbilstoši smadzeņu centri un redze [38], un tos ietekmē vesela virkne vizuālo kairinājumu: apkārtējais apgaismojums, novērojamā objekta spilgtums, kontrasts, krāsas, vai objekts ir statisks, kustīgs (slīd, rotē, krīt), objekta forma, kontūras, aizpildījums, izmērs, novietojums, u.tml.

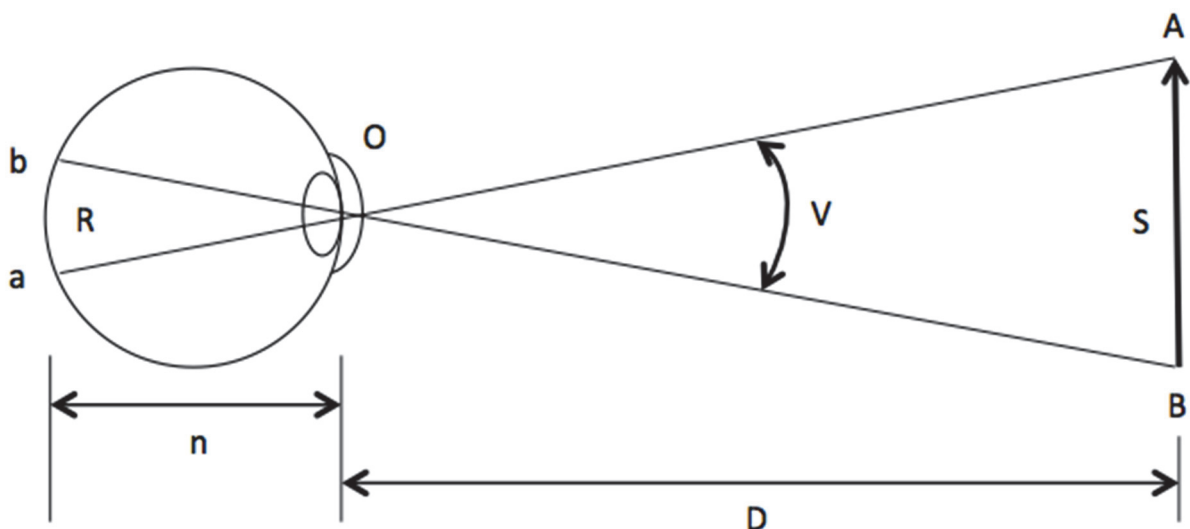
HVS uzbūve ir ļoti sarežģīta, kā arī vēl joprojām līdz pat mūsdienām līdz galam nav ne izprasta, ne arī precīzi aprakstīta un definēta. Tāpēc darbā galvenā vērība akcentēta uz daudzos pētījumos, to eksperimentos, pārbaudītiem un pie *HVS* raksturīgajiem parametriem atzītiem lielumiem, piemēram, novērojamā objekta spilgtums, kontrasts, krāsu toņu skaits un piesātinājums, apkārtējās vides apgaismojums, cilvēka redzes adaptācija pie dažādiem novērojamā un apkārtējā apgaismojuma lielumiem, u.tml.

Darbā iekļautajos eksperimentos kā pirmais solis, atlasot un klasificējot respondentus, tika veikts redzes skrīnings (redzes kvalitātes novērtējums) – novērtēta redzes kvalitāte tālumā (asums), abu acu kopredze, acs pielāgošanās spēja dažādiem attālumiem (akomodāciju) un gaismas intensitātes izmaiņām, kā arī krāsu redze.

Darbā testēšanas telpas apgaismojuma mērījumiem lietoti luksi (lx), novērojamā objekta spilgtuma mērījumiem – kendels uz kvadrātmētru (cd/m^2), bet krāsu temperatūras mērījumiem kelvini (K). Ir ļoti svarīgi nodrošināt visiem respondentiem identiskus testēšanas telpas apgaismojuma apstākļus, jo redzes asumu var ietekmēt vairāki tehniski faktori, piemēram, jo sliktāks apgaismojums, jo straujāk krītas redzes asums, samazinoties kontrastam, redzes asums samazinās, kā arī visiem respondentiem tika nodrošināti identiski novērošanas objekta (*Ishihara*, *Snellen*, *Pelli-Robson* testu attēli un kvalitātes testēšanas video fragmenti) rādīšanas ilgums, skatīšanās attālums, augstums, leņķis, u.tml.

1.1.1. Redzes leņķis, izšķirtspēja un kustību uztvere

Cilvēka acs vizuālais leņķis V ir novērojamā objekta leņķiskais lielums S , kas atrodas attālumā D , skatīt 1.1. attēlā. A un B ir novērojamā objekta lielums, bet a un b ir šī paša objekta projekcija uz acs tīklenes.



1.1. att. Redzes leņķis un asums

Redzes leņķi V var imērīt izmantojot specializētu mēraparatūru – teodolītu, kuru novieto punktā O , skatīt 1.1. attēlā. Redzes leņķi var arī aprēķināt pēc (1.1). formulas vai pēc vienkāršākas (1.2). formulas, kura nodrošina ļoti tuvinātus aprēķina rezultātus.

$$V = 2 \arctan \left(\frac{S}{2D} \right) \quad (1.1)$$

$$\tan V \tan V = \frac{S}{D} \quad (1.2)$$

Vizuāli redzams objekta attēls uz acs tīklenei veidojas starp punktiem a un b , skatīt 1.1. attēlā. Mazam redzes leņķim R aprēķina pēc (1.3). formulas.

$$\frac{R}{n} = \tan V, \quad (1.3)$$

Kur attālums no redzes krustpunkta līdz acs tīklenei n ir aptuveni 17 milimetri, skatīt 1.1. attēlā.

Cilvēka redzes leņķis 1 cm objektam 1 m attālumā ir vienāds ar 2 cm objektu 2 m attālumā. Abos gadījumos redzes leņķis ir 0.57 grādi, un tīklenei attēla izmērs ir 17 mm. [22] ir definēts *PVD* (*Preferred Viewing Distance*) vai vēlmais skatīšanās attālums, skatīt 20. pielikums, piemēram, *HDTV* 16/9 formāta 36 collu ekrānam ieteicamais skatīšanās attālums ir

$0.45 \cdot 6 = 2.7$ metri. Starp *SDTV* un *HDTV* ir konstatētas ļoti mazas ieteicamā skatīšanās attāluma atšķirības.

Novērojamā objekta attālums, cilvēka redzes leņķis un acs izšķirtspēja ir cieši saistīti lielumi [39]. Cilvēka acs maksimālā izšķirtspēja ir 50 *CPD* (*Cycles per Degree*) [40] vai smalkākās detaļas, kuras cilvēka acs atšķir ir 0.35 mm starp divām līnijām 1 m attālumā. Cilvēka vizuālās redzes novērtēšanas principus, piemēram, *Snellen Chart* testus var daļēji izmantot arī video kameru izšķirtspējas testiem, kuros tiek izmantoti specializēti *I3A/ISO* attēli atbilstoši [41], skatīt 19. pielikumā.

Cilvēka redzes kustību uztveri var raksturot ar diviem lielumiem – ekrāna mirgošanas vai atjaunošanās frekvenci (*Hz*) un kustīga attēla kadru skaitu sekundē *FPS* (*Frames Per Second*). Piemēram, kinoteātru projektoros izmanto video, kur katras sekundes laikā attēlo 24 kadrus, bet katru kadru ekrānā izgaismo 2 vai 3 reizes. Tādējādi projektorā atbalsta 24 kadrus sekundē ar 48 vai 72 *Hz* atjaunošanos frekvenci. 24 kadrus sekundē ar divkāršu vai trīskāršu atjaunošanās frekvenci cilvēks uztver kā nepārtrauktu attēlu virkni vai video, jo nav saskatāmi atsevišķi attēla kadri, nav novērojamas attēla kadru fluktuācijas, kā arī nav redzama ekrāna mirgošana.

1.1.2. Gaismas uztvere

Cilvēka redzes uztveres sistēma ir sarežģīts mehānisms, kas sastāv no vairākiem cieši saistītiem elementiem: acs optiskā sistēma (acs ābols), acu kustības muskuļi, redzes nervu ceļi, galvas smadzeņu redzes centri, plakstiņi, dziedzeri, u.tml.

Darba uzdevumos nebija paredzēts diagnosticēt redzes asumu tuvumā un tālumā, kopredzi, akomodāciju, piemērot palīgīdzekļus (brilles, lēcas) redzes koriģēšanai, kā arī noskaidrot iespējamās cēloņus redzes traucējumiem, bet vienkāršotā veidā, izmantojot *Snellen Chart* testus, aprobežoties ar respondentu identificēšanu, kuriem ir novērojami kopredzes un redzes asuma novirzes no normas. Pārbaudes tika veiktas, izmantojot palīgīdzekli (brilles vai lēcas), ja tādas respondentam ir izrakstījis ārsts.

Neskaitāmos pētījumos eksperimentāli ir pierādīts, ka cilvēka redzei ļoti būtiska ir gaismas intensitāte, kontrasts, melnbaltās krāsas, bet par salīdzinoši mazsvarīgu tiek uzskatīts krāsu toņu skaits un piesātinājums. Cilvēka redzes adaptēšanās apgaismojums [42] ir viens no svarīgākajiem parametriem, kas ietekmē cilvēka vizuālās uztveres kvalitāti [37]. Cilvēka redzes jūtība daudz lielākā mērā ir atkarīga no apkārtējās vides kontrasta izmaiņām nekā no absolūtā spilgtuma līmeņa svārstībām. Šo *HVS* īpašību plaši pazīst kā *Weber–Fechner* likumu vai *Weber*

kontrastu – relatīvo spožuma svārstību (1.4). formula, kura raksturo objekta spilgtuma palielinājumu un samazinājumu attiecībā pret nemainīgu fona apgaismojumu.

$$C^w = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.4)$$

Kontrasta sliekšņa vērtība ir kontrasta minimālā vērtība, kuru testētājam ir iespējams novērot kā spilgtuma izmaiņas, kas ir kā funkcija no fona spilgtuma, skatīt 9. pielikumā.

Optimālos apstākļos kontrasta sliekšņa vērtība var būt mazāka par 1 % [43]. Kontrasta jūtība ir apgriezti proporcionāla kontrasta sliekšņa vērtībai.

Kontrasta jūtības funkciju *CSF* (*Contrast Sensitivity Function*) var definēt kā *Michelson* [44] kontrastu, ko izsaka (1.5). formula, kura L_{max} un L_{min} ir spilgtuma ekstrēmi, skatīt attēlā 9. pielikumā.

$$C^M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (1.5)$$

Kontrasta jūtības vizualizāciju, kuru mēdz dēvēt par *Campbell–Robson Chart* diagrammu [45], skatīt 9. pielikumā.

Cilvēka acs jūtība ir lielāka uz attēla kontrasta izmaiņām telpā un laikā (*spatio-temporal CSF*), kā arī pelēkiem un melnbaltiem toņiem, nekā attēla krāsu tonalitātei un piesātinājumam.

Veicot video kvalitātes novērtēšanas eksperimentus ir jānodrošina testēšanas telpas un monitora parametri atbilstoši cilvēka gaismas uztveres līmeņiem, piemēram, testēšanas telpas apgaismojuma līmenim jābūt 200 lx, bet monitora spilgtuma līmenim ir jābūt 200 cd/m², skatīt 3. nodaļā.

1.1.3. Krāsu uztvere

Cilvēka redze darbojas šaurā elektromagnētiskā starojuma spektra diapazonā no 380 nm līdz 760 nm, sauktu par redzamo gaismu, kur noteiktai frekvenču joslai no šī diapazona atbilst zināms krāsu tonis. Redzamais gaismas spektrs sastāv no 7 pamatkrāsām: sarkana, oranža, dzeltena, zaļa, gaišzila, tumšzila un violeta.

Cilvēka acs tīklenē ir 2 veidu fotoreceptori – nūjiņas –, kuras atbild par redzes uztveri sliktā apgaismojuma apstākļos, kā arī 3 veidu vāļītes, kuras atbild par krāsu uztveri laba apgaismojuma apstākļos: sarkanā (R), zaļā (G) un zilā (B). Šo RGB vāļīšu mijiedarbībā cilvēka acs spēj atšķirt līdz pat 10^7 krāsu toņu. Ja cilvēkam ir atbilstoša krāsu redze, darbojas visas krāsu vāļītes, tad to sauc par trihromāziju, ja cilvēkam ir pilnīgs krāsu aklums, tad to sauc par monohromāziju. Savukārt daļēju krāsu redzes traucējumu gadījumos, kad nepilnvērtīgi darbojas kāda no krāsu vāļītēm, iespējami arī redzes nerva vai centrālās nervu sistēmas traucējumi, tad, veicot speciālus krāsu redzes defekta mērījumus ar anomaloskopu, var diagnosticēt konkrētu krāsu redzes anomāliju vai disfunkciju: deiteranomālija, protanomālija, tritanomālija, protanopija, deiteranopija, tritanopija. Darba uzdevumos nebija paredzēts diagnosticēt krāsu redzes anomāliju vai disfunkciju, bet vienkāršotā veidā, izmantojot *Ishihara Chart* testus, aprobežoties ar respondentu, kuriem ir novērojami krāsu redzes defekti identificēšanu un izslēgšanu no turpmākās testēšanas.

Par pamatu izmantojot cilvēka redzes atsauces krāsu stimulus X , Y , Z un trīs CIE krāsu saskaņošanas funkcijas $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, ļauj noteikt krāsainās gaismas zaļā, sarkanā un zilā spektra enerģijas sadalījumu un līdz ar to precīzi definēt krāsas atbilstoši (1.6). formulai, kur $\phi(\lambda)$ ir izstarojuma avota spektra enerģijas sadalījums, kas ir jānomēra, un $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ir CIE 1931 krāsu saskaņošanas funkcijas, bet k ir normalizācijas koeficients [46].

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \tag{1.6}$$

Līdz šim ir radīts ļoti liels krāsu telpu skaits, pazīstamākās ir RGB un YUV , bet neviena no viņām neatspoguļo patieso cilvēka redzes krāsu telpu, piemēram, RGB ir lineāra krāsu telpa, bet CIE 1931 ir nelineāra. Krāsu telpas pārveidojumus un diagrammu skatīt 5. pielikumā un 10. pielikumā. Pētījumos par krāsu uztveri, CIE 1931 RGB un CIE 1931 XYZ krāsu telpas ir pirmās matemātiski definētās un standartizētās CIE (*International Commission on Illumination*) [47]. Trihromātisko vērtību pārveidojumi no CIE 1931 uz CIE Lab un CIE Luv ir definēti pēc [48] un aprēķins izklāstīts 5. pielikumā. Video industrijā izmanto ļoti daudz krāsu telpu un to paveidus, kuras neatspoguļo patiesu cilvēka krāsu uztveri, bet jebkura no tām ir konvertējama uz CIE 1931.

Krāsu uztveres pētījumi [49] sastāv no veselas virknes krāsu uztveres atbilstības eksperimentiem [50]. Šajos krāsu eksperimentos respondents novēro divpusēju laukumu, kur viena puse no laukuma ir izgaismota ar testa gaismu, bet otra puse ir izgaismota ar vairākiem primāro krāsu apgaismojuma avotiem. Novērotāja uzdevumos ietilpst pielāgot primāro apgaismojuma avotu intensitāti tā, lai tā sakristu ar testa gaismas avotu. Neskatoties uz to, ka eksperimentā primāro gaismas avotu skaits ir neliels, tikai trīs (*RGB*), kopumā respondenti var izveidot gaismas avotu krāsu atbilstību testa gaismas avotam.

Vadoties pēc pētījuma [51], foto optiskā krāsu saskaņošana atbilst viendabīgumam un superpozīcijai, tāpēc to var analizēt, izmantojot lineāro sistēmu teoriju. Pieņemsim, ka testa gaismu var aprakstīt ar vairākiem (n – tiem) gaismas avota spektrālā enerģijas sadalījuma paraugiem, kuru var izteikt kā vektoru x , tad krāsu uztveres atbilstības eksperimentu var aprakstīt ar (1.7. formulu, kur t ir trīsdimensiju vektors, un tā koeficienti raksturo trīs primāro gaismas avotu intensitāti, kuriem respondents ir konstatējis atbilstību vektoram x . Tos mēdz dēvēt arī par testa gaismas trihromātiskām koordinātēm. Matricas C rindas sastāv no trim primārās gaismas avotu krāsu saskaņošanas funkcijām.

$$\begin{aligned}
 t &= Cx & (1.7) \\
 t &= \begin{bmatrix} l \\ m \\ s \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} L(\lambda_1) & L(\lambda_2) & \dots \\ M(\lambda_1) & M(\lambda_2) & \dots \\ S(\lambda_1) & S(\lambda_2) & \dots \end{bmatrix} \Delta\lambda \\
 x &= \begin{bmatrix} C(\lambda_1) \\ C(\lambda_2) \\ \dots \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Krāsu uztveres atbilstības eksperimentu mehāniski var apskatīt kā divu gaismas avotu summu, kura rada tieši tādu pašu gaismas absorbciju kā L , M un S vāļītēm, skatīt 11. pielikumā. Ja trīs vāļīšu (S , M un L) spektrālo jūtību apraksta ar rindām no matricas R , tad spektrālo jaudas sadalījumu x apraksta ar $r = Rx$. Lai savstarpēji saistītu šīs vāļīšu absorbcijas līknes ar testa gaismas trihromātiskām koordinātēm, ir nepieciešams veikt gaismas avotu atbilstības testu šīm trim primārām P gaismas avotu krāsām, kuru kolonnas sastāv no vairākiem (n – tiem) gaismas avota spektrālā enerģijas sadalījuma paraugiem. Vāļīšu absorbcijas līknes r ir lineāri transformējamas uz testa gaismas trihromātiskām koordinātēm t , atbilstoši (1.8). formulai, kur

$M = Rp$ ir 3×3 matrica. Tādējādi, cilvēka redzes trīs krāsu vāļišu spektrālā jūtība nodrošina pietiekamu skaidrojumu saistībā ar cilvēka vizuālās uztveres krāsu atbilstības eksperimentu.

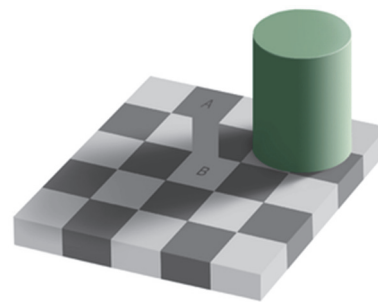
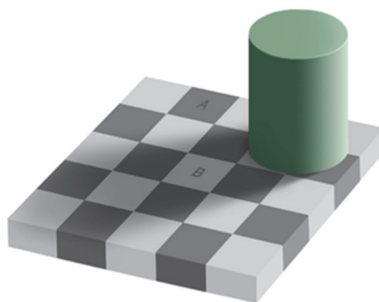
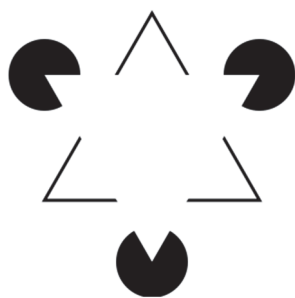
$$r = Mt \quad (1.8)$$

Ēvalds Hērings ir viens no pirmajiem, kurš ir izvirzījis teoriju par oponenta krāsām. Atsevišķi krāsu pāri rada identiskas krāsu sajūtas, piemēram, sarkani dzeltenā krāsa tiek uztverta kā oranža krāsa, bet atsevišķām krāsām nepiemīt oponenta krāsas, piemēram, sarkani zaļam. No tā autors [52] secināja, ka zaļās un sarkanās, kā arī zilās un dzeltenās krāsas var kodēt kā krāsu atšķirību signālus atsevišķā krāsu kanālā, kuru parasti dēvē par oponenta krāsu kanālu, skatīt 10. pielikumā. Vesela virkne fizioloģisku eksperimentu pierādīja oponenta krāsu eksistenci un to ietekmi uz cilvēka redzes L , S un M vāļītēm [37]. Cilvēka L , S un M vāļišu jūtību skatīt 11. pielikumā.

Veicot video kvalitātes novērtēšanas eksperimentus ir jānodrošina testēšanas telpas un monitora parametri atbilstoši cilvēka krāsu uztveres līmeņiem, piemēram, testēšanas telpas krāsu temperatūrai jābūt 3000 K, bet monitora krāsu temperatūrai ir jābūt 6500 K, skatīt 3. nodaļā.

1.1.4. Optiskās ilūzijas, efekti un defekti

Izvēloties video fragmentus testēšanai, ir jāņem vērā vēl viens būtisks aspekts – optiskās ilūzijas efekts. Iespējams, ka kāds no izvēlētajiem materiāliem var radīt optiskas ilūzijas (iluzoras kustības, rotācijas, viļņošanas, pulsācijas, taisnu līniju vietā slīpas, 3D efektus, u.tml.), jo cilvēka acis uztver 2D attēlus, bet smadzenēm ir nepieciešams 3D attēls, tāpēc arī HVS, veicot attēlu apstrādi un interpretāciju, var radīt dažādas optiskas ilūzijas, parasti gan šo efektu var iegūt ar speciāli šim mērķim radītiem attēliem vai video fragmentiem. 1.2. attēlā ir apkopoti daži optisko ilūziju paraugi, papildu piemērus ar atsaucēm uz atbilstošiem pētījumiem skatīt prof. dr. Michael Bach tīmekļa vietnē [53]. Optiskās ilūzijas var iedalīt vairākās nosacītās grupās: krāsu; spilgtuma un kontrasta; neesošas kustības, rotācijas, slīdēšana; ģeometriskas ilūzijas, neesošu 3D objektu ilūzijas; kognitīvās vai *Geštalta uztveres ilūzijas*. Līdz pat mūsdienām turpinās aktīvs pētniecisks darbs šajā sfērā, jo daudziem optisko ilūziju piemēriem trūkst eksperimentāli pārbaudīti un zinātniski pamatoti skaidrojumi.



A. Trīsstūru ilūzija, (G. Kanizsa) **B1.** Ēnu ilūzija (E.H. Adelson) **B2.** Ēnu ilūzija (E.H. Adelson)

1.2. att. Optisko ilūziju paraugi

Piemēram, 1.2. attēlā (*A.* Trīsstūru ilūzijas) piemērs ir pieskaitāms pie kognitīvās uztveres ilūzijas. Cilvēka vizuālā uztvere šo fragmentāro attēlu papildina līdz pilnībai un pabeigtībai. Vispirms mēs uztveram ar fragmentārām melnām līnijām zīmētu trīsstūri, kuram iztrūkstošās līnijas mēs savā prātā papildinām, tad, virs šī melnā trīsstūra, mēs ieraugām uzklātu, neesošu baltu trīsstūri. Tas tikai apstiprina cilvēka vizuālās uztveres holistisko dabu – vispirms mēs attēlu uztveram kopumā, un tikai tad uztveram katra attēla elementu atsevišķi. (*B1.* Ēnu ilūzijas) 1.2. attēlā *B1* mēs varam saskatīt, ka tumši pelēkā tonī ir iekrāsots laukums *A*, bet gaiši pelēkā tonī laukums *B*, kaut gan abu laukumu pelēkie toņi ir identiski, skatīt 1.2. attēlā *B2*. Cilvēka vizuālā uztvere vispirms mēģina objektus klasificēt pēc to krāsām, bet 1.2. attēla *B1* piemērā cilvēkam ir dots uzdevums klasificēt dažādus pelēkos toņus [54]. Vienkāršotā veidā izmērot spilgtumu, kas atstarojas no kāda konkrēta virsmas laukuma, ir nepietiekami, lai spriestu par to, kādā tonī ir atbilstošās virsmas laukums, jo baltas krāsas virsma ēnā atspoguļo mazāk, nekā melnas krāsas virsma pilna apgaismojuma apstākļos. Cilvēka vizuālā uztvere kopainā nespēj interpretēt plašu spektru pakāpeniski pārejošu apgaismojuma intensitātes līmeņus, kurus var radīt ar ēnu, tā mēģina adaptēties kādam konkrētam vidējam apgaismojuma intensitātes līmenim. Acīmredzams, ka cilvēka vizuālā uztvere nav paredzēta precīziem apgaismojuma intensitātes mērījumiem, bet to mēs varam uzskatīt par *HVS* priekšrocību, nevis trūkumu, jo cilvēks vispirms uztver dažādus attēla elementus, novietojumu, formu, tekstūru, krāsu, tad mēģina tos apvienot kaut kādā jēgpilnā kopainā. Tāpēc arī šajā attēlā cilvēks saskata jēgpilnu šaha galdiņa melno un balto laukumu izkārtojumu, nevis to, kas ir patiesībā radīts ar ēnas, spilgtuma un kontrasta “saspēli”.

Ja testēšanā plānots izmantot video materiālu, kuru ir jāizstrādā (jānofilmē vai jānofotografē), tad ir jāņem vērā, ka video uzņemšanas procesā var rasties dažādi efekti un nevēlami defekti. Piemēram, kameras tālummaiņa (*zooming*), panoramēšana horizontāli un

vertikāli (*paning and tilting*) var izraisīt nevēlamu attēla drebēšanu, attēla objektu un elementu strukturālus un ģeometriskus kropļojumus, kā arī dažādus optiskos efektus un defektus, demonstrējot uzņemto video sižetu. Izplūdis (neskaidrs) fons (*background blurring*), tā elementi, kuri nav fokusā (*bokeh-out of focuss blur*) ir uzskatāms par optisko efektu, tieši tā pat kustīgu objektu vai elementu neskaidras kontūras momentuzņēmumā, kas rada ilūziju par kustību, ir uzskatāmas par māksliniecisku efektu. Tālummaiņa un platleņķa objektīvi var radīt ievērojamus attēla objektu un elementu ģeometriskos kropļojumus, kā arī veselu virkni optisko sistēmu radītos defektus, piemēram, hromātiskā aberācija vai kropļojumi *CA* (*Chromatic Aberration*) samazina asumu attēlā, gaismas kritums (*vignetting, light fall-off*) padara tumšākus attēla stūrus, saules atspīdums (*flare*) samazina attēla asumu un rada nevēlamus saules atspīduma artefaktus, oreola atspīdums (*halation*) samazina attēla asumu, radot attēla objektiem izplūdušas robežas, u.tml. Minētie optiskie efekti var arī tikt uztverti kā attēla kvalitātes pasliktināšanās, bet nav saistīti ar šajā darbā analizētajiem attēla kvalitātes pasliktināšanās cēloņiem. Tāpēc šis aspekts ir pietiekami svarīgs, lai to pieminētu un ņemtu vērā, izstrādājot un izvēloties eksperimentēšanā izmantojamo video materiālu.

Tā kā cilvēka smadzeņu un uztveres aparāta īpatnību izpēte vēl joprojām turpinās, darbā par cilvēka vizuālās uztveres modeli (*HVS*) kalpos virkne skrupulozi pārdomāti video attēla kvalitātes novērtēšanas eksperimenti, to rezultātā iegūto datu apstrāde, analīze un secinājumi, skatīt 4. nodaļā.

Literatūras pārskata rezultātā var secināt, ka cilvēka redzes īpatnības (redzes leņķis, izšķirtspēja un kustību uztvere, gaismas jūtība, krāsu redze un optiskās ilūzijas), ir ļoti būtiskas, un tās ir jāņem vērā kompresijas un pārraides ietekmes (pakešu zudums, aiztures un trīce) kvalitātes novērtēšanā. Tāpēc turpmākie darba uzdevumi ir sekojoši:

- Veikt literatūras pārskatu par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu:
 - Noskaidrot svarīgākos video signāla pārraides un kompresijas parametrus, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;
 - Eksperimentāli noskaidrot sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanas sakarības.

1.2. Video kompresijas tehnoloģijas

Video signālu kompresijas mērķis ir maksimāli samazināt pārraidāmo datu apjomu, pēc iespējas mazāk ietekmējot video attēla kvalitāti. Jaunradītu kompresijas algoritmu galvenais uzdevums ir pie nemainīgas video kvalitātes nodrošināt pēc iespējas efektīvāku kompresiju, piemēram, *H264 AVC P10* salīdzinot ar *MPEG – 2 P2*, nodrošina līdz pat 50 % efektīvāku kompresiju [55]. Līdzīga sakarība ir atrodamā, *H265 HEVC* salīdzinot ar *H264 AVC P10* [56]. Jo augstākas pakāpes kompresija, jo sarežģītāki dekodēšanas algoritmi un lielāka skaitļošanas jauda ir nepieciešama [57]. Samazināt datu apjomu var divējādi – bez zudumiem (*lossless*) un ar zudumiem (*lossy*). Redundantu datu kompresija vai kodēšana bez zudumiem un oriģināla signāla atjaunošana uztverošajā pusē neietekmē video attēla kvalitāti. Pie redundances samazināšanas paņēmieniem pieskaita: *DPCM* (*Differential Pulse Code Modulation*), *Zig-Zag* skenēšana ar *RLC* (*Run-Lenght Coding*), *VLC* (*Variable Length Coding*), *CABAC* (*Context Adaptive Binary Arithmetic Coding*), *CAVLC* (*Context Adaptive Variable Length Coding*), Huffman kodēšanu. Savukārt kodēšanu ar zudumiem izmanto algoritmi: *DCT* (*Discrete Cosine Transform*), krāsu izšķirtspējas samazināšana (10 bitus aizstājot ar 8 bitiem un 4:4:4 aizstājot ar 4:2:2 vai 4:2:0).

Video kompresijas standartu izstrādi galvenokārt pārvalda *ITU*, *ISO/IEC*, *SMPTE*, kuru paspārnē darbojas vesela virkne dažādu darba grupu, t.sk. *VCEG* (*Video Coding Experts Group*) [58], *MPEG* (*Moving Picture Experts Group*) [59] [60], *SMTPE VMW* (*VC – 1*) [61], kā arī dažādu organizāciju darba grupu sadarbības komandas, piemēram, *JVT* (*Joint Video Team*), *JCT – VC* (*Joint Collaborative Team on Video Coding*), u.c. Tiek izmantotas arī atvērtā koda kompresijas algoritmu izstrādes iniciatīvas, piemēram, *x264* [62], *x265* [63], Google sponsorētu *WebM* (*VP8/VP9*) [64], Ķīnas Tautas Republikas izstrādāto *AVS* (*Audio Video Standard*) [65], u.tml.

Turpmākās nodaļas galvenokārt ir veltītas tiem video kodēšanas paņēmieniem, kuri ir cieši saistīti ar video attēla kvalitātes ierobežošanu.

1.2.1. Video signālu ieguve, formēšana un kodēšana

Video signāla ieguve sākas ar video materiāla filmēšanu, kur kamerā caur objektīvu uz matricu tiek formēts trīs komponentu analogs *RGB* (*Red, Green, Blue*) signāls. *RGB* signāli tiek konvertēti uz *YCbCr* signāliem, kur atsevišķā kanālā izdala sinhronizāciju un spilgtumu (*Y – luminance*), bet atlikušos divus kanālus atvēl krāsu atšķirībām (*CbCr – chrominance*).

Y kanāla frekvenču joslas platums ir ierobežots līdz 5.75 MHz , bet Cb un Cr signāliem katram kanālam joslas platums ir ierobežots līdz 2.75 MHz . Ciparu signāla formēšanas rezultātā, Y kanālam iztveršanas frekvence (*sampling frequency*) ir 13.5 MHz , bet krāsu atšķirības kanāliem uz pusi mazāka un vienāda ar 6.75 MHz , bet, salīdzinot ar analogo televīziju (*NTSC*, *PAL*, *SECAM*), krāsu izšķirtspējas kanāla josla ir samazināta līdz pat 1.3 MHz [66]. 1.1. tabulā ir apkoptas galvenās jēldatu video signāla tehniskās specifikācijas atbilstoši [67] un [68].

1.1. tabula

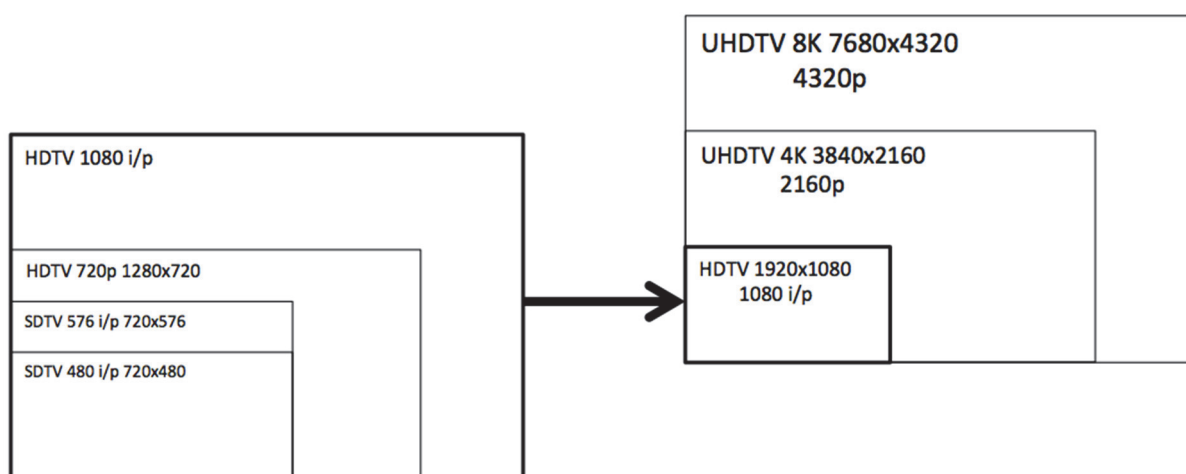
Jēldatu (*RAW*) video signālu tehniskās specifikācijas

		<i>YCbCr</i>			<i>SDTV</i>	<i>HDTV</i>	
		mV	mV/8b	mV/10b	MHz	MHz	MHz
					625/50, 525/60	1250/50	1125/60
R	Y	0 700	0=16 700=235	0=64 700=940	5.75 (13.5 vai 27)	30 (72 vai 144)	30 (74.25 vai 148.5)
G	Cb	+350 -350	+350=240	+350=960	2.75 (6.75 vai 13.5)	15 (36 vai 72)	15 (37.125 vai 74.25)
B	Cr	+350 -350					
			0=128 -350=16	0=512 -350=64	2.75 (6.75 vai 13.5)	15 (36 vai 72)	15 (37.125 vai 74.25)

SDTV signālam pieejamā ekrāna proporcija ir 4:3, bet var būt arī 16:9, divas dažādas puskadru maiņas frekvences 50 Hz vai 60 Hz , kuras pielāgotas atbilstošās valsts elektrotīkla frekvencei, kur 50 Hz gadījumā no 625 līnijām aktīvas ir 576, bet 60 Hz gadījumā no 525 līnijām aktīvas ir 480. Katrai līnijai atbilst 720 pikseļi, piemēram, 576×720 vai 480×720 . *SDTV* nepieciešamais datu pārraides ātrums ir 270 Mb/s ($13.5\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 135\text{ Mb/s} + 6.75\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 67.5\text{ Mb/s} + 6.75\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 67.5\text{ Mb/s}$, summāri $135 + 67.5 + 67.5 = 270\text{ Mb/s}$ izvērstās rindpārleces (*interlaced scanning*) gadījumā). *HDTV* izvērstās rindpārleces 1250/50 gadījumā 1.44 Gb/s , bet 1125/60 attiecīgi 1.485 Gb/s . Savukārt progresīvās rindizvēršanas gadījumā diskretizācijas/nolasīšanas frekvence katram kanālam ir jādubulto, piemēram, *HDTV* 1250/50p gadījumā nepieciešamais datu pārraides ātrums ir 2.88 Gb/s ($144\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 1.44\text{ Gb/s} + 72\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 720\text{ Mbps} + 72\text{ MHz} * 10\text{ Mb/s} = 720\text{ Mb/s}$, summāri $1.44 + 0.72 + 0.72 = 2.88\text{ Gb/s}$). Y kanālam spriegums no 0 mV līdz 700 mV , 8 bitu kodējumā ir no 16 līdz 235, pretstatā *RGB* 8 bitu signālam no 0 līdz 255, bet Cb un Cr kanāliem spriegums ir robežās no $+350\text{ mV}$ līdz -350 mV , kur 8 bitu kodējumā $+350\text{ mV} = 240$, $0\text{ mV} = 128$ un $-350\text{ mV} = 16$.

HDTV signāla ekrāna proporcija ir 16:9, līdzīgi kā *SDTV*, pieejamas dažādas kadru maiņas frekvences 50 *Hz* vai 60 *Hz*. Līniju skaits 1250 (50*Hz*), no kurām 1080 redzamas, bet 1125 (60*Hz*) gadījumā 720 redzamas līnijas, kur katrai līnijai atbilst 1920 pikseļi pirmajā variantā un 1280 pikseļi otrajā variantā, piemēram, 1080x1920 vai 720x1280. Pasaulē *HDTV* ir pieejama vairākās variācijās, piemēram, Eiropā 1080x1920, ASV 720x1280, bet Austrālijā 1080x1440.

Mūsdienās *HDTV* vietu ieņems ultra augstas izšķirtspējas televīzija *UHDTV* (*Ultra High Definition Television*) [69], tandēmā ar tehniskiem parametriem atbilstošu video kodēšanas standartu *HEVC* (*High Efficiency Video Coding*) [70]. 1.3. attēlā ir vizualizētas *SDTV*, *HDTV* un *UHDTV* ekrānu proporcijas un izšķirtspējas. *UHDTV* [69] mēdz dēvēt arī par 4*K* un 8*K*. *SDTV* gadījumā ekrāna proporcijas var būt gan 4:3, gan 16:9, bet *HDTV* un *UHDTV* gadījumos tikai 16:9.



1.3. att. TV ekrānu proporcijas un izšķirtspēja

Atsevišķi ir jāizceļ vairāku kinostudiju (*Metro-Goldwyn-Mayer*, *Paramount Pictures*, *Sony Pictures Entertainment*, *20th Century Fox*, *Universal Studios*, *The Walt Disney Company*, *Warner Bros. Entertainment*) dibināto apvienību *DCI* [71], kuras mērķis ir izstrādāt un specificēt atvērtu ciparu kinostudiju arhitektūru, nodrošinot visiem vienādas tehniskās prasības un kvalitātes kontroli [72]. Šeit ir jāuzsver viens būtisks aspekts, ka ne visas 2*K* un 4*K DCI* izšķirtspējas ir savietojamas ar *UHDTV 4K*, kā arī proporcionāli konvertējamas (*upscale* un *downscale*) uz mazāku vai lielāku izšķirtspēju specifikācijām, skatīt 3. pielikumā.

Darba ietvaros aktuālās datoru, TV ekrānu un mobilā aprīkojuma izšķirtspēja, t.sk. ekrāna proporcija, pikseļu skaits un pielietojums, ir atlasītas 1.2. tabulā, pārējās skatīt 3. pielikumā. Ne visas izšķirtspējas un ekrāna proporcijas ir savstarpēji savietojamas, tāpēc,

veicot dažādu izšķirtspēju un ekrāna proporciju salāgošanu, var būtiski pazemināt video kvalitāti. Piemēram, mazāka izmēra ekrānam paredzēta video attēla proporcionāla izstiepšana uz lielāka izmēra ekrāna samazinās kopējo attēla asumu, parādīsies izplūdušas un kantainas objektu kontūras. Savukārt neproporcionāla video attēla izstiepšana (*upscale*) uz lielāka ekrāna vai saspiešana (*downscale*) uz mazāka ekrāna var radīt būtiskus attēla kvalitātes zudumus, piemēram, attēla horizontālo vai vertikālo objektu ģeometriskos kropļojumus.

1.2. tabula

Datoru un TV ekrānu izmērs un proporcijas

Ekrāna HxV izmērs	Ekrāna proporcija	Pielietojums*	Apzīmējums
352×288	4:3	TV	<i>CIF</i>
720×480	4:3 un 16:9	TV	<i>NTSC (DV)</i>
720×576	4:3 un 16:9	TV	<i>PAL (DI/DV)</i>
1280×720	16:9	TV	<i>HDTV 720</i>
1440×1080	16:9	TV	<i>AVCHD</i>
1920×1080	16:9	TV	<i>HDTV 1080</i>
320×200	16:10	PC	<i>CGA</i>
640×480	4:3	PC	<i>VGA</i>
854×480	16:9	PC	<i>WXGA</i>
1440×960	3:2	PC	<i>WXGA</i>
2560×2048	5:4	PC	<i>QSXGA</i>

*TV – televīzija un video aprīkojums, PC – datora monitori

1.3. tabulā ir apkopotas *SDTV* un *HDTV* ciparu komponentu signālu *YCbCr* uz *RGB* un *RGB* uz *YCbCr* konvertācijas.

1.3. tabula

YCbCr-RGB-YCbCr signālu konvertācija

SDTV [67]														
Y	=	16	+	0.257	0.504	0.098	*	R	=	1.164	0.000	1.596	*	Y-16
Cb		128		-0.148	-0.291	0.439		G		1.164	-0.392	-0.813		Cb-128
Cr		128		0.439	-0.368	-0.071		B		1.164	2.017	0.000		Cr-128
HDTV [68]														
Y	=	16	+	0.183	0.614	0.062	*	R	=	1.164	0.000	1.793	*	Y-16
Cb		128		-0.101	-0.339	0.439		G		1.164	-0.213	-0.533		Cb-128
Cr		128		0.439	-0.399	-0.040		B		1.164	2.112	0.000		Cr-128

1.3. tabulā RGB [0...255], Y [16...235], un $CbCr$ [16...240]. Atpakaļ savietojamībai ar analogās sistēmas video aprīkojumu gan spilgtuma, gan krāsu atšķirību komponentēm 8 un 10 bitu kodējumā netiek izmantoti visi atvēlētie biti, skatīt 1.1. tabulā, atsevišķi no tiem ir rezervēti sinhronizācijai, piemēram, *SAV* (*Start of Active Video*), *EAV* (*End of Active Video*) signālu pārraidei. Savukārt darbam tikai ar grafiskajām programmām, parasti tiek izmantota pilna diapazona ciparu signālu pārveidošana, skatīt 1.4. tabulā.

1.4. tabulā ir apkopota pilna diapazona (*full range*) ciparu signālu $YCbCr$ uz RGB un RGB uz $YCbCr$ pārveidošana, kur RGB [0...255] un $YCbCr$ [0...255].

1.4. tabula

Pilna diapazona $YCbCr$ - RGB - $YCbCr$ signālu konvertācija

Y	=	0	+	0.299	0.587	0.114	*	R	=	1.000	0.000	1.400	*	Y
Cb	=	128	+	-0.169	-0.331	0.500	*	G	=	1.000	-0.343	-0.711	*	Cb-128
Cr	=	128	+	0.500	-0.419	-0.081	*	B	=	1.000	1.765	0.000	*	Cr-128

1.5. tabulā ir apkopota analogā komponentā signāla pārveidošana $YPbPr$ uz RGB un RGB uz $YPbPr$, kur RGB [0...255], Y [0...255], un $PbPr$ [-127.5...+127.5].

1.5. tabula

$YPbPr$ - RGB - $YPbPr$ signālu konvertācija

SDTV [67]												
Y	=	0.299	0.587	0.114	*	R	=	1.000	0.000	1.402	*	Y
Pb		-0.169	-0.331	0.500		G		1.000	-0.344	-0.714		Pb
Pr		0.500	-0.419	-0.081		B		1.000	1.772	0.000		Pr
HDTV [68]												
Y	=	0.213	0.715	0.072	*	R	=	1.000	0.000	1.575	*	Y
Pb		-0.115	-0.385	0.500		G		1.000	-0.187	-0.468		Pb
Pr		0.500	-0.454	-0.046		B		1.000	1.856	0.000		Pr

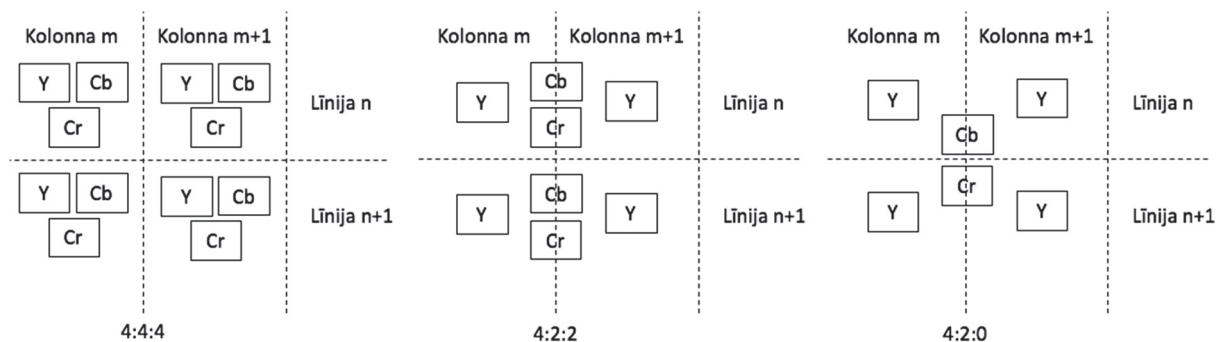
Turpinājumā, par kompresiju bez zudumiem (*lossless*) un ar zudumiem (*lossy*), bet sevišķi uzsverot kompresiju ar zudumiem (*lossy*), jo tieši šīs metodes var dēvēt par video attēla kvalitātes ierobežošanu:

- 10 bitu izšķirtspēju aizstāt ar 8 bitu izšķirtspēju (ar zudumiem);
- samazināt krāsu izšķirtspēju no 4:4:4 uz 4:2:2 vai 4:2:0 (ar zudumiem);
- *DCT* (*Discrete Cosine Transform*) kvantēšana (ar zudumiem);
- horizontālās un vertikālās sinhronizācijas līnijas (bez zudumiem);
- *DPCM* (*Differential Pulse Code Modulation*) (bez zudumiem);

- Zig-zag skenēšana ar *VLC (Variable Length Coding)* (bez zudumiem);
- Hafmaņa kodēšana (bez zudumiem).

Izmantojot *ADC (Analog Digital Converter)* ar 8 bitu vai 10 bitu izšķirtspēju, dod iespēju samazināt kopējo datu pārraides ātrumu par 20 % ($(10 - 8) / 10 = 0.2$). 8 bitu *ADC* kvantēšanas troksnis ir lielāks par 10 bitu *ADC*. Šo atšķirīgo kvantēšanas trokšņa pieaugumu cilvēka vizuālā uztvere gandrīz nemana. Ja video signāla baltās krāsas *SNR* ir ≥ 48 dB, tad trokšņa līmenis ir zem cilvēka acs uztveres jūtības sliekšņa [66].

Samazinot horizontālo līniju krāsu izšķirtspēju, tiek formēts 4:2:2 signāls, bet papildus, samazinot vertikālo līniju krāsu izšķirtspēju, tiek formēts 4:2:0 signāls, skatīt 1.4. attēlā. Šādi paņēmieni ļauj samazināt kopējo datu pārraides ātrumu par 15 – 25 %.

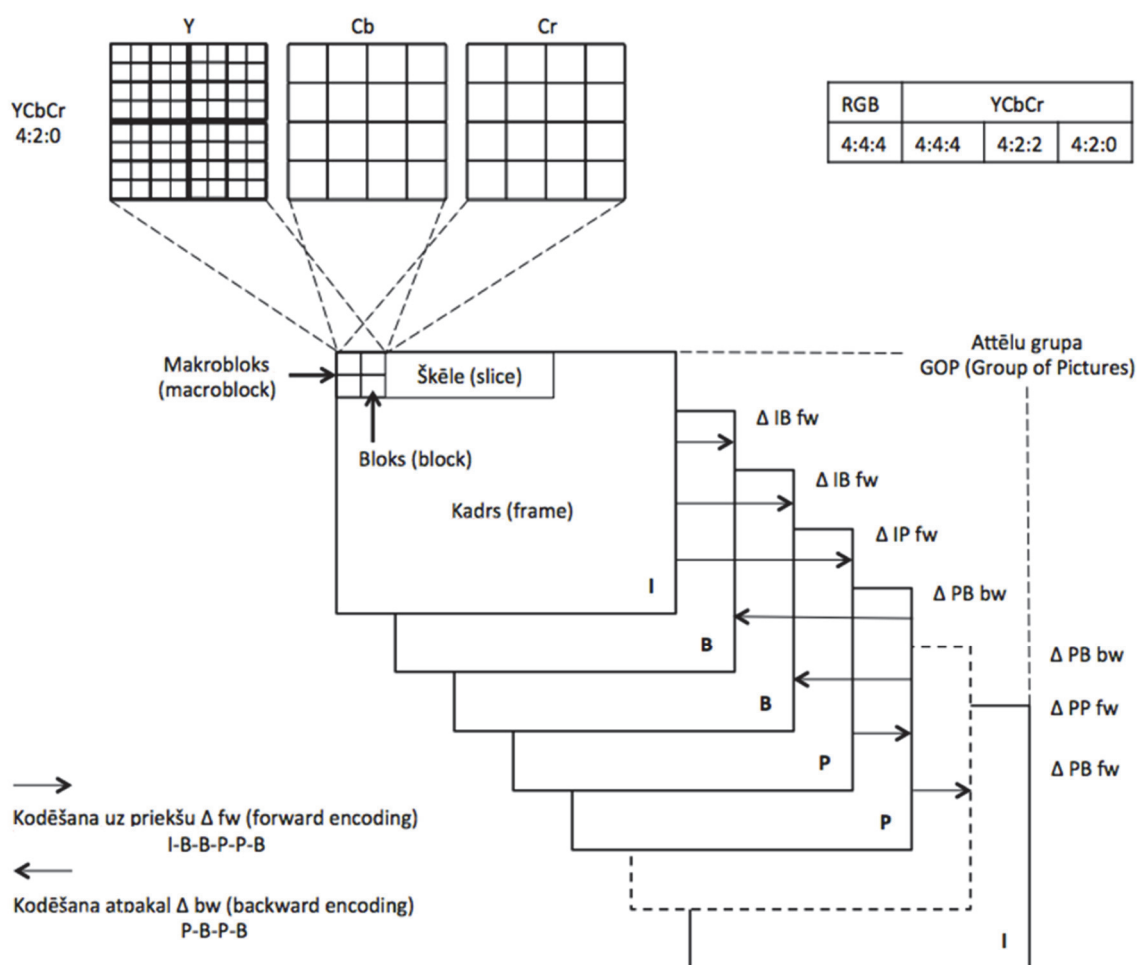


1.4. att. Izšķirtspēja 4:4:4, 4:2:2 un 4:2:0

Vienam aiz otra secīgiem video attēliem bieži vien ir ļoti nelielas atšķirības, kur uz nekustīga vai mazkustīga fona ir atrodamī dažādi kustīgi objekti. Ļoti bieži uz šī stacionārā fona objekti maina savu atrašanās vietu vai pozīciju, ik pa brīdim no kadra pazūd un parādās jauni objekti. Lai samazinātu kopējo datu pārraides ātrumu, starp video attēliem tiek pārraidītas tikai izmaiņas *DPCM (Differential Pulse Code Modulation)*. Izmantojot klasisko *DPCM* metodi, pēc pārraides, iekārtu izslēgšanas un ieslēgšanas vai pārraides kļūdu ietekmē, var prasīt ļoti ilgu laiku, atjaunojot sākotnējo signālu. Lai minimizētu *DPCM* aiztures, tiek izmantota video attēlu dalīšana kadru grupās *GOP (Group of Pictures)*.

Skatīt 1.5. attēlā, kur apzīmējums *GOP* ir attēlu grupa *GOP (Group of Pictures)*, *I* kadrs ir starpkadru kodēts attēls (*intra frame encoded picture*), *P* kadrs ir nākamā kadra “prognoze” (*“predicted” forward encoded picture*), *B* kadrs ietver nākamā kadra prognozi un informāciju par bijušo kadru (*“bidirectional” encoded picture*).

Vispirms attēls tiek sadalīts blokos, piemēram, 16×16 vai 8×8 pikseļi, blokus apvieno makroblokos. Vienā kadrā ietilpst liels skaits makrobloku. Vispirms tiek izveidots *I* kadrs, kas satur informāciju par visu attēlu. Starp diviem *I* kadriem tiek pārraidīti starpību kadri *B* un *P* kadri. Atšķirības starp kadriem tiek meklētas makrobloku līmenī, skatīt 1.6. attēlā. Izmaiņas starp kadriem kodē ar kustību vektoru. Ja izmaiņas ir bijušas, tad pārraida kustību vektoru, ja izmaiņu nav, tad dati netiek pārraidīti.

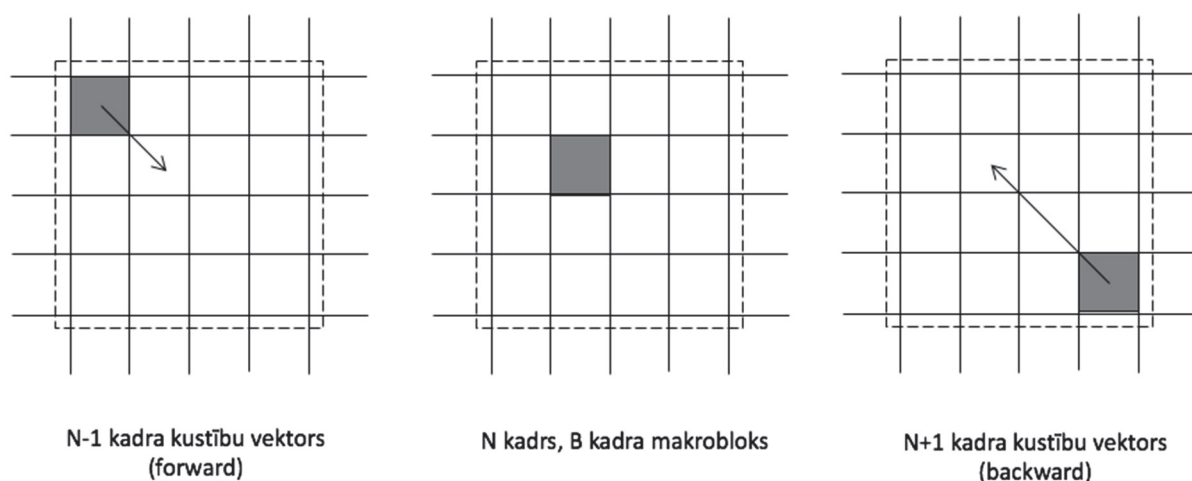


1.5. att. Bloks, makrobloks, šķēle, kadrs un attēlu grupa *GOP* (*I*, *P*, *B*)

Kustību attēlā novērtē pēc notikušajām izmaiņām kadrā, vispirms izmaiņas tiek meklētas *P* kadrā, tad *B* kadrā. Izmaiņas tiek meklētas nevis visā kadrā, bet noteiktā makrobloku meklēšanas apgabalā, skatīt 1.6. attēlā. Minētās kustību izmaiņas tiek kodētas, izmantojot *DCT* (*Discrete Cosine Transform*). *GOP* parasti sastāv no 12 kadru virknes, kur starp *I* un *P* kadriem izvietoti *B* kadri, piemēram, $I_0, B_1, B_2, P_3, B_4, B_5, P_6, B_7, B_8, I_9$ [73]. Jo garāka *GOP* virkne, jo augstāka kompresijas pakāpe. Video sižeti ar statiskām ainām izvēlas garāku *GOP* virkni, bet dinamiskiem video sižeti ar kustīgām ainām izvēlas īsāku *GOP* virkni. Ja sekundes laikā

video sižetam ir 2-4, vai vairāk kustību izmaiņu, tad šo video sižetu var uzskatīt par dinamisku. Parasti *PAL* gadījumā izmanto 12 kadru *GOP*, bet *NTSC* gadījumā 15 kadru *GOP*. Tipiskiem video sižetiem izvēlas *GOP* virkni ar diviem *I* kadriem sekundē.

GOP kadru veidošanas principus, izmantojot kustības vektorus, skatīt 1.6. attēlā. Kustību izmaiņas sižetā identificē, izmantojot *BMA* (*Block Matching Algorithm*), un izmaiņas tiek aprakstītas ar kustību vektoriem. Dekodējot izmanto *I* kadru un *P* vai *B* kadru kustību vektorus, vadoties pēc kuriem tiks sintezētas kustību izmaiņas video sižetā.



1.6. att. *GOP* kadru struktūras kustību vektori

Izmantojot augstu attēlu kompresijas pakāpi ap smalkas struktūras objektiem, var veidoties ar cilvēka aci ļoti saskatāmas kodēšanas makrobloku apmales (*blocking*). Redzami kodēšanas bloki samazina video kvalitātes vērtējumu. Lai uzlabotu video kvalitāti, *H.264 AVC P10* izmanto speciālu (*In Loop*) filtru, skatīt 8. pielikumā. Izmantojot šo pašu filtru, atsevišķos gadījumos tiek uzlabota arī objektīvā video kvalitāte, piemēram, samazinot video pārraides ātrumu par 7 – 9 %, tiek iegūta gandrīz vai identiska *PSNR* vērtība [66].

H.264/AVC P10 kodētāja blokshēmu, kodēšanas bloku maskēšanas filtra uzbūvi, kā arī kodēšanas profilus un līmeņus skatīt 8. pielikumā.

Video kodēšanas tehnoloģijas bez zudumiem – *DPCM* (*Differential Pulse Code Modulation*), (*Zig-zag scanning*) skenēšana ar *VLC* (*Variable Length Coding*) un Hafmaņa kodēšana) – darbā detalizēti netika iztirzātas, jo oriģināls signāls ir atjaunojams bez zudumiem, līdz ar to tas nevar ietekmēt video kvalitātes subjektīvo vai objektīvo novērtējumu.

Kā jau tas tika iepriekš uzsvērts, tad video signālu kompresijas mērķis ir maksimāli samazināt pārraidāmo datu apjomu, bet saglabājot pēc iespējas augstāku video attēla kvalitāti. Lai to varētu noskaidrot tiek izvirzīti sekojoši darba uzdevumi, skatīt 4. nodaļā:

1. Veikt video signālu un interfeisu kvalitātes novērtēšanu: komponentais ciparu (*YCbCr 1080i*), komponentais analogais (*YPbPr 720p*), kompozītais (*YIQ 576p*);
2. Veikt sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanu 1080i un 576p video signāliem, izmantojot komponento *YCbCr* un kompozīto *YIQ* video interfeisu.

Turpmākajā nodaļā ir atsevišķi izdalīts un aprakstīts *MPEG* video plūsmas veidošanas princips, pakošana un sagatavošana pārraidei (straumēšanai vai apraidei).

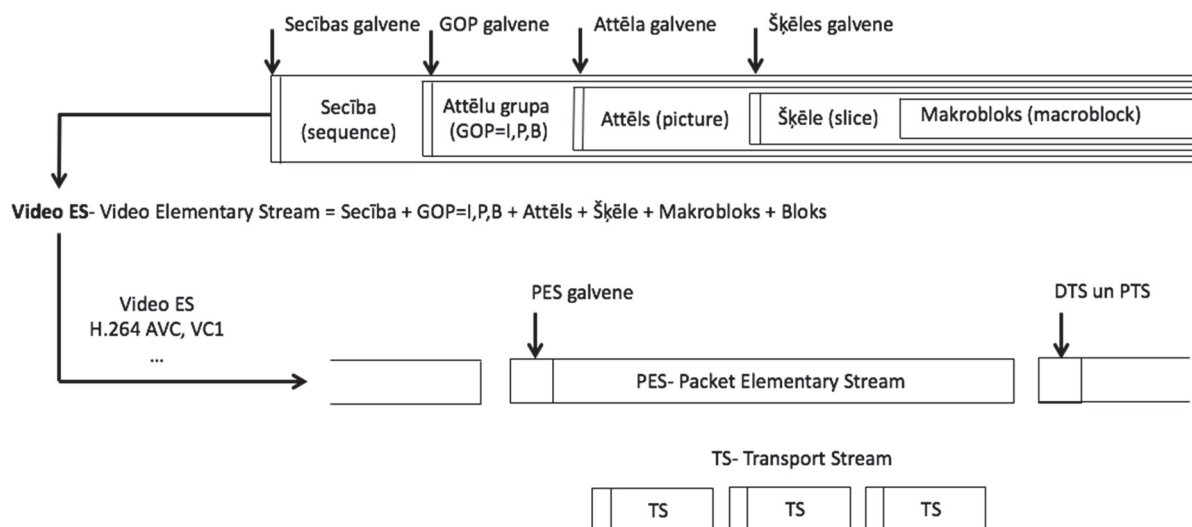
1.2.2. Video plūsma, pakošana un konteineri

Lai sagatavotu datus informācijas pārraidei, ir jāveic vairākas darbības: vispirms video kodētāja izejas dati ir jāuzglabā datu nesējā, iepakojot tos piemērotā konteinerā, tad jāveic dažādu video, audio un datu plūsmu multipleksēšana, galarezultātā, pirms informācijas pārraides, multipleksētie dati ir jāsadala izvēlēto pārraides tehnoloģiju datu vienībās, piemēram, *IP/RTP/MPEG – TS* paketēs. Turpmāk tekstā par video plūsmu veidošanu, pakošanu un to apvienošanu konteineros.

Turpmāk tekstā tiks aprakstīti svarīgākie *MPEG* video plūsmu veidošanas, pakošanas un to apvienošanas konteineros principi. Vispirms galvstacijas *MPEG* kodētāji izveido video, audio un datu elementārplūsmas *ES* (*Elementary Stream*), kuras tiek sadalītas *PES* (*Packetized Elementary Stream*) elementārplūsmu paketēs, skatīt 1.7. attēlā.

Kompresēta video, audio un kompresētu vai nekompresētu datu plūsmu, sauktu par *ES* (*Elementary Stream*), sadala mainīga izmēra paketēs, kuras dēvē par *PES* (*Packetized Elementary Stream*), skatīt 1.7. attēlā. *PES* paketes derīgās slodzes apjoms var būt līdz 64 KBaitiem vai lielāks, bet dienesta informācijas galvenes apjoms 6 Baiti. Galvenes pirmo 3 Baitu kods “*start code prefix*” apzīmē *PES* paketes sākumu, nākamais 1 Baita kods “*stream ID*” atļauj identificēt *ES* veidu *PES* paketes derīgajā slodzē (audio, video vai datu *ES*), un pēdējais 2 Baitu kods “*packet length*” norāda uz baitu skaitu paketē. Pēc šiem 6 Baitiem var sekot papildus galvene “*optional PES header*”, kurā *PTS* (*Presentation Time Stamps*) un *DTS* (*Decoding Time Stamps*) ir *MPEG* kodētāja, 27 MHz oscilatora radīta *STC* (*System Time Clock*) 42 bitu skaitītāja bitu virkne, kura nepieciešama dekoderim video un audio plūsmu savstarpējai sinhronizācijai (*lip sync, lip synchronization*).

PES paketes nav piemērotas apraidei vai straumēšanai, tāpēc tās tiek sadalītas mazās fiksēta izmēra paketēs, parasti 184 Baiti ($188 + 4$), sauktas par transporta plūsmu paketēm *MPEG – TS*. Pēc visu *PES* video, audio un datu plūsmas sadalīšanas *TS* paketēs, tās saturiski tiek apvienotas vai multipleksētas vienā *TS* plūsmā, piemēram, vienam televīzijas kanālam, var būt dažādas kvalitātes kodējuma video un audio kanāli, kā arī audio un teleteksts var būt dažādas valodās, skatīt 1.10. attēlā.



1.7. att. Video plūsmas un pakešu veidošanas process

1.7. attēlā ir vizualizēts, kā no kodētas video plūsmas iegūst paketes, bet 1.10. attēlā ir ilustrēts dažādu video plūsmu multipleksēšanas process, savukārt 1.11. attēlā ir parādīti dažādi pakešu inkapsulācijas un straumēšanas varianti. Katras individuālas video plūsmas veidošanas rezultātā tiek radītas individuālas video plūsmu *TS* paketes, bet, apvienojot vairāku video, audio un datu plūsmas vienotā plūsmā, tiek radītas *TS* paketes multipleksētai plūsmai.

Multipleksēto plūsmu pārraida (straumē vai apraida) vai arī uzglabāt datu nesējā. Video, audio, kā arī citas informācijas datu strukturēšanai un uzglabāšanai datu nesējā ir nepieciešami specifiski ciparu datu konteineri, turpmāk tekstā – konteineri. Konteineri parasti ir specializēti konkrētas multimediju informācijas datu tipam (video, audio, attēls, u.tml.), piemēram, audio dati audio konteineros (*mp3*, *m4a*, *wav*, *wma*, *ogg*), un video dati video konteineros (*mp4*, *ts*, *mov*, *avi*, *flv*, *ogg*).

Darba ietvaros izmantoto video konteineru un kodētāju apkopojumu skatīt 1.6. tabulā, pārējie plaši izmantotie konteineri apkopoti 6. pielikumā.

Video konteineri un kodētāji

Izstrādātājs	Konteineris	Kodētājs
<i>MPEG, ISO/IEC, ITU</i>	<i>MPEG – TS</i>	<i>MPEG – 2 P2, MPEG – 4 P2</i>
	<i>TS</i>	<i>H.264 AVC P10</i>
	<i>MPEG – 4 P14</i> <i>MP4</i>	<i>x264</i> <i>x265</i>
<i>Apple Inc.</i>	<i>QTFF – QuickTime File Format; MOV</i>	<i>Apple Video; QuickTime Graphics; ProRes, MPEG – 4 P2, H.264 AVC P10</i>
<i>Microsoft</i>	<i>ASF – Advanced Systems Format un AVI – Audio Video Interleaved; ASF, AVI</i>	<i>VC – 1/ SMPTE 421M</i> <i>WMV</i> <i>x264</i>

Vairums video konteineru atbalsta jebkāda veida video, audio, subtitru un metadu pievienošanu. Vispasaules popularitāti guvušā, *MPEG* video kodētāju un konteineru alternatīvas no brīvpieejas un bezmaksas atvērtā koda iniciatīvām, tā saucamiem bez autoratlīdzības (*royalty-free*) video kodētājiem un konteineriem skatīt 6. pielikumā.

Video plūsmu pakošana konteineros un multipleksēšana var ietekmēt video kvalitātes vērtējumu – jo lielāka izmēra video pakete tiek zaudēta, jo vairāk strukturāli atšķirīgus vizuāli redzamu artefaktu varēs novērot. Lai sašaurinātu darba pētījuma loku, potenciālie eksperimenti netika iekļauti promocijas darba uzdevumos, tāpēc visos darba eksperimentos izmantoti *MPEG – TS* konteineri un multipleksēšana, skatīt 4. nodaļu.

1.3. Video pārraides tehnoloģijas pakešu tīklos

Televīzijas tehnoloģiju ēras pirmsākumi ir meklējami 19. gs. nogalē un 20. gs. sākumā, bet par publiskās televīzijas izplatības aizsākumu varētu minēt 1930.–1940. gadus. Elektromehāniskos prototipus nomainīja elektroniskie televizori ar katodstaru lampu displeju *CRT (Cathod-Ray Tube display)*. Melnbalto televīziju 1960. – 1970. gados nomainīja krāsu televīzija. Vairāku desmitu gadu garumā dominēja divi galvenie analogās televīzijas standarti: 625 rindu sistēma ar 50 *Hz* puskaдру nomainīšanas ātrumu sekundē *FPS (Fields per Second)* un 525 rindu sistēma ar 60 *Hz* puskaдру atkārtosšanās frekvenci. Krāsas, spilgtuma un sinhronizācijas signālu pārraidei izmantoja trīs pārraides standartus: *PAL (Phase Alternating Line)*, *NTSC (National Television Standards Committee)* un *SECAM (Sequential Color with*

Memory). *NTSC* galvenokārt izmanto ASV, Kanāda un Japāna, bet *PAL/SECAM* standartus izmantoja Eiropas valstis, kā arī tie bija izplatīti citur pasaulē.

Analogo televīziju 2000. – 2010. gados vairums valstīs nomainīja ciparu televīzija, analogo teletekstu atsevišķās valstīs nomainīja ciparu teleteksts *MHP (Multimedia Home Platform)* [74], kā arī vesela virkne citu televīzijas pakalpojumu, piemēram, *EPG (Electronic Program Guide)*, *VoD (Video on Demand)*, vienam video (televīzijas programmai) dažādu skaņas celiņu/valodu/subtitru izvēles iespējas. Laika periodā no 2010. gada līdz 2015. gadam ir novērojama ļoti strauja tehnoloģiju attīstība, kur standarta izšķirtspējas televīziju *SDTV (Standard Definition Television)* pakāpeniski nomaina augstas izšķirtspējas televīzija *HDTV (High Definition Television)*, paralēli tirgū arvien vairāk ieplūst *UHDTV (Ultra High Definition Television)* produkti, novērojama divdimensiju (*2D*) un trīsdimensiju televīzijas (*3D*) līdzāspastāvēšana.

Pēdējos gados popularitāti ir iekarojuši dažādi televīzijas interaktīvie pakalpojumi, piemēram, *PVR (Personal Video Recorder)*, līdzdalība TV raidījumos (balsošana, komentēšana, čatošana, zibenīga informācijas izvietošana sociālajos tīklos, u.tml.). Interaktīvajai televīzijai ir nepieciešams divvirzienu sakaru kanāls, tomēr vairums klasiskās televīzijas apraides tehnoloģiju, piemēram, *DVB – T/S* to nenodrošina. Nereti kāda no interneta piekļuves tehnoloģijām var kalpot kā atgriezeniskās saites augšupielādes kanāls *DVB RCT/RCS (Return Channel Terrestrial/Satellite)* [75].

Tā kā video straumēšanai Internetā jau pašos pirmsākumos izmanto *IP* protokolu [76], tad pēdējos gados pat klasisko *DVB – x* televīzijas apraides tehnoloģiju atsevišķos tehniskos risinājumos arvien vairāk tiek izmantots *IP* protokols, piemēram, *IP over DVB* vai *IP over MPEG*, specificētu kā *MPEG MPE (Multiprotocol Encapsulation)* daudzu protokolu inkapsulāciju [77] vai [78]. Šajā gadījumā daudzu protokolu inkapsulācija nodrošina *IP* pakešu pārraidi, izmantojot esošo *DVB* infrastruktūru, kuru var izmantot kā lejupielādes kanālu interneta piekļuvei. Arī šis ir viens no argumentiem par labu tam, ka darbā galvenās pētījuma aktivitātes ir cieši saistītas ar video pārraides tehnoloģijām, izmantojot *IP* protokolu.

1.4. Ciparu video pārraides tehnoloģijas

Ciparu video pārraides tehnoloģijas ir iespējams iedalīt divās lielās grupās – *DVB (Digital Video Broadcasting)* apraides (*broadcast*) tehnoloģijas un *IP (Internet Protocol)* straumēšanas (*streaming*) tehnoloģijas. Atsevišķi var izdalīt mobilās TV tehnoloģijas,

izmantojot *4G LTE (Long Term Evolution)* tīklus ar *eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Services)* kurā ir apvienotas apraides un straumēšanas tehnoloģiju priekšrocības.

DVB apraides tehnoloģiju izpēte ir ārpus darba mērķa, bet tās tiks iztirzātas tik lielā mērā, cik tās tehnoloģiski ir radniecīgas un video pārraides procesā saistītas ar IP video straumēšanas tehnoloģijām. *DVB (Digital Video Broadcasting)* vai ciparu video apraides tehnoloģiju saimi skatīt 1.7. tabulā. *IPTV* straumēšanas un *DVB* apraides tehnoloģijās bieži izmanto vienotus video kodēšanas un pārraides standartus, piemēram, kodēšanai *MPEG – 2/H.262* vai *MPEG – 4/H.264 AVC* un pārraidei *MPEG – TS*.

1.7. tabula

DVB apraides tehnoloģijas

Tehnoloģijas	Komentāri
<i>DVB – T/T2</i>	<i>DVB – Terrestrial</i> (zemes apraide), jaunais standarts T2
<i>DVB – S/S2</i>	<i>DVB – Satellite</i> (satelīta apraide), jaunais standarts S2
<i>DVB – C/C2</i>	<i>DVB – Cable</i> (kabeļa apraide), jaunais standarts C2
<i>DVB – H</i>	<i>DVB – Handheld</i> (apraide mobilajā ierīcē)
<i>DVB – SH</i>	<i>DVB – Satellite services to Handhelds</i> (satelīta apraide mobilajā ierīcē)
<i>DVB – NGH</i>	<i>DVB – Terrestrial and satellite transmissions to handhelds</i> (zemes un satelīta apraide mobilajā ierīcē)
<i>HbbTV</i>	<i>Hybrid Broadcast Broadband TV</i> (hibrīda apraides platjoslas TV)

IETF (Internet Engineering Task Force) ir izstrādājusi veselu virkni internetam piemērotus protokolus, kuri nodrošina reālā laika video un audio datu straumēšanu, izmantojot IP protokolu: *RTP [79] (Real-time Transport Protocol)*, *RTCP [79] (RTP Control Protocol)*, *RTSP [80] (Real Time Streaming Protocol)*, kā arī to šifrētos analogus: *SRTP [81] (Secure RTP)* un *SRTCP [81] (Secure RTCP)*. *RTSP* protokols ir jaunākas versijas izstrādes stadijā, visticamāk, jaunā protokola versija tā arī netiks radīta, jo pēdējā desmitgadē ievērojamu popularitāti ir guvuši vairāki tīmekļa orientēti alternatīvi risinājumi, piemēram, *Apple HLS*, *Adobe HDS*, *MPEG – DASH* un *Microsoft WMSP*, skatīt 1.8. tabulā. Pēdējos gados ļoti strauju popularitāti gūst video straumēšana, izmantojot tīmekļa pārlūkus, tāpēc *W3C (World Wide Web Consortium)* sadarbībā ar *WHATWG (Web Hypertext Application Technology Working Group)* ir izstrādājuši uzlabotu *HTML5* protokola versiju, kura ir piemērota reālā laika video straumēšanai Internetā un nodrošina integrāciju ar tīmekļa pārlūku. Straumēšanas protokolu migrācija tīmekļa vidē kalpoja kā katalizators tā saucamajām bez autoratlīdzības (*Royalty-free*)

un brīvpieejas atvērtā koda (*Open-source*) video konteineru un kodētāju izstrādes iniciatīvām, piemēram, *Google WebM* konteineris ar *VP8/9* video, *Cisco OpenH264*, kā arī *Theora*, *Matroska*, *Ogg*, skatīt 6. pielikumā.

1.8. tabula

IP straumēšanas un vadības protokoli

Izstrādātājs	Protokols	
<i>MPEG</i>	<i>MPEG – TS</i>	ISO/IEC, MPEG un ITU [82]
<i>IETF</i>	<i>RTSP/RTP</i>	IETF [80]
<i>Apple Inc.</i>	<i>HLS</i>	[83]
<i>MPEG</i>	<i>DASH</i>	[84], ISO/IEC, MPEG
<i>Adobe Inc.</i>	<i>HDS</i>	[85]
<i>Adobe Inc.</i>	<i>RTMP</i>	[86]
<i>Microsoft</i>	<i>WMSP</i>	[87]

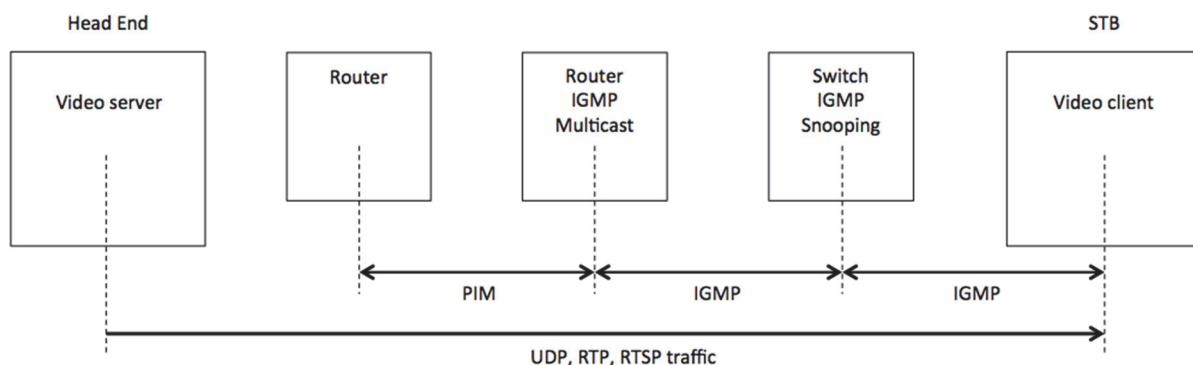
IPTV vai interneta *TV* un *OTT* (*Over the Top Technology*) tīkla risinājumos var izdalīt trīs elementus – galvstacija *HE* (*HeadEnd*), dekoderis *STB* (*Set-top-Box*) un *TV* displejs. *HE* vienmēr būs fiziski nodalīta iekārta (programmatūra un aparatūra), bet *STB* un *TV* var būt gan kā divas nodalītās iekārtas, gan kā viena apvienota iekārta, piemēram, planšetdators vai mobilā ierīce ar atbilstošu programmatūru video dekodēšanai un attēlošanai, tādējādi dekoderis un displejs var būt apvienots vienā ierīcē.

IPTV un *OTT* video satura piegādei izmanto internetu, kur *IPTV* parasti tiek piedāvāti *ISP* (*Internet Service Provider*) tīkla ietvaros ar zināmu *QoS* (*Quality of Service*) garantiju, bet *OTT* video saturs var tikt straumēts no jebkura publiskā interneta pieslēguma ar nezināmu *QoS* garantiju, ko mēdz dēvēt arī par *best-effort* servisu. Ja kādā no tīkla posmiem rodas pārslodzes, tad tās izraisa tīkla datu plūsmas aizturi, trīci un pat pakešu zudumus, kā rezultātā var samazināties pārraidītā video kvalitāte. Līdz zināmai robežai šo pakešu aizturi un trīci var kompensēt ar buferatmiņas palīdzību – atskaņošanas iekārtā pirms dekodēšanas un attēlošanas veic uztverto video datu uzkrāšanu buferatmiņā, parasti vairākas simts milisekundes. Ja atskaņošanas iekārtai vai programmatūras buferatmiņai ir atvēlētas vairākas sekundes vai pat desmitiem sekunžu, tad ar tās palīdzību ir iespējams kompensēt ievērojami lielas pakešu aiztures un trīces, bet pakešu zuduma problēmu buferizācija neatrisina. Jārēķinās ar to, ka, izveidojot lielu buferatmiņu gala iekārtās, problēma netiks atrisināta, jo visi tīkla starpposma mezgli komutācijas un maršrutēšanas vajadzībām arī izmanto buferatmiņu, kura vienmēr ir

ierobežota un katram tīkla mezglam atšķirīga apjoma, tāpēc, rodoties tīkla pārslodzēm un aizpildoties buferatmiņai, rodas pakešu zudums. Pakešu zudumus izraisa tīkla pārslodzes vai pakešu bojājumi.

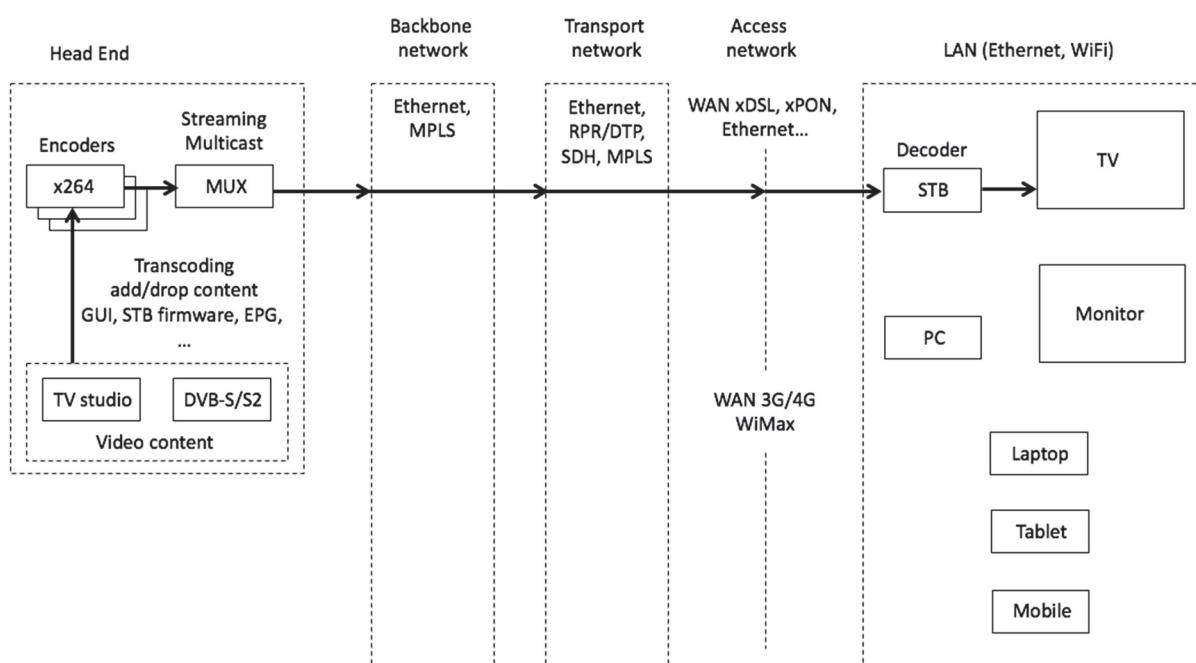
Mobilās televīzijas tehnoloģiju attīstības ciklā ir radītas vesela virkne tehnoloģiju, piemēram, *DVB – H/SH*, *MediaFLO*, *ATSC – M/H*, *DMB*, *ISDB Iseg*, *CMMB*, u.c. Neviena no tām tā arī nav kļuvusi populāra, vairums no tām ir ieviestas tikai noteiktos pasaules reģionos, bet viena daļa no tām jau ir beigušas pastāvēt. Atsevišķi ir vērts izdalīt *3GPPP* standartizēto *3G UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)* un *4G LTE (Long Term Evolution)* tīkliem izstrādāto *MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services)*. *4G LTE Broadcast* ir mobilā pakešu pārraides tehnoloģija, kur *MBMS* ir speciāli izdalīts kanāls televīzijas signālu apraidei un straumēšanai, saukts par *MBSFN (Multicast-Broadcast Single Frequency Network)*. *MBSFN* ir kā alternatīva *DVB* līdzīgām apraides tehnoloģijām, bet ar vienu ļoti būtisku priekšrocību: *MBSFN* apraidei nav nepieciešams specifisks licencējams frekvenču diapazons, tā var izmantot *LTE broadcast* pārraidei izdalīto frekvenču diapazonu. *MBSFN* radio daļā nodrošina SFN (*Single Frequency Network*) pārraidi līdzīgi kā *DVB – T/T2*, bet *IP* tīkla daļā multirāides pārraidi līdzīgi kā *IPTV*. Mobilās TV uztveršanai nepieciešama standarta *LTE* ierīce ar *MBSFN* aplikāciju, nekāda cita specifiska aparatūra vai programmatūra nav nepieciešama, līdz ar to šo tehnoloģiju tandēmu padarot finansiāli izdevīgu operatoriem un lietotajām pievilcīgu patērētājiem. *MBSFN* konkurenti varētu būt dažādi neatkarīgie *TV* satura izplatītāji, kuri, izmantojot *LTE* datu pārraides infrastruktūru, nodrošinās *OTT (Over The Top)* video, audio un televīzijas pakalpojumu piegādi. Iespējams, ka tieši Eiropā un vairums citos pasaules reģionos *MBSFN* arī varētu kļūt par vienu no vadošajām tehnoloģijām mobilās TV apraidē.

IPTV tīklos multirāides datu plūsmas maršrutēšanai var izmantot kādu no *PIM (Protocol Independent Multicast)* protokola paveidiem, piemēram, *PIM – SSM (Source-Specific Multicast)*. Multirāides datu plūsmas vadībai starp klientu un tam tuvāko multirāides maršrutētāju *IPv4* tīklos izmanto *IGMP (Internet Group Management Protocol)*, bet *IPv6* tīklos *MLD (Multicast Listener Discovery)* vai *ICMPv6 (Internet Control Message Protocol)*. Savukārt multirāides datu plūsmas izplatīšanai starp komutatoriem izmanto *IGMP* pavairošanu (*snooping*). *IP* multirāides arhitektūra ilustrēta 1.8. attēlā.



1.8. att. IP multiraides tīkla arhitektūra

Multiraides ziņojumu aizkaves tīklā izraisa pakešu aizture un trīce. *IPTV* tīklos šīs *IGMP* ziņojumu aizkaves sauc par video kanāla pārslēgšanās laiku (*Channel Zapping Time*) [88]. Lielas un nevienmērīgas multiraides ziņojumu aizkaves var atstāt būtisku ietekmi uz lietotāja pakalpojuma kvalitātes novērtējumu *MOS* (*Mean Opinion Score*) [89], tā dēvēto *QoE* (*Quality of Experience*) rādītāju [90]. Efektīvs un vienkāršs risinājums ir marķēt *IGMP* ziņojumus, piešķirot tiem augstākas prioritātes *CoS* (*Class of Service*) un *QoS* (*Quality of Service*). *IPTV* pārraides kvalitātes garantēšanai prioritizē ne tikai *IGMP* ziņojums, bet arī multiraides video kanālu datu plūsmu, kurai tiek izdalīts atsevišķs *VLAN* (*Virtual Local Area Network*) ar *Ethernet* marķētu *CoS*, kuru *IP* tīklā kartē uz atbilstoša līmeņa *QoS*, tādējādi visā tīklā nodrošinot identiskas pārraides kvalitātes garantijas.



1.9. att. Vispārināta *IPTV* tīkla arhitektūra

1.9. attēlā ir attēlota vispārināta IP protokola video pārraides tīkla arhitektūra, kur pamatelementi un galvenie principi ir identiski gan *IPTV*, gan *OTT* un interenta – TV risinājumos. *OTT* un interneta – TV video datu plūsmas pārraidei parasti izmanto negarantētu, tā saucamo *best-effort* uniraides (*unicast*) datu pārraides kanālu, bet *IPTV* video datu plūsmas pārraidei izmanto speciāli izdalītus multiraides (*multicast*) kanālus ar *QoS* garantijām. Savukārt *IPTV VoD (Video on Demand)* straumēšanai izmanto uniraides kanālu ar tieši to pašu *QoS*. Tādējādi *IPTV* tiek nodrošināta garantēta video piegāde, bet multiraide ļauj ievērojami ekonomēt pārraides tīkla resursus.

Ciparu video apraides un straumēšanas tehnoloģijas ir cieši saistītas ar dažādiem video inkapsulācijas protokoliem, kuri var ietekmēt video kvalitātes vērtējumu, tāpēc turpinājumā par video multipleksēšanas un inkapsulācijas paņēmieniem.

1.4.1. Video multipleksēšana un inkapsulācija

Lai sagatavotu datus informācijas pārraidei, ir jāveic vairākas darbības: vispirms video kodētāja izejas dati ir jāuzglabā datu nesējā, iepakojot tos piemērotā konteinerā, tad jāveic dažādu video, audio un datu plūsmu multipleksēšanu, gala rezultātā, pirms informācijas pārraides multipleksētie dati ir jāsadala izvēlēto pārraides tehnoloģiju datu vienībās, piemēram, *IP/RTP/MPEG – TS* paketēs. Turpmāk tekstā par video multipleksēšanu un inkapsulāciju.

Turpmāk tekstā tiks aprakstīts video, audio un datu multipleksēšanas, pārraides, inkapsulācijas un straumēšanas process ceļā no galvstacijas (*HE*) līdz dekoderam (*STB*). Vispirms galvstacijas *MPEG* kodētāji izveido video, audio un datu elementārplūsmas *ES (Elementary Stream)*, kuras tiek sadalītas *PES (Packetized Elementary Stream)* elementārplūsmu paketēs, skatīt 1.7. attēlā.

PES paketes nav piemērotas apraidei vai straumēšanai, tāpēc tās tiek sadalītas fiksēta izmēra *MPEG – TS* paketēs, parasti 188 Baiti ($184 + 4$), bet *DVB* gadījumā 204 Baiti ($184 + 4 + 16$), kur papildus 16 Baiti ir atvēlēti *Reed Solomon FEC (Forward Error Correction)* kļūdu labošanas vajadzībām. Izmantojot *RS FEC* ar 16 Baitu kontrolsummu, var labot līdz pat 8 kļūdām vienai paketei. Pēc visu *PES* video, audio un datu plūsmas sadalīšanas *TS* paketēs, tās saturiski tiek apvienotas vai multipleksētas vienā *TS* plūsmā, piemēram, vienam televīzijas kanālam, pēc izvēles, var būt dažādas kvalitātes kodējuma video un audio kanāli, kā arī audio un teleteksts var būt dažādas valodās, skatīt 1.10. attēlā.

TS paketei 184 Baiti ir atvēlēti derīgai slodzei un 4 Baiti dienesta informācijai. Dienesta informācijas apgabals vai galvene sastāv no trim laukiem. Pirmais 1 Baita lauks ir atvēlēts sinhronizācijai ar konstanti 47_{hex} (0x47). Otrais 13 bitu lauks ir *TS* paketes identifikators vai *PID* (*Packet Identifier*). Savukārt trešais 1 bita lauks vai “karodziņš” kalpo kā transporta kļūdu identifikators, kuru uzstāda demodulators, tādējādi iedarbinot kļūdu labošanas mehānismu, piemēram, *DVB* gadījumā, parasti *RS FEC* (*Reed Solomon Forward Error Correction*). *DVB* tehnoloģijās kļūdu labošanai izmanto papildus 16 Baitu dienesta lauku ar *RS FEC* kontrolsummu, kuru pievieno *TS* paketes kājenē.

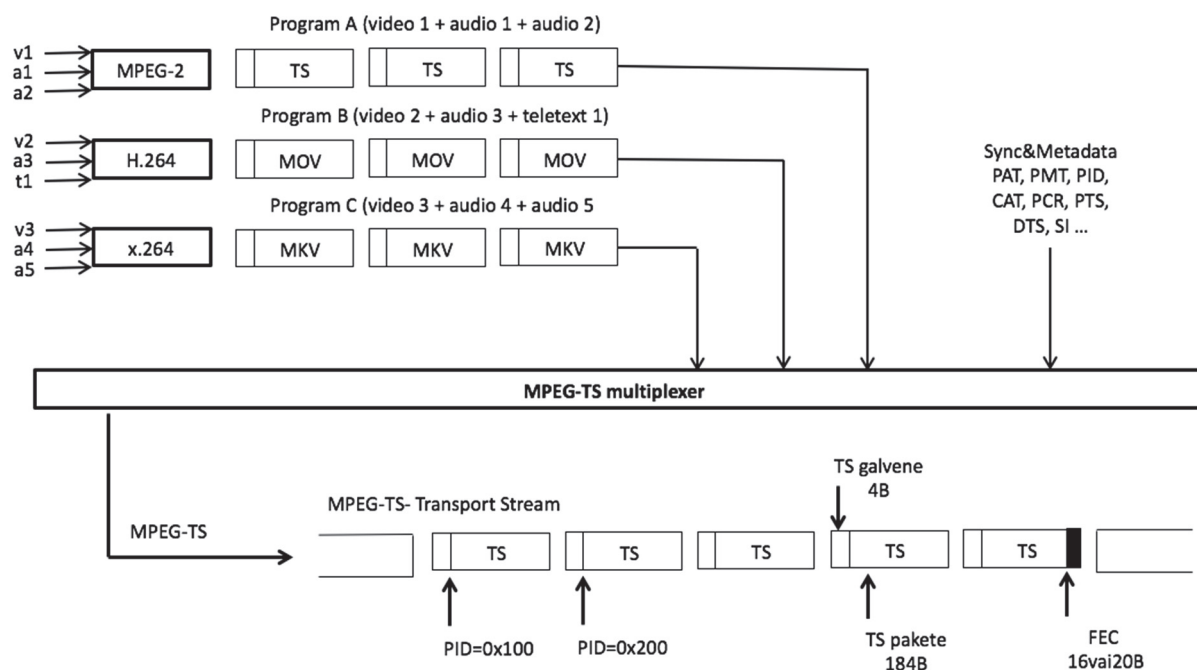
MPEG – *TS* datu plūsma ir asinhrona, jo nav zināms, cik liela apjoma un kādus datus pārnēs katra nākamā pakete. Datu veidu *TS* paketē identificē pēc *PID*, kur katrai video, audio un datu plūsmai, t.sk. arī metadatiem, ir savs unikāls *PID*. Lai varētu aprakstīt multipleksētu *TS* plūsmas struktūru, izmanto *PSI* (*Program Specific Information*) metadatus. *PSI* sastāv no *PAT* (*Program Association Table*) un *PMT* (*Program Map Table*). *PAT* metadatus vienmēr pārraida *TS* paketēs ar *PID* 00_{hex} (0x00). *PAT* tabulā ir iekļauta informācija par televīzijas programmu skaitu apvienotajā *TS* plūsmā, kā arī norādes uz individuāli katra televīzijas kanāla *PMT* metadatu *TS* pakešu *PID* numuriem. Savukārt *PMT* tabulā ir iekļauta informācija par katram televīzijas kanālam saturiski atbilstošu video, audio, kā arī citu papildu datu *TS* pakešu *PID* numuriem. Šādā veidā, vadoties pēc *PAT* un *PMT* metadatiem, dekoderis multipleksētajā *TS* plūsmā identificē saturiski saistītu video un audio plūsmu, sauktu arī par televīzijas programmu.

Televīzijas programmu video un audio plūsmu sinhronizācijai tiek izmantota *MPEG* kodētāja 27 MHz oscilatora radīta *STC* (*System Time Clock*) 42 bitu skaitītāja bitu virkne, kuru mēdz dēvēt par *PCR* (*Program Clock Reference*). *PCR* sastāv no diviem identifikatoriem *PTS* (*Presentation Time Stamps*) un *DTS* (*Decoding Time Stamps*), kurus dekoderis izmanto video un audio plūsmu savstarpējai sinhronizācijai (*lip sync*, *lip synchronization*). Sinhronizācijas novirzes var atstāt ļoti būtisku ietekmi uz televīzijas programmu kvalitātes novērtējumu, tāpēc [91] rekomendē 40ms starp divām individuālām *PCR* vērtībām, ar trīci ne lielāku par 500 ns.

MPEG – *TS* var nodrošināt datu televīzijas programmu šifrēšanu *CA* (*Conditional Access*), kā arī citu standartizētu un nestandardizētu *PSI* metadatu iekļaušanu multipleksētajā *TS* plūsmā, piemēram, *EPG* (*Electronic Program Guide*). Minētās tēmas ir ārpus darba satura un detalizēti netiek apskatītas.

MPEG – TS paketes izmērs ir ideāli piemērots transportēšanai, izmantojot *ATM* (*Asynchronous Transfer Mode*) šūnas/paketes (4 *ATM* paketēs 47 Baiti + 5 Baiti var inkapsulēt 1 *MPEG – TS* paketi 188 Baiti). Savukārt *ATM* paketes ir piemērotas inkapsulēšanai *SDH/SONET* (*Synchronous Digital Hierarchy*) vai *OTN* (*Optical Transport Network*) konteineros, transportam izmantojot optisko šķiedru kabeļu vai radioviļņu pārraidi. Ja apvienoto video datu pārraidei nepieciešama augstākas kārtas multipleksēšana, t.i. pārraides ātrumiem virs 10 Gbps (*SDH/SONET*, *Ethernet*), tad optisko šķiedru pārraides tehnoloģijās ieteicams izmantot kādu no *xWDM* (*Wavelength Division Multiplexing*) viļņgaruma multipleksēšanas tehnoloģijām, piemēram, *CWDM* (*Coarse WDM*) vai *DWDM* (*Dense WDM*).

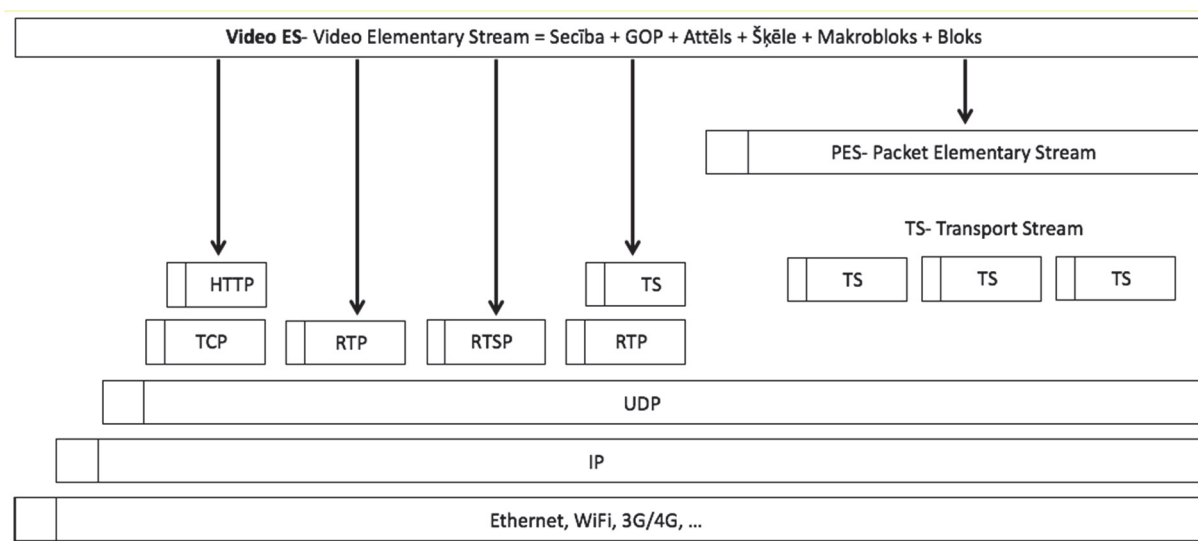
1.10. attēlā ir ilustrēts dažādu video plūsmu multipleksēšanas process, 1.11. attēlā ir parādīti dažādi pakešu inkapsulācijas un straumēšanas varianti, bet 1.7. attēlā ir parādīts, kā no kodētas video plūsmas iegūst paketes.



1.10. att. Multipleksēšana un pārraide

Video inkapsulācija ir cieši saistīta ar pārraidē iesaistītiem straumēšanas protokoliem 1.8. tabulā, piemēram, klasiskais *IPTV* inkapsulācijas steks 1.11. attēlā var sastāvēt no: video kodētāja datu vienības *ES/PES* tiek sadalītas TS paketēs, tad vairākas TS video, audio un datu plūsmas paketes multipleksē vienotā TS, tad tās tiek inkapsulētas *IP/Ethernet* un pārraidītas, izmantojot kādu transporta un piekļuves tīkla tehnoloģiju, skatīt 1.9. attēlā. *MPEG – TS/IP*

inkapsulācijas vietā var būt vesela virkne citu inkapsulācijas variantu, atbilstoši 1.11. attēlā parādītam, piemēram, *RTP/UDP/IP* vai *HTTP/TCP/IP* vai *TS/RTP/UDP*, u.tml.



1.11. att. Inkapsulācija un straumēšana

Katram datu inkapsulācijas paņēmienam ir sava specifika, piemēram, datu apjoms fiksēts vai mainīgs, kļūdu atklāšana vai kļūdu labošana, reālā laika video plūsmas sinhronizācija, dienesta informācijas apjoms (*overhead*) un ziņojumu skaits. Liels ziņojumu skaits, kā arī vairāklīmeņu inkapsulācijas protokoli ģenerē liela apjoma dienesta informāciju, tā saucamo virstēriņu (*overhead*), kas var radīt papildus prasības, nodrošinot vienu un to pašu datu piegādi, lielāku pārraides ātrumu vai platāku frekvenču joslu. Pārraides tīkla pārslodzes rada pakešu trīci, kā arī var izraisīt pakešu zudumu. Rezultātā var parādīties visai būtiskas atšķirības starp dažādiem inkapsulācijas paņēmieniem un straumēšanas protokoliem. Sevišķi svarīgi tas ir *VoD* (*Video on Demand*) uniraides video piegādes pakalpojumiem, kuros tiek izmantotas *PVR* (*Personal Video Recorder*) tipa vadības komandas (ierakstīt, dzēst, atskaņot, pauze, paātrināta atskaņošana uz priekšu un atpakaļ), jo katru komandu izpilda lietotājs un gaida uz to nekavējošu reakciju. Liela pakešu aiztures vidējā vērtība un liela trīce var būtiski ietekmēt kopējo video kvalitātes novērtējumu, kaut arī tiešā veidā tas nekādi neietekmē un nav saistīts ar video signāla kvalitāti.

Reālā laika video pakešu piegādes garantijas un sinhronizācija ir ļoti svarīgas, jo nevar paļauties tikai uz to, ka buferatmiņa spēs kompensēt pakešu trīci. Liela buferatmiņa rada papildus aizturi, kas var atstāt sevišķi negatīvu iespaidu uz divvirzienu komunikāciju, piemēram, lietotājam skatoties video, to apturot, atskaņojot, pārvietojoties pa laika asi uz

priekšu un atpakaļ. Jo mazākas tīkla datu plūsmas garantijas (*QoS*), jo lielāks risks, ka uztvertā video kvalitāte varētu būt ievērojami sliktāka (*QoE*).

Video inkapsulācija var ietekmēt video kvalitātes vērtējumu – savstarpēji salīdzinot dažāda izmēra un skaita video pakešu zudumus, varēs novērot strukturāli atšķirīgus vizuāli redzamus artefaktus [92]. Lai sašaurinātu darba pētījuma loku, potenciālie eksperimenti netika iekļauti promocijas darba uzdevumos, tāpēc visos darba eksperimentos izmantots viens un tas pats inkapsulācijas steks: Video *ES – PES – MPEG – TS – UDP – IP*, skatīt 4. nodaļu.

1.4.2. Video signālu pārvades interfeisi

Televīzijas tehnoloģiju aizsākumos, kad tika radīta melnbaltā televīzija, bija ņemtas vērā cilvēka vizuālās uztveres īpatnības, papildu informācija darba 1. nodaļā. Cilvēka acs tīklenē ir salīdzinoši daudz vairāk spilgtuma receptoru nekā krāsu receptoru, tāpēc arī cilvēka smadzenes un redze ir jūtīgāka uz melnbaltiem toņiem un spilgtuma izmaiņām, nevis uz krāsām un krāsu toņu daudzveidību [37]. Cilvēku redzes krāsu uztveres receptoru jutība ir dažāda, piemēram, zaļās krāsas jutība ir augstāka par sarkano un zilo krāsu. Krāsu jutības un oponentu krāsas uztveres īpatnības tiek izmantotas krāsu starpības signālu kodēšanai. Piemēram, krāsu televīzijas pirmsākumos krāsu starpības signālam tika atvēlēti 1.3MHz, bet spilgtuma signālam aptuveni 5MHz joslas platuma. Video kameras *CCD (Charge Coupled Device)* mikroshēmas *RGB* signāls pirms pārraides *PAL, SECAM* vai *NTSC* formātā tika pārveidots uz *YUV* signālu. No zināmām *RGB* signāla vērtībām ir iespējams aprēķināt *YUV* signālu vērtības un otrādi, skatīt (1.9. formulu un 1.9. tabulu.

$$Y = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B \quad (1.9)$$

$$U = 0.49 * (B - Y)$$

$$V = 0.88 * (R - Y),$$

kur *Y* – luminance (spilgtums, spožums), *U* un *V* – chrominance (krāsu starpība), *R* – red (sarkans), *G* – green (zaļš), *B* – blue (zils).

1.9. tabula

YUV-RGB-YUV krāsu telpu konvertācija

Y	=	0.299	0.589	0.114	*	R	=	1.000	0.000	1.140	Y
U		-0.147	-0.289	0.436		G		1.000	-0.395	-0.581	U
V		0.615	-0.515	-0.100		B		1.000	2.032	0.000	V

1.9. tabulā *RGB* [0...1], *Y* [0...1], *U* [-0.436...+0.436] un *V* [-0.615...+0.615].

CVBS signālam krāsu starpības signālu var pievienot divējādi: *PAL* un *NTSC* gadījumā, izmantojot analogo amplitūdas un fāzes modulāciju kombināciju (*IQ* modulācija), bet *SECAM* gadījumā, izmantojot frekvenču modulāciju. *IQ* modulators ģenerē krāsu starpības signālu kā amplitūdas un fāzes modulētu krāsu nesējsignālu, kur amplitūda pārnēs krāsu piesātinājumu (*saturation*), bet fāze krāsu toņus (*hue*). Tāpēc ar osciloskopa palīdzību var izmērīt tikai krāsu piesātinājumu, bet krāsu toņu mērījumiem ir jāizmanto vektroskops [66]. Tādējādi, *PAL*, *NTSC* vai *SECAM* signāls tiek ģenerēts no melnbalta, sinhronizācijas (*CVBS*) un krāsu starpības signāliem, kā rezultātā iegūst (*CCVS*) signālu.

Video aprīkojuma interfeisus var iedalīt divās nosacītās grupās, tā dēvētie patērētāju klases (*consumer grade*) un profesionālie video interfeisi. Patērētāju klases interfeisus var iedalīt vairākās apakšgrupās: analogie, ciparu interfeisi; vienlaicīgi viena vai vairāku video signālu pārvadei paredzēti interfeisi; video un audio signālu pārvadei izmantojot kopēju interfeisu, vai arī katram signālam izmantojot atsevišķu interfeisu; kā arī pēc pielietojuma – datora monitoriem vai televizoriem, kaut gan mūsdienu produktos sāk izzust šis striktais iedalījums pēc pielietojuma, kā arī interfeisu tehniskās specifikācijas kļūst visai līdzvērtīgas. 1.10. tabulā apkopoti populārākie patērētāju klases un profesionālie video interfeisi, bet nav uzskaitīti vairāki, tā arī popularitāti neguvušie, ražotāju patentētie risinājumi. Līdz pat mūsdienām gandrīz visus patērētāja klases analogos un ciparu video interfeisus vēl joprojām integrē vairumā mūsdienu produktu.

1.10. tabula

Video interfeisi (patērētāju un profesionālās klases)

Set-top-box un TV/monitors		HeadEnd un TV studija
Analogie interfeisi	Ciparu interfeisi	Ciparu interfeisi
DVI (RGB) analogs, ciparu vai kombinēts (DVI – A, DVI – D vai DVI – I)		SDI (nekompresēts jēldatu video YCbCr, RGB, sRGB, xvYCC)
Kompozītais CVBS/CCVS (YIQ)	HDMI (YCbCr, RGB, sRGB, xvYCC)	ASI (MPEG – TS paketes)
S-Video (Y/C)	DP (RGB, xvYCC, sRGB, scRGB, Adobe RGB)	
SCART (RGB, Y/C, YIQ)		
VGA (RGB)		
Komponentais (YPbPr)		

Par video interfeisu aizsācēju var uzskatīt analogo kompozīto video (*CVBS/CCVS*), kas tika radīts pagājušā gadsimta 50. – 60. gados. Kompozītais video ir paredzēts *PAL*, *NTSC*, *SECAM* signālu pārvadei starp video aprīkojumu un televizoru. Kā nākamo var minēt 70.–80. gados izstrādāto *SCART*, kas pilnajā savienotāja versijā nodrošināja vienlaicīgi trīs (*RGB*, *Y/C*, *YIQ*) video signālu pārvadi, kā arī analogo divkanālu audio *L/R*. Kā nākamo svarīgāko video interfeisu datoru pasaulē var atzīmēt analogo *VGA* video interfeisu, kas tika izstrādāts 80.–90. gados. Dažādu ražotāju ciparu video interfeisa iniciatīvas parādījās jau 20. gadsimta 80.–90. gados, bet īstenu popularitāti ciparu video interfeisi ieguva vien 21. gadsimta pirmajā desmitgadē, līdz ar *DVI*, *DP* un *HDMI* interfeisu izstrādi tūkstošgades mijā.

DVI (Digital Visual Interface) interfeiss nodrošina analogā signāla pārvadi atpakaļ savietojamībai ar *VGA (Video Graphics Array)*, kā arī ciparu signālu vai arī abu divu signālu pārvadi vienlaicīgi, bet *DP (DisplayPort)* ir tiešais *DVI* pēctecis, kas nodrošina ciparu signālu pārvadi un atpakaļ savietojamību ar saviem priekštečiem. *DVI* un *DP* ciparu video signāli ir savietojami ar *HDMI*.

Analogais kompozīta *CVBS/CCVS* video *YIQ* izmanto vienu koaksiālo kabeli ar *RCA* savienotājiem, bet analogais komponenta video *YPbPr* izmanto trīs atsevišķus koaksiālos kabeļus ar *BNC* vai *RCA* savienotājiem. Analogā komponenta *RGB* video gadījumā var izmantot trīs atsevišķus koaksiālos kabeļus ar *BNC* vai *RCA* savienotājiem, vai arī klasisko trīsrindu trapecveida *VGA DE – 15 RGB* savienotāju vai *SCART* savienotāju, bet specifiskiem lietojumiem izmanto piecus koaksiālos kabeļus ar *BNC* savienotājiem *RGBHV* signālu pārvadei, kur *H* ir horizontālā sinhronizācija un *V* ir vertikālā sinhronizācija. Ciparu komponenta video *YCbCr* pārvadei var izmantot dažādus video interfeisus, piemēram, *HDMI*, *DVI*, *DP*, *FireWire*, kā profesionālās klases *SDI* signālu pārvadei, izmantojot vienu vai vairākus koaksiālos kabeļus ar *BNC* savienotāju. *HDMI*, *DVI* un *DP* interfeisiem ir virkne fizisko savienotāju un adapteru paveidi, kuri darbā netiek apskatīti.

Video signālu transportēšanai uz vai no datu uzglabāšanas iekārtām ļoti plaši izmanto klasiskos datora interfeisus: *USB*, *FireWire*, *e-SATA*, *PCI Express*, *SAS*, *SCSI*, *Fiber Channel*, *Thunderbolt*, *InfiniBand*, u.c. Daži no tiem var nodrošināt pārraides ātrumu līdz pat 10Gbps/s. Minētais datu pārraides ātrums ir ļoti būtisks, jo *HD* nekompresēta video plūsmai nepieciešams 1.5 – 6Gbps/s, skatīt nekompresēta video signāla formēšanas prasības 1.1. tabulā. Detalizēts datu pārraides interfeisu pārskats darbā nav apskatīts.

Turpmāk tekstā tiks apskatīti populārākie profesionālās klases video pārraides interfeisi, kuri visbiežāk ir pakļauti dažādiem video kvalitātes pārbaudes testiem, t.sk. fiziskā līmeņa video signāla mērījumi, frekvenču joslas platums, bitu pārraides ātrums, spriegums, fāze, acs diagramma, u.tml. Pie profesionālās klases video pārraides interfeisiem var pieskaitīt *SDI* (*Serial Digital Interface*) un *ASI* (*Asynchronous Serial Interface*), kurus galvenokārt izmanto TV studijās un galvstacijās. *SDI* ir paredzēts nekompresētu vai jēldatu signālu pārvadei, bet *ASI* ir paredzēts kompresēta *MPEG – TS* pakešu pārvadei, kaut arī fiziskā līmeņa specifikācijas abiem interfeisiem ir identiskas – 75 omi koaksiālais kabelis ar *BNC* savienotāju un signāla amplitūdu 800 mV_{pp} (± 10 %).

Kaut arī abiem video interfeisiem fiziskās un elektriskās specifikācijas ir vienādas, *SDI* ir paredzēts nekompresētu (jēldatu) video datu pārraidei, bet *ASI* paredzēts kompresētu *MPEG – TS* datu pārraidei. *ASI* gadījumā pārraides ātrums ir atkarīgs no video kodēšanas parametriem (izšķirtspējas, kadru skaita sekundē, i vai p izvērse, u.tml.) un *MPEG – TS* paketes izmēra (188 Baiti (184 + 4) vai 204 Baiti (184 + 4 + 16)), līdz ar to pārraides ātrums var variēt plašā diapazonā. Pētījumu eksperimentālajā daļā galvenokārt tika izmantoti *SDI* interfeisi, visbiežāk *HD – SDI* un *3G – SDI*, skatīt 1.11. tabulā.

1.11. tabula

Jēldatu *SDI* interfeisa specifikācijas

Apzīmējums	Pārraides ātrums	Video formāts
<i>SD – SDI</i>	270, 360, 143, 177 Mbps	480i, 576i
<i>ED – SDI</i>	540 Mbps	480p, 576p
<i>HD – SDI</i>	1.485 Gbps	720p, 1080i
<i>HD – SDI</i> (Dual link)	2.97 Gbps	1080p
<i>3G – SDI</i>	2.97 Gbps	1080p
<i>6G, 12G, 24G-SDI</i>	6, 12, 24 Gbps	2K, 4K30p/60p, 8K

Vairumam modernā video aprīkojuma līdz pat mūsdienām atpakaļ savietojamības nodrošināšanai tiek iestrādāts analogo interfeisu atbalsts, tāpēc ir svarīgi pārzināt analogā signāla interfeisa specifikāciju, kā arī elektrisko parametru atbilstības mērījumus. Attīstības tendences liecina par to, ka fiziskā līmeņa mērījumu vietā arvien vairāk tiek izmantoti atbilstoša pārraides protokola pakešu līmeņa mērījumi, piemēram, *ASI* interfeisam fiziskā līmeņa mērījumus parasti neveic, bet izmanto *MPEG – TS* pakešu līmeņa mērījumus atbilstoši [91]. Savukārt *SDI* interfeisa gadījumā tiek izmantoti fiziskā līmeņa mērījumi, līdzīgi kā tas jau

desmitiem gadu tiek darīts ar analogajiem interfeisiem, būtiska atšķirība ir tā, ka analogā signāla vietā tiek mērīti ciparu signāla parametri.

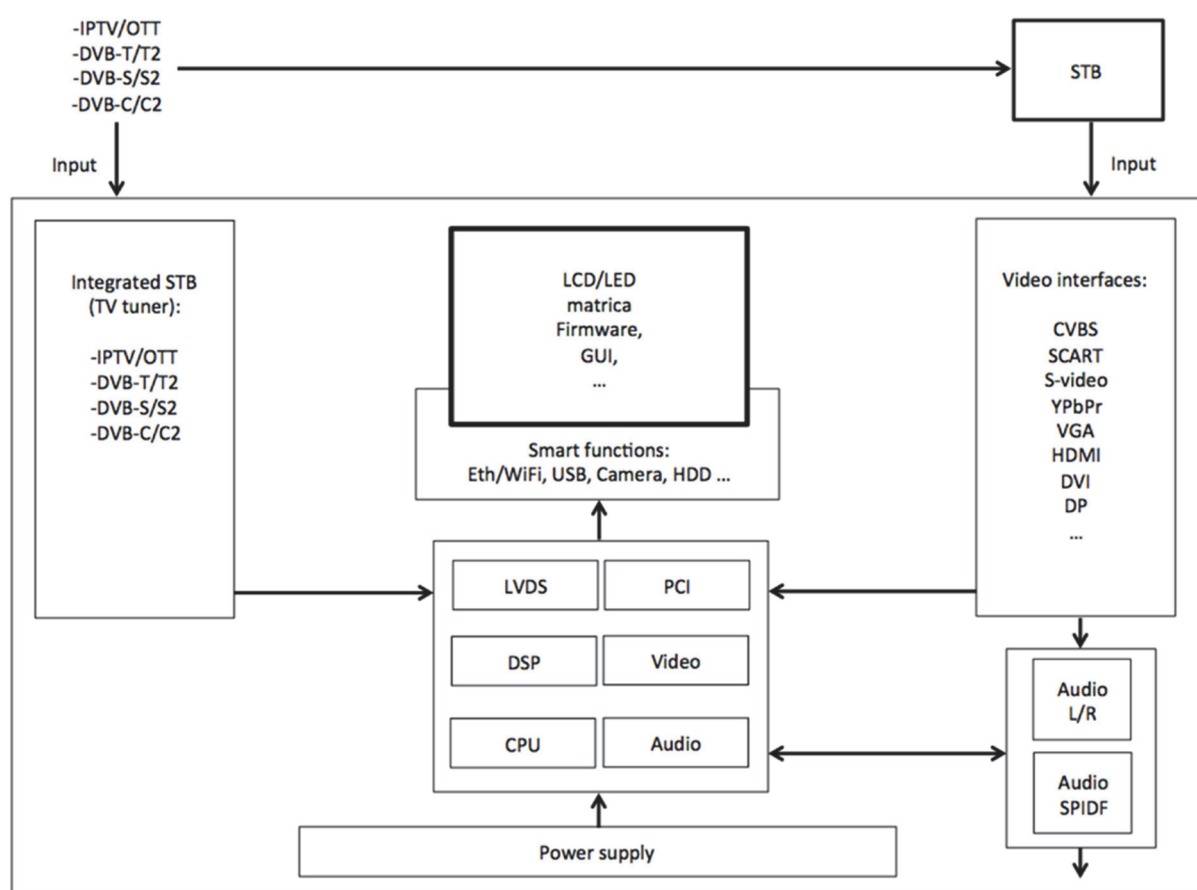
Var teikt, ka vēsturē aizgājušos *PAL/NTSC* signālu kvalitātes mērījumu paņēmienus (sprieguma līmenis, oscilogramma, vektorsignāla diagramma) mūsdienu ciparu video interfeisos neizmanto, taču gluži pretēji, *SDI* interfeisa gadījumā tie ir vieni no svarīgākajiem mērījumiem (vektorsignālu diagramma, acs diagramma, fāzes trīce, sinhronizācija) video signālu pārvades kvalitātes nodrošināšanai un uzraudzībai. Savukārt *ASI* interfeisa gadījumā mērījumus galvenokārt veic *MPEG – TS* pakešu līmenī, piemēram, pārraides ātrums, pakešu zudums, aiztures, trīces, sinhronizācijas, kā arī citus konkrētai *DVB* tehnoloģijai specifiskus pārraides parametrus atbilstoši *ETSI* [91].

Video interfeisi ietekmēt video kvalitātes vērtējumu, tāpēc jāveic video kvalitātes salīdzināšanas eksperimenti dažādiem video interfeisiem, skatīt 4. nodaļā:

3. Veikt video signālu un interfeisu kvalitātes novērtēšanu: komponentais ciparu (*YCbCr 1080i*), komponentais analogais (*YPbPr 720p*), kompozītais (*YIQ 576p*);
4. Veikt sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanu 1080i un 576p video signāliem, izmantojot komponento *YCbCr* un kompozīto *YIQ* video interfeisu.

1.4.3. Video signālu attēlošana un pārveidošana

Par mūsdienu video signālu attēlošanas ierīci var uzskatīt *LCD/LED* televizorus vai monitorus, lai arī vēl joprojām lietošanā ir saglabāties pietiekami liels skaits *CRT* televizoru. 1.12. attēlā ir vizualizēta vispārināta *LCD/LED* TV blokshēma ar iebūvēta un ārēja TV signāla dekodera pieslēgumu.



1.12. att. Vispārināta *TV* un *STB* uzbūves blokshēma

Katram monitoram (televizora, displeja) ir vairāki video interfeisi, kur katrs interfeiss nodrošina zināmu video formātu (izšķirtspēju, ekrāna proporciju, izvērsi, kadru skaitu sekundē) atbalstu, piemēram, *VGA* (640×480, 800×600, 854×480, 1024×768), bet *HDMI* (720×576, 1280×720, 1920×1080), skatīt 3. pielikumā.

Video formātu neatbilstība var izraisīt video attēla kropļojumus – attēls tiek izstiepts horizontāli vai vertikāli gan neatbilstošas izšķirtspējas, gan neatbilstošas ekrāna proporcijas (4:3 pret 16:9) rezultātā. Lai pēc iespējas minimizētu kropļojumus, attēla formāts netiek mainīts, vai arī proporcionāli izstiepts un saspiegts, lai pēc iespējas vairāk aizpildītu ekrānu, bet neaizpildītās ekrāna vietās tiek attēlotas melnas horizontālas vai vertikālas apmales. Šāda konvertācija var samazināt video attēla kvalitāti. Cik lielā mērā attēla kvalitāte samazināsies, ir cieši saistīts ar konkrēta ražotāja *TV*, *STB* vai specializēta video konvertora (*upscaling*, *downscale*, *deinterlaced*, *stretching* (4:3, 16:9, *pillbox*, *letterbox*, *windowbox*)) video pēcapstrādes algoritmiem. *TV* signālu apraidei visbiežāk izmanto rindpārleces (*interlaced*) video, bet *LCD/LED TV* ir paredzēti progresīvās rindizvērses (*progressive*) video signālu attēlošanai. Šai tēmai ir veltīti vairāki zinātniskie darbi, piemēram, pētījumā [93] ir testētas un

salīdzinātas vairākas metodes rindpārleces video signālu pārveidošanai uz progresīvo rindizvērsi.

Video attēla malu attiecība ir attēla augstuma un platuma proporcija, kuru pieraksta formāts ir 4:3 vai normalizētā veidā 1.33:1. Parasti attēla pikseļa malu attiecība ir 1.00 (augstums un platums 1:1), bet atsevišķos video formātos izmanto nestandarta pikseļa malu attiecības, kur pikselis nav kvadrāts. Video attēla un pikseļu malu attiecības skatīt 7. pielikumā.

Savstarpēji savienojot dažādu specifiku video interfeisus, var izraisīt video kvalitātes samazināšanos, galvenokārt video signālu pārveidošanas un konvertācijas rezultātā, piemēram, *CVBS* savienošana ar *S* – video. Savienojot vienas specifiku video pārvades interfeisus, parasti nerodas video kvalitātes samazināšanās, piemēram, *HDMI* savienošana ar *DVI* vai *SCART* savienošana ar *CVBS* un *S* – video. Vairumā gadījumu fiziska divu dažādu specifiku video interfeisu tieša savienošana nav iespējama, jo jāveic video signālu konvertēšana no analogā uz ciparu signālu, piemēram, *HDMI* savienošanai ar *VGA*. Video signālu konvertēšana rada video kvalitātes kritumu.

Video attēla malu proporcija un pikseļu proporcijas nesavietojamība ar televizora vai datora ekrāna malu proporciju un pikseļu malu proporcijām var būtiski samazināt video attēla kvalitāti (neproporcionāli izstiepts vai saspiests attēls), skatīt 7. pielikumā.

Par video interfeisu un video formātu kvalitātes mērījumiem, kā arī video monitoru kalibrēšanu, krāsu temperatūras mērījumiem un noskaņošanu skatīt 3. nodaļā.

Video signāla pārveidošana un attēlošana ekrānā ietekmēt video kvalitātes vērtējumu, tāpēc darba eksperimentiem ir jāizmanto specializēts video kvalitātes novērtēšanas aprīkojums, kuram jānodrošina izmērāmi un kontrolējami tehniskie parametri, piemēram, ekrāna izšķirtspējai ir jābūt 1920 x 1080, ekrāna pilseļa izmēram ir jābūt 1:1, baltai krāsai jāatbilst *CIE xyY (CCT) D65* $x = 0.3128$, $y = 0.3292$, ekrānam ir jānodrošina jēldatu video signāla atskaņošanu *SDI*, skatīt 3. nodaļā.

1.5. Video pārraides datu plūsmas modeļi

Viens no darba uzdevumiem ir pētīt video pārraides pakalpojuma kvalitāti pakešu tīklos (IP tīklos). Pakešu tīklos kvalitātes pazemināšanos izraisa tīkla pārslodzes, kā rezultāta rodas pakešu aiztures, trīce un zudums. Svarīgi ir noskaidrot, kādam sadalījuma procesam atbilst video datu plūsmas un to zudums. Tāpēc šī nodaļa ir veltīta video pārraides datu plūsmas modeļu aprakstam. Darba eksperimentālajā daļā tika testēti vairāki video datu plūsmas

emulācijas modeļi. Darba eksperimentos tika izmantoti normālas, vienmērīgas un *Puasona* datu plūsmas, kā arī pašlīdzīgas (*self similar*) datu plūsmas, kuru mēdz dēvēt arī par interneta datu plūsmu. Par vienu no pirmajiem pētījumiem var uzskatīt darbu [94] un [95], kurā autori eksperimentāla pētījuma rezultātā pierādīja Ethernet datu plūsmas pašlīdzību. Minētais pētījums kalpoja kā katalizators veselai virknei citu pētījumu, kuru rezultātā pašlīdzības datu plūsmas efekts tika atrasts ne tikai *LAN* un *WAN* tīklos, bet arī globālajā *TCP/IP* tīmeklī [96] [97]. Pakešu komutācijas tīkli ar dažāda garuma paketēm, mainīgiem pakešu aiztures laikiem un uzplaiksnījumu (*burst*) dažādos laika momentos rada datu plūsmai pašlīdzības efektu (fraktālu struktūru). Fraktālis ir ģeometriski veidots objekts, kura sastāvdaļas ir līdzīgas visam objektam kopumā. Vadoties pēc haosa teorijas, fraktāļi veidojas determinēta haosa režīmā, un tiem piemīt pašlīdzības efekts.

Viens no pirmajiem datu plūsmas modeļiem, kuru plaši izmantoja telefonijas tīklos, bija veidots uz *Markova* modeļu bāzes, piemēram, *Puasona* sadalījuma datu plūsmas modelis. *Puasona* un pašlīdzības datu plūsmas modeļus plaši izmanto pakešu pārraides tīklos [98] [99].

VBR (Variable Bit Rate) kodētam video datu plūsmai piemīt *LRD (Long Range Dependence)* īpašības un atsevišķas *SRD (Short Range Dependent)* īpatnības [100], kuras vistiešākā veidā ir attiecināmas uz datu plūsmas pašlīdzības efektu [101]. *LRD* ir īpašības, kas ir raksturīgas *VBR* datu plūsmai [102], kā arī tās ir neatkarīgas no video materiāla satura (video konference, video zvans, filma, multfilma, sporta pārraides, u.tml.).

Meklējot sakarības pakešu zuduma lieluma un tā sadalījuma ietekmei uz video kvalitātes vērtējumu, darba eksperimentālos pētījumos tika izmantots *VBR* [103], [104] kodējuma video. Pakešu zuduma lielums tika izvēlēts procentuāli no kopējās datu plūsmas, robežās no 0.25 % līdz 5 %. Individuāli katram pakešu zudumam tika piemēroti dažādi varbūtību sadalījumi, pēc kuriem tika atmestas paketes, piemēram, normālais (*Gausa*), *Puasona*, vienmērīgais sadalījums, kā arī determinēts (periodisks) pakešu zudums [105] [106]. Lai varētu emulēt pašlīdzības datu plūsmu, *IP* tīklos, tika izmantota *VBR* video plūsma [107]. Minētie varbūtību sadalījuma likumi ir izmantoti pakešu zuduma emulācijām, bet izstrādātā testgultne un metodika nodrošina tos izmantot ne tikai pakešu zuduma, bet arī pakešu aiztures un trīces parametru emulācijām.

Konstatēts, ka vairumā pētījumu nav aprakstīti pakešu zuduma emulācijas principi, kā arī ļoti vāji definēti video kodētāja, video straumēšanas un tīkla parametri. Pēc autora domām, visos pakešu zuduma eksperimentos ir jābūt definētiem parametriem atbilstoši 1.12. tabulai.

Pakešu zuduma eksperimenta nosacījumi

Video kodētājs	RAW YUV 4:2:0, H.264/MPEG – 4 AVC P10, Main@L4.1, 1280 x 720, 16:9, 25 fps
Video straumēšana	VBR video 30 Mbps (10 – 50 Mbps burst), MPEG – TS, 7 TS transportē 1 IP pakete
Pakešu zuduma emulācijas	Pakešu zuduma apjoms (0.25 %, 1, 2 un 5 %), pakešu atmešanā izmantotie varbūtību sadalījumi (<i>Puasona</i> , <i>Gausa</i> un <i>vienmērīgais</i>)
IP pārraides tīkla parametri	Trīces buferatmiņa 1000 ms, CAS (<i>Conditional Access</i>), atkārtota pārraide, kļūdu labošana, pakešu re – maršrutēšana, fragmentēšana, pakešu dublikāti, kā arī citi pakešu bojājumi netiek izmantoti

Vairumā pētījumu ir definēts pakešu zuduma apjoms, kuru parasti izsaka procentos, bet pakešu atmešanas principi nav definēti vai arī ļoti vāji aprakstīti. Pētījumos visbiežāk tiek izmantots vienmērīgais sadalījums [108] [109], t.sk. *ITU – T* [33] rekomendācijā. Atsevišķos pētījumos tiek izmantots pavisam vienkāršots, maršrutētājos iebūvēts, pakešu rindu vadības mehānisms [110] vai arī operētājsistēmu (*Linux*, *Unix*) tīkla filtrācijas rīki, lai varētu nodrošināt pakešu atmešanas emulācijas. Atsevišķos pētījumos tiek izmantots *Puasona* sadalījums [111] [112], kā arī jebkurš cits, bieži neaprakstīts, gadījuma sadalījums. Atsevišķos pētījumos, papildus pakešu atmešanas sadalījumam, ir izmantots uzplaiksnījuma (*burst*) un ilglaicīgas pakešu zuduma atkarības parametrs [113] [114] [115], bet šajā pētījumā [116] ir minēti atsevišķi *Puasona* sadalījuma likuma pielietojuma ierobežojumi. Tomēr šajā pētījumā [109] ir konstatēts, ka datu plūsmas uzplaiksnījuma (*burst*) apjoms būtiski neietekmē video kvalitātes novērtējumu. Minētais arī kalpoja kā pamatojums pakešu zuduma emulācijām izmantot *Puasona* un *vienmērīgo* sadalījumu, kā arī pārbaudīt *Gausa* vai normālā sadalījuma ietekmi. *Gausa* sadalījums ir atkarīgs no vairākiem parametriem, kurus varētu pielīdzināt pakešu zudumam, kas var rasties tīklā atkarībā no ļoti daudziem faktoriem, piemēram, maršrutētāja buferatmiņas pārpilde, tīkla iekārtu pārslodze, savienojuma caurlaides spējas ierobežojums, savienojuma pārrāvums, vienas un tās pašas datu plūsmas pārraide, izmantojot dažādus maršrutus, re – maršrutēšana, kā rezultātā rodas lielas aiztures un trīce.

Konstatēts, ka atsevišķos pētījumos, lai simulētu vizuāli redzamus artefaktus – izplūdušus attēla elementus (*blurring*) vai attēla blokus (*blocking*) – , kuri rodas *IP* pakešu

zuduma rezultātā, ir izmantoti nekorekti paņēmieni, parasti, patvaļīgi izgriezti attēla elementi, kuriem nav nekādas saistības ar *MPEG GOP* kodēšanas principiem un kodēto datu pārraidi, izmantojot IP protokolu. Šajos pētījumos [117] [118] ir salīdzināti dažādi *MPEG GOP I, P* un *B* kadru bojājumu (kadra bloka, makrobloka un šķēles bojājumi un zudumi) ietekme uz video kvalitātes novērtējumu. Zināms, ka IP tīkla pakešu zudums [119] var būtiski ietekmēt video straumēšanas kvalitāti [120], jo video attēla kvalitātes degradācija, vizuāli redzamu artefaktu veidā, ir atkarīga no IP pakešu inkapsulācijas protokolu steka un *MPEG* kodētāja *GOP I, P* un *B* kadru struktūras [92]. *DVB (Digital Video Broadcasting) (DVB – T/C/S) MPEG – TS* pakešu zudums nav tas pats, kas IP pakešu zudums, parasti viena IP pakete transportē 7 *MPEG – TS* paketes. IP paketes zudumu var uzskatīt, kā 7 *MPEG – TS* pakešu uzplaiksnījuma (*burst*) zudumu. Ne tikai zaudēto datu apjoms ir atšķirīgs, bet atšķirīga ir vizuāli redzamo artefaktu struktūra un izvietojums attēlā.

Veicot literatūras analīzi, konstatēts, ka kopumā ir pieejams salīdzinoši liels skaits pētījumu, kuros aprakstīta pakešu zuduma statistika. Ievērojams skaits pētījumu attiecas uz *TCP/IP* datu plūsmu modelēšanu, piemēram, [119] [121]. Savukārt pētījumi par reālā laika video plūsmu modelēšanu ir ievērojami mazāk [122] [123].

Konstatēts, ka dažādos pētījumos, kā arī *ITU* rekomendācijās, nav skaidri definētas pakešu zuduma robežvērtības un to saistība ar *MOS* vai aprobētiem video kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem. Pakešu zuduma apjoma robežvērtības un ar tiem saistītie koeficienti ir neskaidri un vispārināti definēti, piemēram, *ITU – T* [33] gadījumā, pakešu zudumam ir jābūt mazākam par 10 %. Savukārt šajā pētījumā [124] pakešu zuduma apjoms ir definēts no 1 % līdz 20 %. Šajos pētījumos [125] [126] ir konstatēts, ka 1 % pakešu zudums ir vienāds ar $MOS = 2.5$, bet citos pētījumos šai pašai *MOS* vērtībai pakešu zuduma līmenis var būt pat desmit reizes lielāks vai mazāks. Iespējams, ka šīs atšķirības ir saistītas ar būtiski atšķirīgiem eksperimentu izpildes nosacījumiem, kuri vairumā gadījumu ir vāji definēti. Bieži nav skaidri definēti eksperimenta veikšanas nosacījumi, kur atsevišķi no tiem ir apkopoti 1.12. tabulā, kā arī nav skaidrs, kas eksperimentā tiek pārbaudīts – pakešu zuduma ietekme, kļūdu labošanas algoritma, dekodera vai maršrutētāja veikspēja, u.tml. Neprecīzi ir aprakstīti video kvalitātes novērtēšanas testgultnes un testēšanas telpas parametri. Iespējams, ka testēšanas apstākļi neatbilst *ITU – R* [22] un *ITU – T* [127] [128] rekomendācijās minētajām prasībām, nekorekti sagatavoti video sižeti, nav veikta monitora kalibrācija, kā arī citi apgaismojuma spilgtuma un krāsas mērījumi, skatīt 3. nodaļu.

IP pārraides tīklos tipisks pakešu zudums ir visai zems ($\leq 1\%$), ko var uzskatīt par retu notikumu bez atmiņas, jo pakešu zudums nav atkarīgs no iepriekš zaudētās paketes, kas ir tipiski *Puasona* sadalījuma procesam. *Puasona* varbūtību sadalījuma procesu izmanto, aprakstot [129] [116] pakešu zuduma statistiku:

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (1.10)$$

kur $P(k)$ ir varbūtība, ka k paketes tiks zaudētas noteiktā laika intervālā, un λ ir dispersija un vidējais zaudēto pakešu skaits šajā laika intervālā.

Ja varētu pieņemt, ka pakešu zudumu ietekmē daudzi neatkarīgi procesi, tad aprakstot pakešu zuduma statistiku, var izmantot *normālo* vai *Gausa* sadalījumu:

$$p(k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-\lambda)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.11)$$

kur $P(k)$ ir varbūtība, ka k paketes tiks zaudētas noteiktā laika intervālā, λ ir vidējais zaudēto pakešu skaits šajā laika intervālā, un σ^2 ir zaudēto pakešu skaita dispersija.

Diskrēts vienmērīgais sadalījums ir tipisks izlases gadījumskaitļa ģenerators, kuru mēdz lietot [130] [116], lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku. Tas nozīmē, ka ir definēts kāds minimālais a un maksimālais b pakešu skaits, kuras var tikt zaudētas noteiktā laika intervālā. Vienmērīgam sadalījumam jebkurš skaits k pakešu var tikt zaudētas intervālā $k \in [a, b]$ ar vienādu varbūtību. Vienmērīgais sadalījums:

$$P(k) = \begin{cases} \frac{1}{a-b} & a < k < b \\ 0 & k < a \\ 0 & k > b \end{cases} \quad (1.12)$$

Vienmērīgā sadalījuma vidējā vērtība λ zaudētām paketēm:

$$\lambda = \frac{a+b}{2} \quad (1.13)$$

Vienmērīgā sadalījuma dispersija:

$$\text{Var}(k) = \frac{(b - a + 1)^2 - 1}{12} \quad (1.14)$$

Literatūras analīzes rezultātā noskaidrots, ka video datu plūsmai vai *VBR* (*Variable Bit Rate*) video plūsmai pakešu tīklos piemīt pašlīdzības efekts, tāpēc visos eksperimentos tika izmantots *VBR* video, skatīt 4. nodaļu. Tomēr nav izdevies noskaidrot kādam varbūtību sadalījuma procesam atbilst pakešu zudums, tāpēc ietilpīga pētījuma ietvaros [107] visi minētie varbūtību sadalījumi ir eksperimentāli pārbaudīti, jo tika izmantoti aprakstot pakešu zuduma statistiku, skatīt 4. nodaļu.

1.6. Video pārraides parametru kvalitātes mērījumi

Video kvalitātes novērtēšanas mērījumus var iedalīt divās grupās: subjektīvos un objektīvos kvalitātes mērījumos. Subjektīvos video kvalitātes mērījumus un novērtēšanu var veikt visai sistēmai kopumā vai arī konkrētu pārraides vai kodēšanas parametru ietekmes novērtēšanai. Subjektīvā video kvalitātes novērtēšana ir pēdējais video signāla posms no ekrāna līdz skatītājam. Savukārt objektīvo parametru kvalitātes mērījumus var iedalīt divās apakšgrupās – pārraides un kodēšanas parametru kvalitātes novērtēšanas mērījumos. Objektīvos video kvalitātes novērtēšanas mērījumus var veikt atbilstoši *ISO/OSI* modelim fiziskajā līmenī (*L1*), piemēram, *BER* un *SNR* vērtības; pakešu līmenī (*L2*, *L3* un *L4*), piemēram, IP pakešu zudums vai *MPEG* līmenī, piemēram, *I*, *P*, *B* kadri.

Analogās apraides televīzijai specifiskie kvalitātes mērījumi darbā netiek iztirzāti, tie tiek apskatīti tik lielā mērā, cik tas attiecas uz mūsdienu ciparu televīzijas sistēmu atsevišķiem posmiem, piemēram, analogo signālu video interfeisi un mērījumi.

Līdz pat mūsdienām video interfeisu mērījumiem izmanto specializētus osciloskopus televīzijas signālu mērījumiem, kurus sauc par viļņa formas monitoriem (*waveform monitor*) un vektroskopiem (*vectorscope*). Viļņu formas monitori ir paredzēti video signāla amplitūdas mērījumiem, turpretī vektroskopi – amplitūdas un fāzes mērījumiem. Piemēram, *PAL* un *NTSC* signāliem spilgtuma komponenti var izmērīt ar viļņu formas monitoru un noteikt, ka signālā ir krāsu nesējsignāls, bet krāsu starpības signālu var izmērīt tikai ar vektraskopu, jo *IQ* modulators ģenerē krāsu starpības signālu kā amplitūdas un fāzes modulētu krāsu nesējsignālu, kur amplitūda pārnēs krāsu piesātinājumu (*saturation*), bet fāze krāsu toņus (*hue*). Mūsdienās analogos ir aizstājuši ciparu signālu viļņu formas monitori un spektroskopi, bet galvenie mērīšanas principi nav mainījušies.

Mūsdienās viļņu formas monitorus un spektroskopus ļoti plaši izmanto profesionālajā video apstrādē (TV studijās, TV apraides kompānijās, *R&D HW* un *SW* izstrādātāji), t.sk. video interfeisu kvalitātes mērījumiem, piemēram, *HDMI*, *DVI*, *DP* vai *SDI*. Nemainīgi kopš analogo *PAL* un *NTSC* signālu mērījumiem, tiek mērīti dažādu specifikāciju ciparu signālu *SDI*, *YCbCr* un analogo signālu *RGB*, *YPbPr* spriegumi laikā, kā arī dažādi citi parametri, piemēram, *SDI* interfeisa gadījumā, signālu acs diagramma (*eye diagram*), sinhronizācija, trīce, spilgtuma un krāsu sprieguma līmeņi, 8 vai 10 bitu kodējums, 16 – 235 vai 0 – 255 līmeņu kodējums, krāsu līmeņu balanss (*YUV/RGB* parade), *IRE*, u.c.

IRE (*Institute of Radio Engineers*) ir noteicis spilgtuma komponentes sprieguma līmeņa normalizēto mērījumu skalu $IRE = 0 - 100$, kuru ļoti plaši izmantoja *PAL* un *NTSC* video signālu melno un balto līmeņu noskaņošanai. *PAL* signālam *IRE* (0 = melns, 100 = balts), bet *NTSC* signālam *IRE* (7.5 = melns, 100 = balts). Ļoti svarīgi ir ņemt vērā korektus melnā un baltā signāla līmeņus, veicot analogā video signāla pārveidošanu uz ciparu signālu, konvertējot *PAL* uz *NTSC* un otrādi. Nepareiza baltā un melnā līmeņa pārraidīšana samazinās video attēla izšķirtspēju, tumšu objektu krāsas, un dabas skatos objektu ēnas var būt grūtāk izšķiramas. Līdz pat mūsdienām ciparu video signāla spilgtuma komponentes mērījumiem izmanto *IRE*, jo tieši šie paši nosacījumi ir jāievēro arī veicot konvertāciju starp dažādiem ciparu video standartiem (0 – 255 biti, kur 0 = balts, 255 = melns vai 16 – 235 biti, kur 16 = melns, 235 balts), kā arī pārveidošanai no ciparu signāla uz analogo signālu, piemēram, analogo video interfeisu gadījumos: komponentais *YPbPr* vai *RGB* un kompozītais *CVBS*, u.c. Ir jāņem vērā, ka ne vienmēr tiek izmantota procentuālā $IRE = 0 - 100$ skala, kur $Y = 0 - 700\text{ mV}$, atsevišķos gadījumos tiek izmantota sprieguma līmeņiem atbilstoša $IRE = 0 - 70$ skala, kur $Y = 0 - 700\text{ mV}$.

DVB tehnoloģiju saimei ir katrai savi specifiski un visiem kopēji video kvalitātes mērījumi, galvenokārt cieši saistīti uz atbilstošās tehnoloģijas specifiskiem pārraides vides mērījumiem, skatīt 1.13. tabulā. *DVB* apraides tehnoloģijām specifiskie kvalitātes mērījumi darbā tiek apskatīti tik lielā mērā, cik tie ir saistīti ar straumēšanas tehnoloģijām, izmantojot IP protokolu, kā arī apraides un straumēšanas tehnoloģijās kopējiem protokolliem, piemēram, *MPEG – TS* plūsmas mērījumi, atbilstoši [91].

1.13. tabula

DVB tehnoloģiju pārraides vides parametru mērījumi

<i>DVB – T</i>	<i>DVB – C</i>	<i>DVB – S</i>
<i>MPEG – TS</i> mērījumi atbilstoši [91], t.sk. DVB, IPTV, OTT un i – TV		
<i>BER</i> mērījumi (pirms Viterbi, pirms un pēc Reed Solomon), <i>BER</i> bit errors/transmitted bits		
Signāla spektrs, signāla spektra frontes vājinājums		
Troksnis (<i>AWGN</i>), fāzes trīce, traucējumi	Signāla līmenis, troksnis (<i>AWGN</i>), fāzes trīce, traucējumi	Signāla līmenis
<i>COFDM</i> , <i>SFN</i> : daudzceļu izplatīšanās, atstarošanās, doplera nobīdes	Kabeļu pārraides līniju un iekārtu traucējumi	Mikroviļņu līniju traucējumi
<i>S/N</i> , fāzes trīce, <i>I/Q</i> amplitūdas un fāzes kļūdas, <i>MER/EVM</i> kļūdas	<i>S/N</i> , <i>C/N</i> , fāzes trīce, <i>MER/EVM</i> un <i>I/Q</i> amplitūdas un fāzes kļūdas	<i>S/N</i> , <i>C/N</i> , <i>E_b/N₀</i>

1.13. tabulā ir atspoguļoti kopējie un atšķirīgie parametri, kurus var izmantot mērījumos, novērtējot televīzijas signāla pārraides kvalitāti.

DVB, *IPTV* un *OTT* televīzijas risinājumos vairumā gadījumu izmanto standartizētu *MPEG – TS* konteineri. *MPEG – TS* nodrošina video, audio un metadatu uzglabāšanu, apraidi un multipleksēšanu. *MPEG – TS* parametru standartizētās un testēšanas rezultātā piemeklētās mērījumu robežvērtības (kļūdu skaits, aizture, trīce, pakešu zudums) kalpo kā reālā laika uzraudzības rīks, novērtējot vispārējo televīzijas signāla pārraides kvalitāti. Reālā laika uzraudzībai tiek pakļauta vesela virkne *MPEG – TS* parametru, piemēram, sinhronizācijas kļūdas un novirzes, *CRC* kļūdas (pārraides kļūdas), *PCR*, *PTS* kļūdas un novirzes, audio un video sinhronizācijas novirzes (*lip sync*), *PAT*, *PMT*, *PID*, *CAT* kļūdas, u.tml., atbilstoši [91]. Izmantojot *MPEG – TS* parametru mērījumus, var diagnosticēt, vai kļūdu skaits un sinhronizācija ir normas robežās, vai arī ārpus tās, bet nav iespējams noteikt, par kādu vērtību video kvalitāte ir samazinājusies, piemēram, MOS (*Mean Opinion Score*).

Video straumēšanai visbiežāk izmanto *IPTV*, *OTT* un *interneta–TV*, vai arī jebkuru citu video pārraides tehnoloģiju kopumu, izmantojot IP protokolu. Lai varētu objektīvi novērtēt video kvalitāti pakešu tīklos, var veikt pakešu līmeņa mērījumus, piemēram, pakešu zudumu (*packet loss*), aizturi (*delay*, *latency*) un trīci (*jitter*). Pakešu līmeņa mērījuma rezultāti ir jāsaiesta ar kvalitātes vērtējumu (*MOS*). IP tīklos, attiecībā uz video kvalitātes mērījumiem, vēl līdz šim nav izstrādāts un apstiprināts standarts, kurā pakešu līmeņa mērījuma lielumi (pakešu

zudums, aizture un trīces) būtu saistīti ar video kvalitātes vērtējumu. Ir pieejams tikai tehniska rakstura ieteikumu kopums, piemēram, *IETF* [131] un *DSLForum* [88] izstrādātie dokumenti, kuriem ir informatīva nozīme.

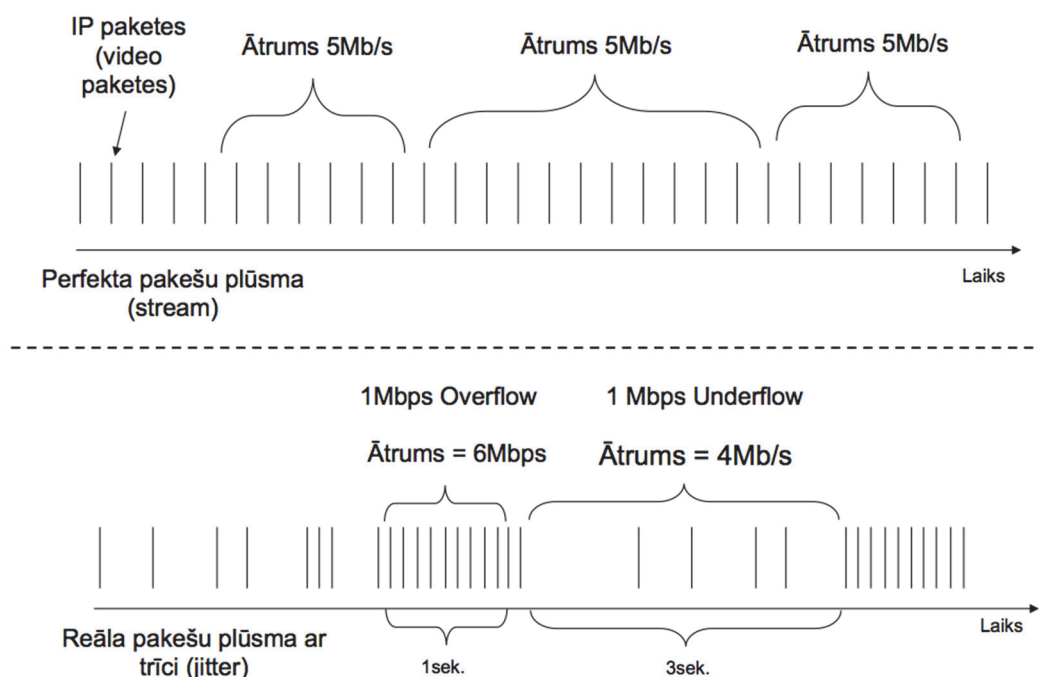
MDI (Media Delivery Index) ir [131] definēti divi izmērāmi lielumi: *DF (Delay Factor)* un *MLR (Media Loss Rate)*. *MDI:DF* ir paredzēts *CBR* video pakešu trīces mērījumiem, bet *VBR* video nav piemērots.

Izmantojot pakešu līmeņa mērījumus, t.sk. *MDI*, ir iespējams diagnosticēt, ka bojājumu vai kļūdu skaits ir atbilstošās pārraides tehnoloģijas normas robežās vai arī ārpus tās, piemēram, trīce, bet nav iespējams noteikt, par kādu *MOS* vai *DMOS* vērtību video kvalitāte ir samazinājusies.

Video kvalitātes mēraparatūras ražotāju piedāvātajos risinājumus parasti var nomērīt veselu virkni dažādu lielumu (pakešu zudumu, aizturi, trīci), bet ļoti bieži šiem lielumiem nav nekādas saistības ar video kvalitātes vērtējumu *MOS*. Vairumā gadījumu tiek izmantoti dažādi objektīvie video kvalitātes novērtēšanas algoritmi, piemēram, *PSNR*, *VQM*, *SSIM*. Kaut gan *PSNR* ir populāra un viena no vienkāršākām metodēm, tomēr tā vāji korelē ar video kvalitātes vērtējumu (*MOS*).

STB bufera izmēram ir jābūt pietiekoši lielam, lai ar tā palīdzību varētu kompensēt trīci, kā arī buferatmiņas pakešu pārpildi (*overflow*) vai neaizpildi (*underflow*). Buferatmiņas pārpildes un ne – aizpildes gadījumos [132] var rasties pakešu zudums (*packet loss*), vizuālu piemēru skatīt 1.13. attēlā.

1.13. attēlā ir vizualizēta perfekta video pakešu plūsma ar konstantu aizturi un trīci, kā arī reāla pakešu plūsma ar mainīgu trīci.



1.13. att. Pakešu pārraides process ar aizturēm un trīci

Klasiskās TV apraides tehnoloģijas, tādas kā *DVB – T/C/S* izmanto kanālu komutācijas tīkla tehnoloģiju principus, bet TV straumēšanas tehnoloģijas, piemēram, *IPTV* vai *OTT*, izmanto pakešu komutācijas tīklus. Pakešu komutācijas tehnoloģijām, lai nodrošinātu garantētu pārraides kvalitāti, ir jāveic tīkla resursu prioritizēšana un rezervēšana.

Packet Loss – pakešu zudums vai pakešu zudumu koeficients *PZK* vai *PLR* (*Packet Loss Rate*) ir parametrs, kas procentos nosaka zaudēto pakešu attiecību pret kopējo nosūtīto pakešu skaitu, kur *PZK* – pakešu zuduma koeficients procentos, un zaudēto un kopējo pakešu skaitu mēra noteiktā laika periodā.

$$PZK = \frac{\text{zaudēto pakešu skaits}}{\text{kopējais pakešu skaits}} * 100 \quad (1.15)$$

Aizture, aizkave, kavējums (*delay*) vai latentums (*latency*). Pakešu pārsūtīšanas aizture (*delay*) ir laika intervāls starp paketes nosūtīšanu un saņemšanu, kur *A*- ir aizture milisekundēs, *t*₁- pakešu saņemšanas laiks milisekundēs, *t*₂- paketes nosūtīšanas laiks milisekundēs, *n*- kopējais pakešu skaits.

$$A = \frac{\sum(t_1 - t_2)}{n} \quad (1.16).$$

Trīce (*jitter*) ir maksimālā starpība starp dažādu pakešu pārsūtīšanas aizturēm. Ja aizture starp dažādām paketēm ir konstanta, tad trīce ir vienāda ar nulli.

$$T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n - 1}}, \quad (1.17)$$

kur T - ir aizture milisekundēs, A_i - i-tā mērījuma aizture milisekundēs, $\bar{A}$ - aritmētiskā vidējā aizture milisekundēs, n - aiztures mērījumu skaits.

Pieslēguma pārraides ātrums ir maksimālais pārraides ātrums datu kanālā (Kbs , Mbs). To aprēķina pēc (1.18). formulas, kur P - pieslēguma pārraides ātrums, PA - pakešu apjoms baitos, kas nosūtīts noteiktā laika periodā, t - pakešu sūtīšanas laiks milisekundēs.

$$P = \frac{PA * 8}{t} \quad (1.18)$$

IPTV un *OTT* pakalpojuma piegādes gadījumos vispirms ir jākontrolē interneta pieslēguma parametri, jānodrošina video straumēšana, izmantojot *QoS* (*Quality of Service*), t.sk. pakešu zuduma koeficientu, aizturi, trīci un pārraides ātrumu. Otrkārt, visiem reālā laika video pārraides pakalpojumiem, t.sk. *IPTV*, *OTT* un *VoD* pētījumu rezultātā ir jādefinē interneta pieslēguma parametru robežvērtības, kā arī tās ir jāsaista ar *MOS*. Tomēr, lai varētu pētījuma rezultātus ieviest praksē, tos ir jāstandartizē.

Tā kā mūsdienās video datu plūsma migrē uz *IP* tīkliem, tad aizvien aktuālāki kļūst *IP* protokola līmeņa veiktspējas un kvalitātes mērījumi. Lai varētu nodrošināt *QoS*, ir jāzina, kādām normām jāatbilst *IP* veiktspējas un kvalitātes mērījumiem, piemēram, pakešu zuduma (*loss*) lielumam, aizturai (*delay*), trīcei (*jitter*), sajaukto pakešu skaitam (*reorder*), u.tml. *IETF* ir darba grupa "*IP Performance Metrics*", kura nodarbojas ar atbilstošu rekomendāciju un standartu izstrādi. Iespējams, nākotnē tiks izstrādāts dokuments par video datu plūsmas veiktspējas un kvalitātes mērījumiem, izmantojot *IP* protokolu.

1.7. Kopsavilkums un secinājumi

Pirmā nodaļa ietver video kompresijas un pārraides tehnoloģiju pārskatu. Pirmā apakšnodaļa ir veltīta cilvēka vizuālās uztveres īpatnību aprakstam. Otrā apakšnodaļa ir veltīta video kompresijas tehnoloģiju pārskatam, uzskaitītas un raksturotas populārākās video kompresijas tehnoloģijas un *MPEG (Moving Pictures Expert Group)* kompresijas darbības principi. Ceturtās apakšnodaļas ietvaros ir aprakstītas populārākās televīzijas apraides tehnoloģijas, kā arī veikts padziļināts pārskats par video pārraides tehnoloģijām, izmantojot IP protokolu. Piektā apakšnodaļa ir veltīta video pārraides datu plūsmas modeļu aprakstam. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīti dažādu televīzijas tehnoloģiju specifiskie pārraides kvalitātes mērījumi.

Darba nodaļas rezultāti un secinājumi:

- Ir veikts literatūras pārskats par cilvēka vizuālās uztveres galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri ietekmē video kvalitātes novērtējumu – ir noskaidroti svarīgākie cilvēka vizuālās uztveres parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;

- a. Cilvēka vizuālās uztveres jutība pret gaismu, kontrastu un krāsām;
- b. Cilvēka vizuālās uztveres testi – Ishihara, Snellen un Pelli-Robson.

Cilvēka redze ir jutīgāka pret spilgtuma un kontrasta izmaiņām, un mazāk jutīga pret krāsu skaitu, tāpēc viens no svarīgākajiem faktoriem ir eksperimentos lietoto monitoru kalibrēšana, spilgtuma līmeņa *AWB (Automatic White Balance)* un krāsu temperatūras mērījumi un noskaņošana, skatīt 3. nodaļu.

Lai vienkāršotā veidā varētu objektīvi pārbaudīt respondentu vizuālās uztveres atbilstību vispārpieņemtām normām, tika izmantoti trīs speciāli cilvēka vizuālās uztveres pārbaudes testi – redzes asuma pārbaudēm izmantoja *Snellen* metodi, krāsu redzes pārbaudēm izmantoja *Ishihara* metodi, bet kontrasta jutības pārbaudei izmantoja *Pelli-Robson* metodi, skatīt 3. nodaļu.

- Ir veikts literatūras pārskats par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri ietekmē video kvalitātes novērtējumu – ir noskaidroti svarīgākie video signāla interfeisa un pārraides parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;
 - Video interfeisi (analogie, ciparu, *YIQ*, *YPbPr*, *YCbCr*), video signāla kodētāju parametru konvertācijas;
 - Video pārraides parametri: pakešu zudums, aizture un trīce.

- Ir veikts literatūras pārskats par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu. Noskaidroti svarīgākie video signāla kompresijas parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu:
 - Video signāla kompresijas parametri: 576p un 1080i video signāla kodētāju parametru konvertācijas;
 - Video signāla kompresijas parametri: 720p un 1080i video signāla kodētāju parametru konvertācijas.

Augstāk minētais arī motivēja veikt eksperimentus par video kodēšanas, t.sk. video interfeisu un video signālu kompresijas parametru ietekmi uz kvalitāti, un video pārraides, t.sk. video pārraides zudumu ietekmi uz kvalitāti.

Pārraides sistēmās rodas pakešu aizture un trīce, kuru līdz zināmai robežai var kompensēt ar buferatmiņu. Savukārt sakaru kanāla pārrāvumi, kā arī buferatmiņas pārpildes un neaizpildes radīs pakešu zudumu. Trīce un aizture, kuru nevar kompensēt ar buferatmiņu, radīs pakešu zudumu. Iepriekš minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, ka darba eksperimentos ir veikti tieši pakešu zudumu, nevis pakešu aiztures un trīces ietekmes pārbaudes testi.

Puasona, normālo un vienmērīgo sadalījuma procesu ir paredzēts izmantot pie dažādiem nosacījumiem, tomēr jebkuru no viņiem var izmantot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku, Minētais arī motivēja darba eksperimentos pārbaudīti visus sadalījuma procesus, kuri bija izmantoti emulējot pakešu zuduma statistiku.

Video signālu kompresijas mērķis ir pie nemainīga video kvalitātes novērtējuma nodrošināt pēc iespējas efektīvāku kompresiju, piemēram, *H264 AVC P10*, salīdzinot ar *MPEG – 2 P2*, nodrošina līdz pat 50 % efektīvāku kompresiju. Līdzīga sakarība ir atrodama, *H265 HEVC* salīdzinot ar *H264 AVC P10*. Jo augstākas pakāpes kompresija, jo sarežģītāki dekodēšanas algoritmi un lielāka skaitļošanas jauda ir nepieciešama. Video kodētāju kompresijas efektivitāti var palielināt, ņemot vērā cilvēka vizuālās uztveres īpatnības un video sižeta uzbūves principus. Tāpēc video kvalitātes novērtējums vai *MOS* ir atkarīgs no video sižeta, izvēlēta kodētāja un kodēšanas parametriem. Jo augstāka kompresijas pakāpe, jo lielāka varbūtība novērot video bojājumus vai artefaktus, sevišķi pamanāmi tajos video sižeta apgabalos, kuros notiek kustība. Līdzīgu sakarību varēja novērot pakešu zuduma gadījumā, tomēr bojājumu vai vizuāli redzamu artefaktu forma bija būtiski atšķirīga. Pārraides tīkla pārslodzes un maršruta izmaiņas rada pakešu trīci, kuru var kompensēt ar bufera atmiņu. Savukārt sakaru kanāla pārrāvumi vai bufera atmiņas pārpildes radīs pakešu zudumu. Pakešu zudums ietekmē jebkuru tīkla trafiku, bet pakešu trīce var būtiski ietekmēt reālā laika datu plūsmu pakalpojumus, piemēram, *VoD (Video*

on Demand) uniraides video piegādes pakalpojumus, kuros tiek izmantotas *PVR (Personal Video Recorder)* tipa vadības komandas (ierakstīt, dzēst, atskaņot, pauze, paātrināta atskaņošana uz priekšu un atpakaļ), jo katru komandu izpilda lietotājs un gaida uz to nekavējošu reakciju. Liela pakešu aiztures vidējā vērtība un liela trīce tiešā veidā video attēla kvalitāti neietekmē, kamēr tās ir iespējams kompensēt ar bufera atmiņu. Savukārt reālā laika interaktīviem pakalpojumiem pakešu aiztures vidējā vērtība un liela trīce var būtiski ietekmēt kopējo pakalpojuma kvalitātes novērtējumu, kaut arī tiešā veidā tas neietekmē un nav saistīts ar video attēla kvalitāti. Pakešu zuduma rezultātā var parādīties būtiskas video kvalitātes novērtēšanas atšķirības starp dažādiem inkapsulācijas paņēmieniem un straumēšanas protokoliem, kā arī *MPEG* kodētāja *I*, *P* un *B* kadru datu sadalījumu starp šīm paketēm. Vienas *IP MPEG* paketes zudums ir vienāds ar septiņu *DVB MPEG* pakešu zudumu. Teorētiski, zaudējot *I* vai *P* kadrus, rezultātā jābūt lielākam video kvalitātes kritumam, nekā zaudējot *B* kadrus, bet reālās pārraides sistēmās pilns *I* vai *P* kadru zudums ir liels retums, jo katrs no šiem kadriem ir sadalīts daudzās neatkarīgās *IP* paketēs. Pārraides laikā tiek zaudētas paketes, kas ir daļa no viena vai vairākiem *I* un *P* kadriem. Tāpēc *MOS* ir tikai daļēji atkarīgs no *I* un *P* kadru bojājumu skaita, drīzāk daudz vairāk ir atkarīgs no bojājuma apjoma katrā konkrētā *I* un *P* kadrā, kā arī no bojāto *I* un *P* kadru attēlošanas vietas televīzijā ekrānā. Savukārt bojājumu atrašanās vieta uz televīzijā ekrāna ir atkarīga no video sižeta un tā kodēšanas struktūras *GOP* (*I*, *P*, *B* kadri). Kustības vektoru vai kustību izmaiņu attēlošana video sižetā ir atkarīga tieši no *P* kadriem. Pakešu zuduma rezultātā radītie *P* kadru bojājumi televīzijā ekrānā tiek attēloti skatītājam kā vizuāli redzami artefakti tieši tajās video sižeta vietās, kurās notiek kustība, līdz ar to skatītājs tam pievērš pastiprinātu uzmanību. Savukārt video sižeta apgabalos ar statiskām ainām *I* un *P* kadra bojājumus ir grūtāk pamanīt, jo skatītājs tiem pievērš mazāku uzmanību.

Literatūras pārskata un analīzes rezultātā var secināt, ka cilvēka redzes īpatnības (redzes leņķis, gaismas jūtība, krāsu redze un optiskās ilūzijas), kā arī kompresijas un pārraides ietekmes (pakešu zudums, aiztures un trīce) ir ļoti būtiskas, un tās ir jāņem vērā izstrādājot testgultni un metodiku eksperimentu veikšanai, skatīt 3. nodaļu un 4. nodaļu. Tāpēc turpmākās nodaļas darba uzdevumi ir sekojoši:

- Veikt literatūras pārskatu par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlēties atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem:
 - Noskaidrot, kura no metodēm ir vieglāk uztverama un saprotama;
 - Salīdzināt viena ekrāna un divu ekrānu metodes;
 - Salīdzināt 5, 9, 11 un 100 baļļu skalas;

- Izstrādāt rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēlei un atlasīt svarīgākos metodes izvēles kritērijus;
- Izstrādāt vadlīnijas video kvalitātes novērtēšanas metodei, ar kuras palīdzību var iegūt divdimensionālu video kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.

2. VIDEO KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS METODES

Otrā nodaļa ietver video kvalitātes novērtēšanas metožu pārskatu. Pirmā apakšnodaļa ietver informāciju par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, skalām, to apzīmējumiem un dažādiem lietojumiem, t.sk. aprakstītas un savstarpēji salīdzinātas dažādas video kvalitātes novērtēšanas metodes, sniegtas rekomendācijas un izstrādāts risinājums jaunai metodei. Otrajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodēm, to dažādiem lietojumiem, t.sk. *MSE*, *PSNR* un *SSIM*. Trešajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvo video kvalitātes novērtēšanu izmantojot *SA* un *TA*. Ceturtajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par video kvalitātes prognozēšanu izmantojot objektīvos video kvalitātes parametrus. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

2.1. Novērtēšanas metodes, skalas un pielietojuma sfēras

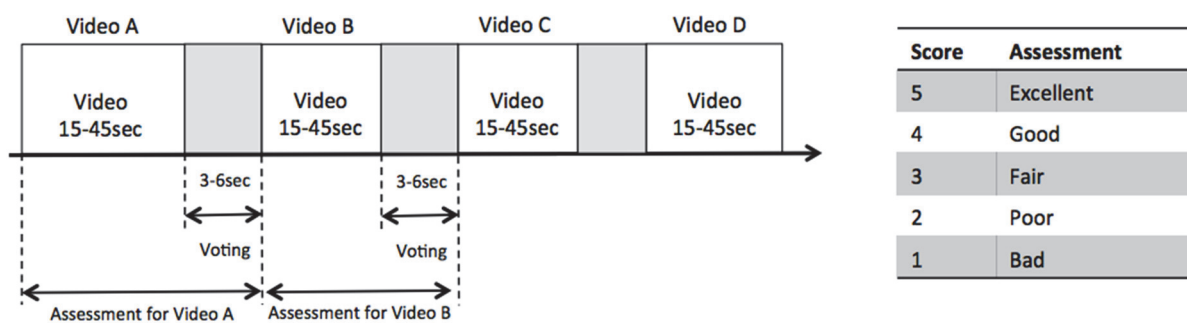
Praksē ir pieejami dažādi video kvalitātes novērtēšanas un prognozēšanas modeļi, bet vairumam no tiem nav nekādas saistības ar video kvalitātes vai *MOS* prognozēšanu. Tomēr atsevišķi no tiem ir izmantojami kā tīkla plānošanas rīki, piemēram, video telefonijas pārraides plānošana atbilstoši [33]. Minētais [33] nav ieviests praksē, jo veikt vairāk kā desmit dažādu video kodēšanas un pārraides parametru mērījumus, lai aprēķinātu iespējamo video pakalpojuma kvalitāti, ir ļoti sarežģīti un laikietilpīgi, varētu pat teikt, ka praksē to paveikt ir gandrīz neiespējami. Piemēram, [33] neskaidri un vispārināti ir definētas dažādu video parametru un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības, jo visu video parametru robežvērtības vēl nav izpētītas un aprobētas. Rezultātā var secināt, ka [33] modelis nav pilnvērtīgi izmantojams multimediju kvalitātes novērtēšanā, tam ir jānedefinē striktas parametru robežvērtības, kuras ir saistītas ar *MOS*. Tāpēc darbā ir veikti pārdomāti eksperimenti ar mērķi noskaidrot video kodēšanas un pārraides parametrus, to robežvērtības, kuras eksperimentu rezultātā ir jāsaista ar *MOS*. Lai varētu aprēķināt *MOS* ir jāizmanto atbilstoša video kvalitātes novērtēšanas metode. Tāpēc turpinājumā ir salīdzinātasa dažādas video kvalitātes novērtēšanas metodes, un analīzes rezultātā izvēlētas piemērotākās.

Mūsdienās ir pieejams salīdzinoši liels skaits video kvalitātes novērtēšanas metožu – gan starptautisko organizāciju rekomendācijās atzītās [22] [23], gan dažādu eksperimentu un zinātnisko pētījumu rezultātā ieteiktās metodes, piemēram, *MSUCQE* [133] vai *EBU* (*European Broadcasting Union*) *SAMVIQ* [134].

Video kvalitātes novērtēšanai izmanto vienkāršu *SS* (*Single Stimulus*) un *DS* (*Double Stimulus*), bet divkāršu vienlaicīga pielietojuma gadījumos izmanto metodi, kuru mēdz saukt par *SDS* (*Simultaneous Double Stimulus*). *DS* metodēm kvalitātes novērtēšanai izmanto video fragmenta pārus (oriģināls un bojāts), tos secīgi, vienu aiz otra attēlojot uz viena ekrāna, taču *SDS* metodei salīdzināmos video fragmentus rāda vienlaicīgi uz diviem identiskiem ekrāniem. *DS* un *SDS* metožu gadījumā izmanto gan vispārējās kvalitātes novērtēšanas, gan ienesto bojājumu novērtēšanas skalas. Savukārt *SS* metodē parasti izmanto vispārējās kvalitātes novērtēšanas skalas, kur, savstarpēji nesaistīti, video fragmenti viens aiz otra tiek attēloti uz viena ekrāna. Vairums *DS* un *SDS* metodes izmanto *FR* (*Full Reference*) testēšanā, jo ir pieejams oriģinālā video signāls, bet *SS* var izmantot gan *RR* (*Reduced Reference*), gan arī *NR* vai *ZR* (*No Reference* vai *Zero Reference*) testos, gadījumos, kad nav pieejams oriģinālā video signāls.

Ir pieejamas ļoti daudzas metodes, bet populārākās no tām ir *ACR*, *DCR*, *PC*, *DSCQS*, *SSCQS*, u.c. Katrai metodei ir savas īpatnības un pielietojums, piemēram, novērtēt kodēšanas vai pārraides bojājumus, novērtēt vispārējo vai ienesto bojājumu kvalitāti, salīdzinoši sarežģītas, laikietilpīgas un līdz ar to arī precīzas metodes, zemākas precizitātes metodes izmantojamas mājas apstākļos, turpretī augstas precizitātes metodes ir izmantojamas testgultnes apstākļos, u.tml. Turpmāk tekstā par katru metodi detalizētāk, kā arī par metožu novērtējumu un salīdzinājumu.

ACR (*Absolute Category Rating*) [23] ir zināma kā *SS* (*Single Stimulus*) metode, kuru izmanto, novērtējot video kvalitāti pēc piecu baļļu skalas (5 – Lieliska (*Excellent*), 4 – Laba (*Good*), 3 – Mērena, vidēja (*Fair*), 2 – Slikta, vāja (*Poor*), 1 – Ļoti slikta, vāja (*Bad*)), līdzīgi audio kvalitātes novērtēšanai atbilstoši [128], skatīt 2.1. tabulā un tās vērtējumu izsakot ar vispārējās kvalitātes *MOS* (*Mean Opinion Score*). Atbilstoši 2.1. attēlam dažādas kvalitātes video fragmenti, t.sk. oriģināli, tiek attēloti secīgi, viens aiz otra jauktā secībā, pēc katra video fragmenta tiek rādīts pelēks ekrāns ar aicinājumu novērtēt kvalitāti pēc vispārējās kvalitātes novērtēšanas skalas, atbilstoši 2.1. tabulai.



2.1. att. ACR video fragmentu attēlošanas process

Dažkārt MOS ar vērtējumu 2.5 tiek uzskatīts par zemāko pieļaujamo kvalitātes robežu (*acceptance level*). Lai novērstu dažāda video satura vērtējuma ietekmi, tiek izmantota ACR – HR metode.

ACR – HR (*Hidden Reference*) ir viena no vieglāk saprotamām metodēm, kuru var izmantot tipiskie lietotāji (ne – eksperti), novērtējot absolūto video kvalitāti gan oriģināliem, gan bojātiem video fragmentiem, tad no iegūtajām MOS vērtībām aprēķina DMOS. DMOS (*Differential MOS*) vai kvalitātes starpības novērtējums tiek aprēķināts starp pārraidītā (*processed*) video fragmenta MOS un nezināmā oriģinālā (*reference*) video fragmenta MOS:

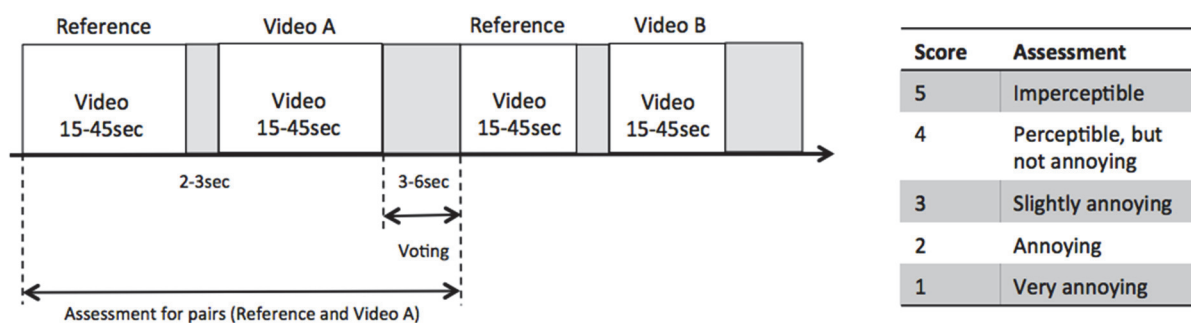
$$DMOS(\text{Differential}) = MOS_{\text{processed}} - MOS_{\text{reference}} + 5 \quad (2.1)$$

DMOS “5” atbilst vērtējumam “Lieliski” (*Excellent*) un “1” atbilst vērtējumam “Ļoti slikti, vāji” (*Bad*). Ja $DMOS > “5”$, kas norāda uz to, ka pārraidītā (*processed*) video fragments ir novērtēts ar augstāku kvalitāti nekā tā nezināmais oriģinālā (*reference*) video fragments, tad šo rezultātu uzskata par spēkā esošo. Ja nepieciešama augstāka precizitāte, tad var izmantot speciālu MOS saspiešanas funkciju, lai novērstu atsevišķu indivīdu neprecīzo balsojumu ietekmi uz kopējo MOS:

$$DMOS(\text{Differential})_{\text{crushed}} = \frac{(7 \times DMOS)}{(2 + DMOS)}, \text{ when } DMOS > 5 \quad (2.2)$$

DCR (*Degradation Category Rating*) [23] ir DS (*Double Stimulus*) metode, kura izmanto oriģinālu un bojātu video fragmentu novērtēšanai pēc piecu baļļu bojājumu novērtējumu skalas (5 – Nemanāmi (*Imperceptible*), 4 – Manāmi, bet nav kaitinoši (*Perceptible, but not annoying*), 3 – Nedaudz kaitinoši (*Slightly annoying*), 2 – Kaitinoši, apgūtinoši (*Annoying*), 1 – Ļoti kaitinoši (*Very annoying*)), skatīt 2.1. tabulu un tā vērtējumu izsakot ar ienesto bojājumu MOS (*Mean Opinion Score*). Atbilstoši 2.2. attēlam vispirms tiek

attēlots oriģināls video fragments, tad bojātais video fragments, pēc katra video fragmenta pāra attēlošanas tiek rādīts pelēks ekrāns ar aicinājumu novērtēt kvalitāti pēc 2.1. tabulas ienesto bojājumu kvalitātes novērtēšanas skalas. *DCR MOS* vērtības apzīmē ar *DMOS* (*Degradation MOS*), bet *ACR* aprēķinātās *MOS* vērtības ir *DMOS* (*Differential MOS*).

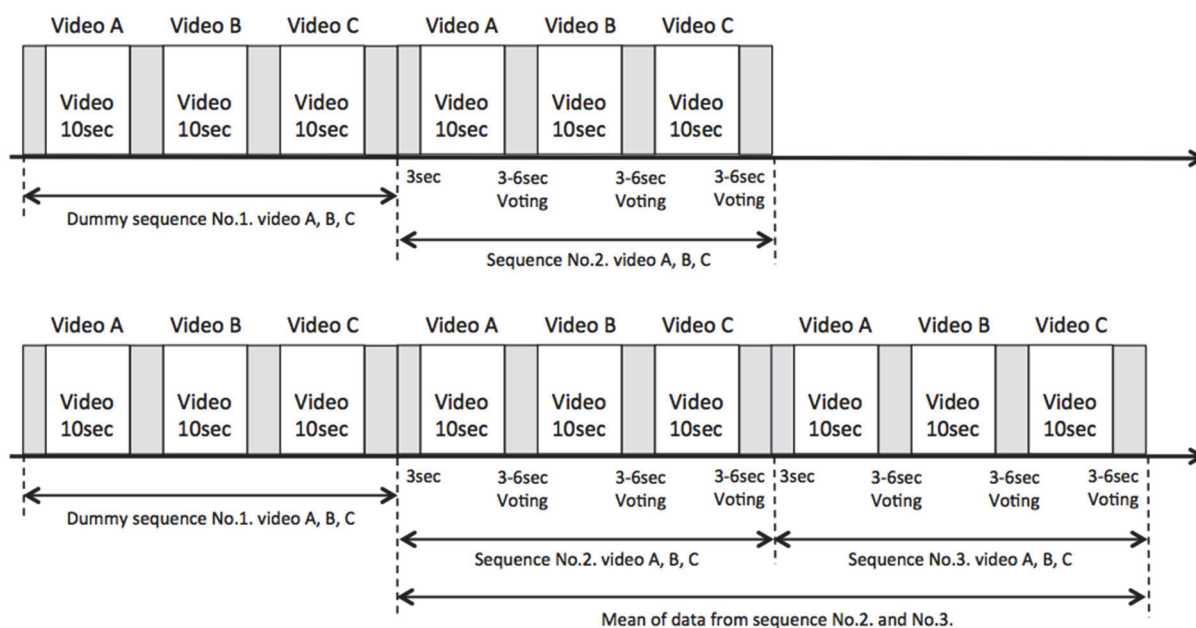


2.2. att. *DCR* video fragmentu attēlošanas process

Nelielu video kvalitātes atšķirību novērtēšanai starp diviem video fragmentiem *DCR* metodei būs augstāka precizitāte, salīdzinot ar *ACR*, bet nepieciešams gandrīz divas reizes ilgāks testa laiks. Dažkārt *MOS* vērtējumi 4.5, 3.5 un 2.5 tiek uzskatīti par kvalitātes robežām, kur 4.5 tiek uzskatīts par samazinātās kvalitātes detektēšanas robežu, 3.5 par pieļaujamo kvalitātes robežu un 2.5 par zemāko paciešamo kvalitātes robežu.

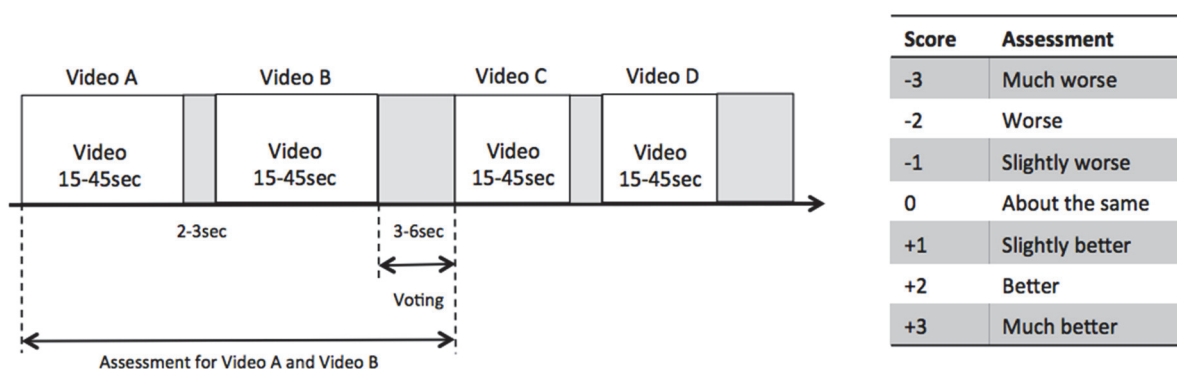
Atsevišķos pētījumos [135] *MPEG* video kompresijas pakāpēs novērtēšanai izmanto *DCR* metodi ar *ACR* metodes vispārējās kvalitātes 5 baļļu novērtēšanas skalu (5 – Lieliska (*Excellent*), 4 – Laba (*Good*), 3 – Mērena, vidēja (*Fair*), 2 – Slikta, vāja (*Poor*), 1 – Ļoti slikta, vāja (*Bad*)). Dažādos literatūras avotos [23], [128] *DCR* metodi mēdz dēvēt par *DSIS* (*Double Stimulus Impairment Scale*) [22] vai *EBU* (*European Broadcasting Union*).

SSMR (*Single Stimulus with Multiple Repetitions*) vairāku video fragmentu secība (3 – 5 video fragmenti) tiek attēlots divējādi – vai nu divas reizes vai trīs reizes pēc kārtas. Pirmajā gadījumā pirmā video fragmentu secība aprēķinos netiek ņemta vērā, to var attiecināt uz respondentu kalibrāciju. Arī otrajā gadījumā pirmā video fragmentu secība netiek ņemta vērā, bet no otrās un trešās video fragmentu secības tiek aprēķināta vidējā vērtība. *SSMR* gadījumā parasti izmanto vispārējās un ienesto bojājumu novērtēšanas skalas atbilstoši 2.1. tabulai, bet atsevišķos gadījumos var izmantot arī skalas atbilstoši 2.2. tabulai vai 2.3. tabulai.



2.3. att. SSIMR video fragmentu attēlošanas process

PC (Pair Comparison) [23] izmanto divu video fragmentu pāru kvalitātes atšķirību novērtēšanai pēc septiņu baļļu salīdzinājumu skalas (“-3” – “Daudz sliktāka” (*Much worse*), “-2” – “Sliktāka” (*Worse*), “-1” – “Nedaudz sliktāka” (*Slightly worse*), “0” – “Tāda pati, identiska” (*About the same*), “+1” – “Nedaudz labāka” (*Slightly better*), “+2” – “Labāka” (*Better*), “+3” – “Daudz labāka” (*Much better*)), skatīt 2.3. tabulu. Minēto 7 baļļu novērtēšanas skalu mēdz dēvēt par CCR (Comparison Category Rating) pēc [128] vai DSCS (Double Stimulus Comparison Scale) pēc [22].



Score	Assessment
-3	Much worse
-2	Worse
-1	Slightly worse
0	About the same
+1	Slightly better
+2	Better
+3	Much better

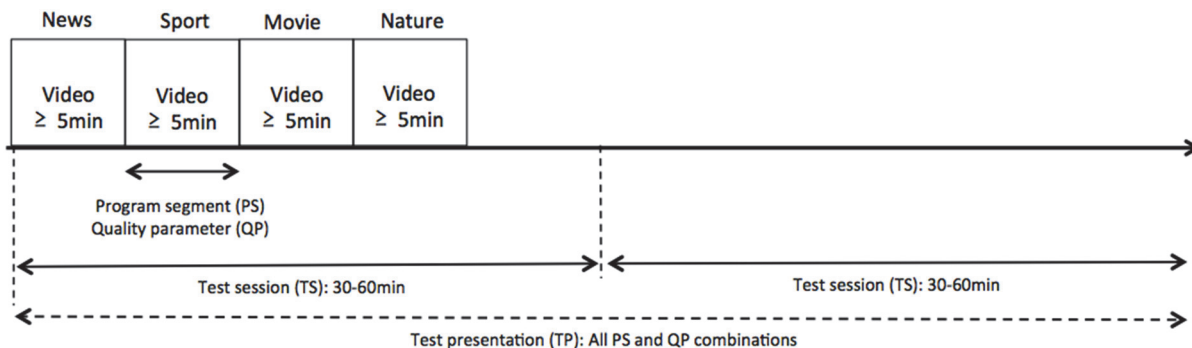
2.4. att. PC video fragmentu attēlošanas process

Atbilstoši 2.4. attēlam tiek attēloti divi dažādas kvalitātes video fragmenti, pēc katra video fragmenta pāra attēlošanas tiek rādīts pelēks ekrāns ar aicinājumu novērtēt kvalitāti pēc 2.3. tabulas vispārējās kvalitātes novērtēšanas skalas. PC novērtējuma rezultāti ir atkarīgi no

video fragmentu attēlošanas secības, tāpēc video kvalitātes novērtēšanas rezultāti, kur iegūti ar šo metodi, ir visai relatīvi, nav absolūti, kā arī nepieciešams lielāks testa laiks salīdzinājumā ar *ACR* vai *DCR*. Tomēr, izmantojot *PC* metodi, ir iespējams novērtēt ļoti smalkas video kvalitātes atšķirības starp diviem video fragmentiem gan vienkārša *PC*, gan divkāršu metožu gadījumā, piemēram, *SCACJ*.

PC gadījumā salīdzināmie video fragmenti secīgi viens aiz otra tiek rādīti uz viena ekrāna, bet *SCACJ* (*Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgement*) un *SDSCE* (*Simultaneous Double Stimulus for Continuous Evaluation*) [22] gadījumos abi salīdzināmie video fragmenti tiek rādīti vienlaicīgi uz diviem identiskiem ekrāniem, kur “*Video A*” uz kreisā ekrāna un “*Video B*” uz labā ekrāna, skatīt 2.3. tabulā. Šo paņēmieni mēdz dēvēt par *SDS* (*Simultaneous Double Stimulus*).

SSCQE (*Single Stimulus Continuous Quality Evaluation*) [22] ir zināma kā *SS* (*Single Stimulus*) metode, kuru izmanto, novērtējot video kvalitāti, visbiežāk izmanto 100 baļļu skalu, skatīt 2.2. tabulā un tā vērtējumu izsaka ar vispārējās kvalitātes *MOS* (*Mean Opinion Score*). Atbilstoši 2.5. attēlam metodi izmanto salīdzinoši garos video kvalitātes novērtēšanas testos 30–60 minūtes, un vērtēšanā izmanto nepārtrauktu balsošanas skalu, atbilstoši 2.7. attēlam.

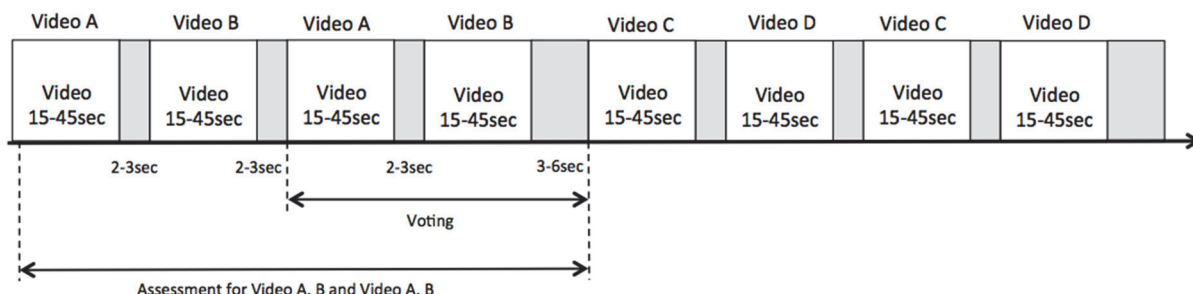


2.5. att. *SSCQE* video fragmentu attēlošanas process

Testā tiek izmantota 100 baļļu nepārtrauktas balsošanas skala. Nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanā vēlams izmantot fizisku ierīci, kura ir aprīkota ar slīdni nepārtrauktai novērtējuma ievadei, iespējams, kā alternatīvu var izmantot arī skārienjūtīgu ekrānu. *SSCQE* un *SDSCE* (*Simultaneous Double Stimulus for Continuous Evaluation*) ļauj iegūt laicrindas datus par video kvalitātes novērtējumu. Metode ir sarežģīta un paredzēta ekspertiem. Iespējams, šo metodi var izmantot *NR* vai *ZR* (*No Reference* vai *Zero Reference*) video kvalitātes algoritmu testēšanā.

DSCQS (*Double-Stimulus Continuous Quality Scale*) [22] ir *DS* (*Double Stimulus*) metode, kura izmanto oriģinālu un bojātu video fragmentu novērtēšanai pēc piecu baļļu

nepārtrauktas vispārējās kvalitātes novērtējumu skalas (5 – Lieliska (*Excellent*), 4 – Laba (*Good*), 3 – Mērena, vidēja (*Fair*), 2 – Slikta, vāja (*Poor*), 1 – Ļoti slikta, vāja (*Bad*)), skatīt 2.1. tabulā un tā vērtējumu izsakot ar *MOS* (*Mean Opinion Score*).



2.6. att. *DSCQS* video fragmentu attēlošanas process

Atbilstoši 2.6. attēlam, dažādas kvalitātes video fragmenti pa pāriem, t.sk. oriģināli (*reference*) video fragmenti, tiek attēloti secīgi viens aiz otra jauktā secībā, un otrā video fragmentu pāra atskaņošanas laikā ir jāveic nepārtraukta video kvalitātes novērtēšana pēc 2.1. tabulas vispārējās kvalitātes novērtēšanas skalas.

DSCQS testā tiek izmantota 5 baļļu nepārtraukta balsošanas skala. Novērtējuma skalu normalizē no 0 – 100 (0 minimālā un 100 maksimālā vērtība) un katram video fragmentu pārim aprēķina atšķirības. Oriģinālā (*reference*) video fragmenta novērtējuma rezultāts tiek atņemts no bojātā (*impaired*) video fragmenta novērtējuma. Jo mazāka *DSCQS* vērtība, jo labāka bojātā video fragmenta kvalitāte.

SAMVIQ (*Subjective Assessment of Multimedia Video Quality*) [136] ir video kvalitātes novērtēšanas metode, kuras pamatprincipi ir tieši tādi paši kā audio kvalitātes novērtēšanas metodei *MUSHRA* (*Multiple Stimulus with Hidden Reference and Anchor*) [137]. Minētās metodes ir paredzētas nelielu bojājumu kvalitātes novērtēšanai. Metode ir realizēta datora programmatūras veidā, kur vērtētājs pats var izvēlēties gan video, kuru vēlas vērtēt, gan kārtību, kādā vēlas vērtēt, atļauts neierobežoti ilgi vērtēt, apturēt un atjaunot video atskaņošanu, kā arī atļauts labot vērtējumus. Video fragmenti tiek atskaņoti secīgi viens aiz otra, kur oriģinālais video fragments vienmēr ir norādīts, lai to viegli var atpazīt, veicot salīdzināšanu ar vairākiem, dažādas pakāpes bojātiem video fragmentiem. Vērtēšanai visbiežāk izmanto diskreto 100 baļļu skalu. Augstāk minētie argumenti, iespējams, var nodrošināt metodei augstāku precizitāti, stabilitāti un atkārtotamību.

Pētījumos un dažādos ražotāju produktos ir sastopamas nestandartizētas metodes, piemēram, *MSUCQE* (*MSU Continuous Quality Evaluation*) ir *SDS* metode, kur, izmantojot

datoru ar atbilstošu programmatūru, vienlaicīgi tiek rādīti divi video fragmenti, kur “*Video A*” uz kreisā ekrāna un “*Video B*” uz labā ekrāna. Video fragmentu atskaņošanas laikā eksperts nepārtraukti salīdzina abus video fragmentus, nospiežot klaviatūras taustiņu “*bultiņa pa kreisi*”, ja, kaut kādā laika momentā, kreisā ekrāna video kvalitāte bija sliktāka par labā ekrāna video kvalitāti, vai arī taustiņu “*bultiņa pa labi*”, ja, kaut kādā momentā “labā” ekrāna video kvalitāte bija sliktāka.

SS metodes visbiežāk izmanto diskrešu 5 vai 9 baļļu skalu, bet tajās metodēs, kurās netiek izmantots oriģinālais video signāls, ir vēlams izmantot diskrešu 11 baļļu skalu, sauktu par SSNCS (*Single Stimulus Numerical Categorical*) [138]. Savukārt DS metodēs izmanto gan 100 baļļu nepārtrauktas balsošanas skalu, gan arī diskrešu 5, 9 vai 11 baļļu balsošanas skalu.

2.1. tabulā ir attēloti 5 baļļu vispārējās kvalitātes un bojājumu ietekmes kvalitātes novērtēšanas skalas vērtību apzīmējumi.

2.1. tabula

Vispārējās kvalitātes un ienesto bojājumu novērtējuma skalas (5 – balles)

Vērtība	Vispārējās kvalitātes novērtējuma skala (<i>quality scale</i>)	Ienesto bojājumu novērtējuma skala (<i>impairment scale</i>)
1	Ļoti slikta, vāja (<i>Bad</i>)	Ļoti kaitinoši (<i>Very Annoying</i>)
2	Slikta, vāja (<i>Poor</i>)	Kaitinoši, apgūtinoši (<i>Annoying</i>)
3	Mērena, vidēja (<i>Fair</i>)	Nedaudz kaitinoši (<i>Slightly Annoying</i>)
4	Laba (<i>Good</i>)	Manāmi, bet nav kaitinoši (<i>Perceptible, but not Annoying</i>)
5	Lieliska (<i>Excellent</i>)	Nemanāmi (<i>Imperceptible</i>)

2.2. tabulā ir attēlotas 9, 11 un 100 baļļu vispārējās kvalitātes novērtēšanas skalas vērtību apzīmējumi.

2.2. tabula

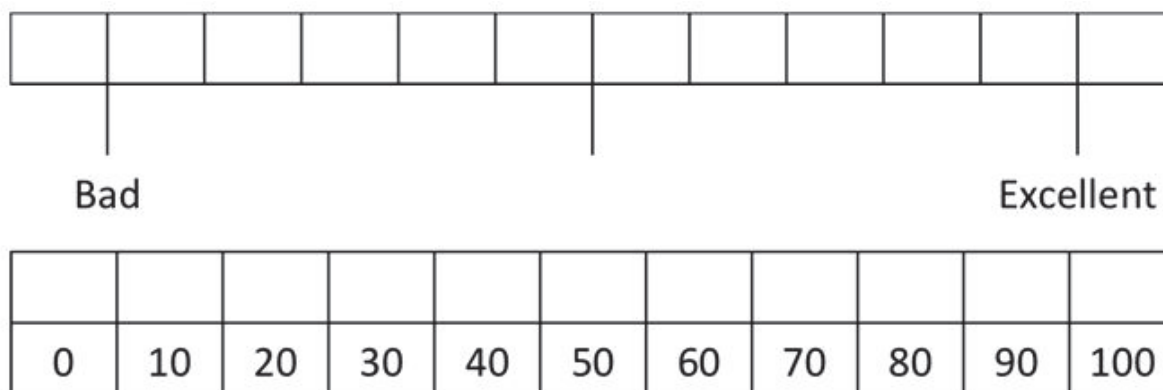
Papildu kvalitātes novērtējuma skalas (9, 11 un 100 balles)

Vērtība	9 – balles	Vērtība	11 – balles	Vērtība	100 – balles
		10	*	100	*
9	Lieliska (<i>Excellent</i>)	9	Lieliska (<i>Excellent</i>)	90	Lieliska (<i>Excellent</i>)
8		8		80	

7	Laba (<i>Good</i>)	7	Laba (<i>Good</i>)	70	Laba (<i>Good</i>)
6		6		60	
5	Mērena, vidēja (<i>Fair</i>)	5	Mērena, vidēja (<i>Fair</i>)	50	Mērena, vidēja (<i>Fair</i>)
4		4		40	
3	Slikta, vāja (<i>Poor</i>)	3	Slikta, vāja (<i>Poor</i>)	30	Slikta, vāja (<i>Poor</i>)
2		2		20	
1	Ļoti slikta, vāja (<i>Bad</i>)	1	Ļoti slikta, vāja (<i>Bad</i>)	10	Ļoti slikta, vāja (<i>Bad</i>)
0		0	**	0	**

* “Turpmāka kvalitātes uzlabošana nav iespējama”, un ** “Sliktāku kvalitāti nevar iedomāties”.

Savukārt 2.7. attēlā ir vizualizēta nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas skala.



2.7. att. Vērtējuma skala nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas testiem

Nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas metodē respondenti izmanto fizisku ierīci, kura ir aprīkota ar slīdni un pieslēgta rezultātu ierakstīšanas iekārtai. Fiziskai ierīcei ar slīdni ir jāatbilst šādiem nosacījumiem: ierīcei ir jāatrodas fiksētā stāvoklī, piemēram, piemontētai pie galda; slīdnim ir jābūt ar 10 cm lineāri sadalītu skalu, piemēram, 1 mm ir 1 iedaļa; slīdņa pārvietošanās mehānismam visas skalas garumā ir jābūt vienmērīgam (vienmērīga pretestība, neamortizējas, neiesprūst, neklikšķ); rezultātu ierakstīšanai jābūt vismaz 2 reizes sekundē. Iespējams, ka minētās aparatūras vietā var izmantot planšetdatoru ar skārienjūtīgu ekrānu, kur

slīdņa vietā ir kursora, kas ar pirkstu ir jāpārvieto pa lineāri sadalītu 10cm skalu. Tieši tāda pati alternatīva var būt arī datorā, kur, ar peles palīdzību, ekrānā kursora tiek pārvietots pa lineāri sadalītu 10 cm skalu. Minētā alternatīva nederēs respondentiem, kuriem ir vājas datorprasmes (īemaņas darbā ar datorpeli un skārienjūtīgu ekrānu), jo tik īsā laikā cilvēkam būs grūti saprast un pierast pie datorpeles un skārienjūtīga ekrāna darbības principiem, tāpēc tas var negatīvi ietekmēt testēšanas rezultātus.

Nepārtrauktas kvalitātes novērtēšanas skalai var būt vairākas variācijas: vērtēšanas skalā var būt izcelti un atzīmēti tikai daži atskautes punkti, piemēram, vērtējums “Ļoti slikti, vāji”: (*Bad*), “Lieliski” (*Excellent*) un vidus punkts; vērtēšanas skalā var būt izcelti un atzīmēti visi iespējamie atskautes punkti, piemēram, no vērtējuma “0” līdz “100”, skatīt 2.7. attēlu.

2.3. tabula

PC un SCACJ testu vērtējumu skala (7 balles)

Vērtība	Vispārējās kvalitātes un bojājumu novērtējuma skala (quality and impairment scale)			Vērtība
-3	Daudz sliktāka (<i>Much worse</i>)	Kreisā video kvalitāte ir daudz sliktāka par labā video kvalitāti		
-2	Sliktāka (<i>Worse</i>)	Kreisā video kvalitāte ir sliktāka par labā video kvalitāti		
-1	Nedaudz sliktāka (<i>Slightly worse</i>)	Kreisā video kvalitāte ir nedaudz sliktāka par labā video kvalitāti		
0	Tāda pati, identiska (<i>The same</i>)	Abiem (labā un kreisā) ir identiska video kvalitāte	Tāda pati, identiska (<i>The same</i>)	0
		Labā video kvalitāte ir nedaudz labāka par kreisā video kvalitāti	Nedaudz labāka (<i>Slightly better</i>)	+1
		Labā video kvalitāte ir labāka par kreisā video kvalitāti	Labāka (<i>Better</i>)	+2

		Labā video kvalitāte ir daudz labāka par kreisā video kvalitāti	Daudz labāka (<i>Much better</i>)	+3
--	--	---	-------------------------------------	----

2.3. tabulā ir attēloti *PC* un *SCACJ* metodēs izmantoto novērtēšanas skalu apzīmējumi. Kā jau tas augstāk ir izklāstīts, tad viena un tā pati balsošanas skala var tikt izmantota dažādās video kvalitātes novērtēšanas metodēs.

Sākot ar video kodēšanu, pārraidi, un beidzot ar video signāla uztveri, pēcapstrādi un attēlošanu uz skatītāja ekrāna, iespējamās attēla kvalitātes bojājumus var iedalīt vairākās, nosacītās grupās, skatīt 2.4. tabulā. Visus sagrupētos video kvalitātes bojājumus nav iespējams strikti klasificēt, piešķirot to kādam noteiktam video signāla piegādes procesam: kodēšanai, pārraidei, pēcapstrādei vai vizualizācijai ekrānā. Video kvalitātes pasliktināšanās, kuru novērot kā bloku efektu (*blocking*) video attēlā var izraisīt divi dažādi procesi gan kompresija, gan pakešu zudums. Vienu un to pašu bojājumu var izraisīt gan viens, gan vairāki video signāla piegādes procesi.

2.4. tabula

Video signāla kvalitātes bojājumi

Video kodēšanas un pārraides bojājumi	Video interfeisu un pēcapstrādes kropļojumi
Bloku efekts (<i>blocking</i> (<i>macroblocks</i> , <i>blocks</i> , <i>slices</i>); izplūdis, neskaidrs, attēla fragments ar samazinātu atšķirtspēju (<i>blurring</i>); krāsu atstarošanās (<i>color bleeding</i>), objekta kontūru dubultošanās (<i>ringing</i>); kāpņveida (<i>staircase</i>) un mozaīkas (<i>mosaic</i>) efekti; viltus kontūras (<i>false counturing and edge</i>); fluktuācijas (<i>fluctuation</i>), mirgošana (<i>flickering</i>), moskīta (<i>mosquito</i>) troksnis, raustīšanās, saraustīts, neritmisks (<i> jerkiness</i>); objektu kustību kompensācijas neatbilstības; stacionāru objektu fluktuācijas (<i>fluctuation</i>); izsmērēts, izplūdis (<i>smearing</i>) attēls; attēla mērogošana (<i>video scaling</i>), attēla iesaldēšana (<i>picture freeze</i>), u.c.	Spilgtuma (<i>brightness</i>), kontrasta (<i>contrasts</i>), krāsu tonalitātes un piesātinājuma (<i>hue, saturation, gamma</i>) attēlošana; spožums, spilgtums (<i>luminance</i>), apgaismojums, apgaismotība (<i>illuminance</i>); attēla stabilitātes, atveidošanas un nomaiņas ātrums ekrānā; izsmērēts, izplūdis (<i>smearing</i>) attēls; moskīta (<i>mosquito</i>), sāls un pipari (<i>salt-and-pepper</i>) troksnis; raustīšanās, saraustīts, neritmisks (<i> jerkiness</i>); mirgošana (<i>flickering</i>); izteikti vienas vai vairāku krāsu dominance salīdzinājumā ar citām krāsām, u.c.

Analogās TV pārraides bojājumi vai arī bojājumi, kuri var rasties ciparu sistēmās, izmantojot analogos interfeisus (*VGA, YPbPr, CVBS/CCVS*): vertikālās un horizontālās sinhronizācijas novirzes (*V&H Sync offset*), viena vai vairāku *R, G, B* krāsu kanālu tonalitātes, piesātinājuma sinhronizācijas novirzes, mēroga izmaiņas, izplūšana, hromātiskā aberācija *CA (Chromatic Aberration)*, u.c.

2.5. tabulā ir uzskaitītas *ITU* rekomendācijas, kurās ir iekļautas dažādas video kvalitātes novērtēšanas metodes. Piemēram, [22] ir paredzēta apraides televīzijas video signāla kvalitātes novērtēšanai strikti kontrolētos testgultnes apstākļos (telpas apgaismojums, monitora spilgtums, attālums līdz monitoram, fona troksnis, u.tml.), bet [23] ir paredzēts multimediju *VoD (Video on Demand)*, videotelefonija, video konference) pakalpojumu video kvalitātes novērtēšanai testgultnes apstākļos. Apvienojot [23] un [128], ir izstrādāta [127], kura paredzēta summārai audiālās un vizuālās kvalitātes novērtēšanai. [139] paredzēts video kvalitātes novērtēšanai, specifisku uzdevumu izpildei, piemēram, apsardzes video novērošanas sistēma ir paredzēta automašīnas numura zīmju nolasīšanai. Savukārt J.140 – 149 sērijas rekomendācijas ir veltītas ciparu televīzijas *QoS (Quality of Service)* mērījumiem, t.sk. televīzijas objektīvās 2.10. tabulā un subjektīvās 2.5. tabulā video kvalitātes novērtēšanai.

2.5. tabula

Video kvalitātes novērtēšanas metodes

Dokuments	Nosaukums
ITU – R Rec. [22]	Televīzijas attēla kvalitātes subjektīvās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures</i>)
ITU – T Rec. [23]	Multivides lietojamprogrammu subjektīvās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Subjective video quality assessment methods for multimedia applications</i>)
ITU – T Rec. [127]	Multivides lietojamprogrammu subjektīvās audiovizuālās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications</i>)
ITU – T Rec. [139]	Atpazīšanas uzdevumu subjektīvās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Subjective video quality assessment methods for recognition tasks</i>)

ITU – R Rec. [140]	Augstas izšķirtspējas televīzijas attēla kvalitātes subjektīvās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Subjective assessment methods for image quality in high-definition television</i>)
ITU – T Rec. [141]	Ciparu kabeļtelevīzijas attēla kvalitātes subjektīvās kvalitātes novērtēšanas metodes (<i>Subjective picture quality assessment for digital cable television systems</i>)
ITU – R Rec. [138]	Pētījumi par vienotu attēla kvalitātes novērtēšanas metodi (<i>Studies toward the unification of picture assessment methodology</i>)
ITU – T Rec. [142]	Objektīvās kvalitātes prognozēšanas modeļu metodes, metrikas, statistiskā novērtēšana un salīdzinājums (<i>Methods, metrics and procedures for statistical evaluation, qualification and comparison of objective quality prediction models</i>)

12. pielikumā ir apkopotas ITU rekomendācijās atrodamās subjektīvās un objektīvas kvalitātes novērtēšanas metodes.

2.1.1. Kvalitātes novērtēšanas metožu salīdzinājums

Lai veiktu video kvalitātes testēšanu no 2.5. tabulas ir jāizvēlas konkrēta video kvalitātes novērtēšanas metode.

Primāri metodi izvēlas pēc tā:

- kas jānovērtē – kodēšanas vai pārraides procesu ietekme uz kvalitāti,
- kā jānovērtē – vispārējā kvalitāte (*quality*) vai bojājumu ietekmes kvalitāte (*impairment*),
- kura no metodēm respondentiem ir vieglāk uztverama un saprotama.

Sekundāri ir jāņem vērā:

- kura no metodēm ir ātrāka,
- kura no metodēm ir precīzāka.

Pētījumos *MOS* ir atzīts par (*de-facto*) vispārējās video (*quality*) kvalitātes un ienesto bojājumu (*impairment*) novērtējuma metriku (*metrica*), bet ir pieejamas arī alternatīvas, kas atspoguļotas 2.6. tabulā.

2.6. tabula

MOS alternatīvas

Novērtēšanas metrika		Kvalitāte (<i>Quality</i>)	Bojājumi (<i>Impairment</i>)	Akceptēšana (<i>Acceptability</i>)
<i>MOS</i>	<i>Mean Opinion Score</i>	Jā	Jā	
<i>JND</i>	<i>Just Noticeable Difference</i>		Jā	
<i>GoB un PoW</i>	<i>Good or Better un Poor or Worse</i>			Jā
<i>QoP</i>	<i>Quality of Perception</i>	Jā		Jā

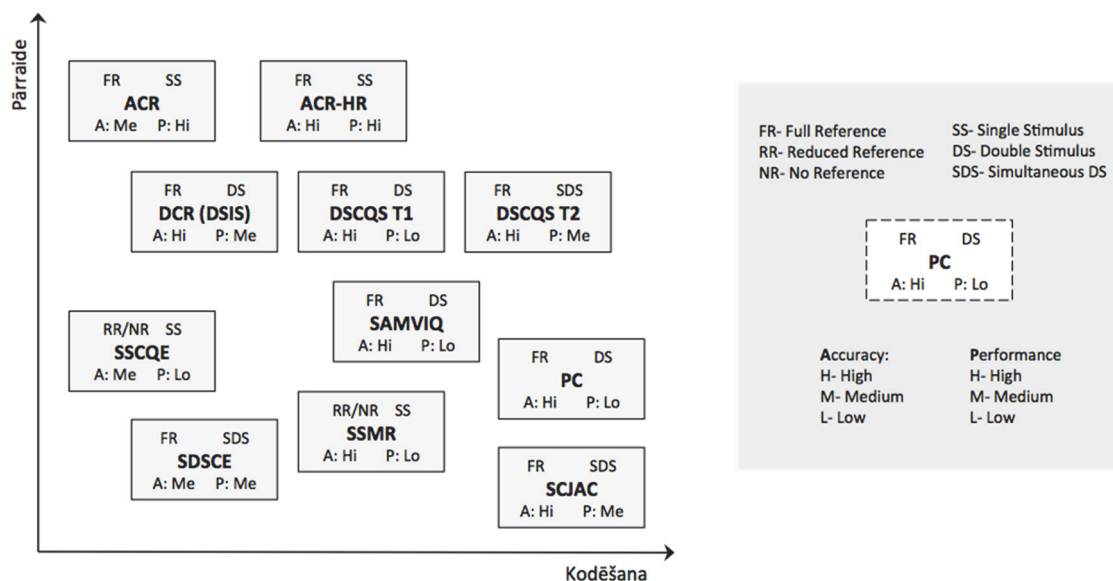
Novērtēšanas metodes pēc pielietojuma var iedalīt: vispārējās kvalitātes novērtēšana (*quality*), bojājumu ietekmes novērtēšana (*impairment*) un pakalpojuma līmeņa akceptēšanas (*acceptance vai acceptability*) novērtējums.

MOS mēra pakalpojuma apmierinātības līmeni [29], bet *GoP* un *PoW* tiek izmantots pakalpojuma akceptēšanas novērtējumam [32]. Līdz šim *GoP* un *PoW* ir izmantotas telefonijas balss pārraides kvalitātes novērtējumam, tas gan nav šķērslis, lai to nākotnē pielāgotu arī video pārraides kvalitātes novērtējumam. Savukārt *QoP* gadījumā apmierinātības un akceptēšanas līmeni novērtē atsevišķi [143]. *QoP* ir lietotāja orientēts [144] multivides (video, audio un teksts) kvalitātes novērtējums, kuru iegūst pēc sarežģītas un laikietilpīgas procedūras – jautājumi un atbildes par video kvalitāti un sižetu [145].

JND (*Just Noticeable Difference*) izmanto eksperimentālajā psiholoģijā, kur to mēdz dēvēt par cilvēka sajūtu un uztveres mēru. *Weber–Fechner* likuma (*Weber* kontrasts, konstante) eksperimentu var uzskatīt par vienu no pirmajiem *JND* mēra lietojumiem praksē. *JND* var izmantot jebkāda veida traucējumu noteikšanai, salīdzinot oriģinālu un bojātu signālu. Jo lielāka *JND* vērtība, jo lielākas kvalitātes atšķirības [146]. *JND* ir subjektīvās kvalitātes mērs, kaut gan praksē ir pieejamas arī *JND* realizācija objektīvas kvalitātes novērtēšanas modeļos [147], kā arī komerciālos video kvalitātes mēraparatūras produktos [148].

Lai arī pētījumos ir izklāstītas dažādas *MOS* metrikas alternatīvas 2.6. tabulā, tomēr *MOS* nu jau vairāk kā desmit gadus var dēvēt par (*de-facto*) mēru video kvalitātes novērtēšanā. Turpmāk darbā par *MOS* ieguves un aprēķinu metodēm.

2.8. attēlā ir klasificētas populārākās novērtēšanas metodes pēc pielietojuma (kodēšana vai pārraide), pēc oriģinālā (*reference video*) video signāla nepieciešamības (*FR*, *RR* vai *NR/ZR*), pēc viena vai divu ekrānu un aptuvena precizitātes un ātrdarbības novērtējuma.



2.8. att. Novērtēšanas metožu pielietojums (kodēšana vai pārraide)

Vispirms dažādas testēšanas metodes tika radītas un testētas nekustīgu attēlu *JPEG* (*Joint Photographic Experts Group*) kvalitātes novērtēšanai [149], [150], [151], taču pēdējā desmitgadē lielāka uzmanība ir pievērsta kustīgu attēlu vai video kvalitātes novērtēšanai un tai piemērotu metožu izstrādei un testēšanai. Turpmāk tekstā par video kvalitātes novērtēšanas metodēm atbilstoši 2.8. attēlam.

Pētījumā [152] ir testētas *ACR*, *DSIS*, *DSCQS*, un *SAMVIQ* metodes. Salīdzinot metožu iegūtos rezultātus, ir konstatēta augsta korelācija ($r = 0.96 - 0.99$), kas kalpo kā rādītājs, ka starp metodēm nav novērotas būtiskas atšķirības. [153] salīdzinātas divas metodes *ACR* un *SAMVIQ*, un pētījuma ietvaros konstatēts, ka abas metodes nodrošina līdzvērtīgu precizitāti, ja *SAMVIQ* gadījumā izmanto par 1/3 mazāku skaitu respondentu. Pie vienāda respondentu skaita *SAMVIQ* metodei būs augstāka precizitāte. Pētījumā [154] ir veikts pārskats par *ACR*, *DSCQS* un *SSCQE*. Savukārt [155] ir salīdzinātas divas metodes *ACR - HR* un *DSCQS*. Konstatēts, ka abas metodes nodrošina līdzvērtīgus rezultātus, bet ar *ACR - HR* to pašu testu var paveikt gandrīz četras reizes īsākā laikā. Pāru salīdzināšanas metodes nodrošina augstāku precizitāti [156], tāpēc tās ir piemērotas video kodēšanas parametru noskaņošanai vai kvalitātes novērtēšanai. Pētījumā [157] ir salīdzinātas *SSCQE*, *DSCQS* un *DSCS* metodes, kur visu trīs metožu iegūtie testa rezultāti uzrāda augstu korelāciju. Šajā pašā pētījumā ir konstatēts, ka cilvēka īstermiņa atmiņas ilgums ir aptuveni 15 sekundes. Turpretī [158] eksperimentā ir konstatēts, ka īstermiņa atmiņas ilgums svārstās no 15 sekundēm – 30 sekundēm, citā pētījumā [159] atmiņas ilgums novērtēts ar 18 sekundēm – 20 sekundēm, bet pēc *Millera pētījuma* [160], kura rezultāti ir pamatoti vairākos nesaistītos eksperimentos, ir konstatēts, ka cilvēka īstermiņa

atmiņas apjoms ir ierobežots ar 7 ± 2 elementiem. No iepriekš minētā var secināt, ka attēla kvalitātes testēšanā izmantotā video fragmenta ilgumam nav vajadzības būt garākam par 30 sekundēm, kā arī attēla redzamu bojājumu skaitam nav vajadzības būt lielākam par 9. Pētījumā [161] ir konstatēts, ka tieši īsu video fragmentu kvalitātes novērtēšanā respondenti ir mazāk toleranti pret redzamiem traucējumiem. Tas nozīmē, ka īsus video fragmentus (15 – 30 sekundes) nedrīkst pārsātināt ar lielu skaitu traucējumiem (7 ± 2).

2.7. tabula

Novērtēšanas metodes		Skalas	
		Diskrēta	Nepārtraukta
<i>ACR</i>	Absolūtā novērtēšanas skala (<i>Absolute Category Rating</i>)	5, 9, 11	
<i>ACR – HR</i>	Absolūtā novērtēšanas skala ar slēptu oriģināla signālu (<i>ACR Hidden Reference</i>)	5, 9, 11	
<i>DCR (DSIS)</i>	Kategoriju degradācijas novērtējuma metode (<i>Degradation Category Rating (Double Stimulus Impairment Scale)</i>)	5*, 9*	
<i>DSCQS (T1 un T2)</i>	Dubultstimula nepārtraukta kvalitātes novērtēšanas skala (<i>Double-Stimulus Continuous Quality Scale (T1 DS un T2 SDS)</i>)		5 vai 5*, 9*
<i>PC</i>	Pāru salīdzināšana (<i>Pair Compare</i>)	7	
<i>SCJAC</i>	Stimulu salīdzinājumu novērtēšana (<i>Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgement</i>)	7	
<i>SAMVIQ</i>	Multivides subjektīvā kvalitātes novērtēšana (<i>Subjective Assessment of Multimedia Video Quality</i>)		100**
<i>SSMR</i>	Vienstimula kvalitātes novērtēšana ar vairākkārtēju atkārtošanos (<i>Single Stimulus with Multiple Repetitions</i>)	5	

<i>SSCQE</i>	Vienstimula neaptrauktas kvalitātes novērtēšana (<i>Single Stimulus Continuous Quality Evaluation</i>)		100**
<i>SDSCE</i>	Vienlaicīga dubltstimula metode ar neaptrauktu vērtēšanu (<i>Simultaneous Double Stimulus for Continuous Evaluation</i>)		100**

* izmanto ienesto bojājumu (impairment) novērtēšanas skalu

** izmanto fizisku ierīci ar slīdni (slaidēris)

2.7. tabulā atspoguļotajām metodēm ir norādītas ieteicamās skalas, bet tas nav jāuzskata par ierobežojumu vai šķērslī, var izmantot arī citas skalas, piemēram, 5 baļļu diskretās skalas vietā var izmantot arī 9 un 11 baļļu diskretu skalu. Teorētiski 5 baļļu *MOS* rezultātiem ir jābūt ar lielāku standarta novirzi [162], salīdzinot ar 9, 11 vai 100 baļļu *MOS* rezultātiem, kaut gan pētījumā [163] konstatēts, kas šīs atšķirības ir statistiski maznozīmīgas.

2.8. tabulā ir apkopotas populārākās kvalitātes novērtēšanas metodes un uzskaitīti svarīgākie metodes izvēles nosacījumi, kā arī izklāstītas autora rekomendācijas par labu vienas vai otras novērtēšanas metodes izvēlei.

2.8. tabula

Novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas

Metode	Kvalitātes novērtēšanas paņēmieni		Testēšanas ilgums (laiks)	Respondenti	
	Kodēšanas	Pārraides		Tipsīkie lietotāji (Ne-eksperti)	Eksperti
<i>ACR</i>	***	*****	***	*****	*****
<i>ACR – HR</i>	**	*****	*****	*****	*****
<i>DCR</i>	****	****	***	***	*****
<i>DSCQS</i>	****	****	***	***	*****
<i>PC</i>	****	**	***	****	*****
<i>SCJAC</i>	*****	*	****	*****	*****
<i>SAMVIQ</i>	*****	*	*	**	*****
	***** ļoti labi piemērota		***** ļoti īss	***** ļoti labi piemērota	

	**** labi piemērota	**** īss	**** labi piemērota
	*** vidēji piemērota	*** normāls	*** vidēji piemērota
	** slikti piemērota	** garš	** slikti piemērota
	* ļoti slikti piemērota	* ļoti garš	* ļoti slikti piemērota

Kā pirmo metodes izvēles kritēriju var izdalīt kvalitātes novērtēšanas paņēmiena izvēli (kodēšanas vai pārraides ietekmes kvalitātes novērtējums). Par otro metodes izvēles kritēriju var kalpot katrs konkrētās metodes testēšanas ilgums, jo kopējais testā patērētais respondenta laiks ir būtisks. Neviena no metodēm neierobežo testēšanā izmantoto video fragmentu skaitu, tāpēc kopējā testa ilgums var būt no dažām minūtēm līdz pat vairākām stundām. Respondentiem nav iebildumu pret 5 – 15 minūšu gariem testiem, 20 – 25 minūšu tests jau ir uzskatāms par nogurdinošu, bet 40 – 60 minūšu tests lielākajam vairumam respondentu nav pieņemams un uzskatāms par ļoti apgrūtināšu un kaitinošu. Kā trešo izvēles kritēriju var uzsvērt katras konkrētās metodes piemērotību konkrētajai respondentu auditorijai – ekspertiem vai tipiskiem lietotājiem (ne – ekspertiem). Metodes, kuras ir uzskatāmas par precīzām un sarežģītām, piemēram, *SAMVIQ*, nav ieteicams izmantot tipiskiem lietotājiem (ne – ekspertiem). Ja testēšanā iesaistītie respondenti neizprot, pārprot vai testa laikā aizmirst metodes principus, tad iegūtie rezultāti var būt neprecīzi un apšaubāmi. Metodes, kuras ir ļoti labi piemērotas kodēšanas ietekmes kvalitātes novērtēšanai, ne visos gadījumos būs tikpat labi piemērotas pārraides ietekmes kvalitātes novērtēšanai. Pārraides rezultātā pie liela pakešu zuduma ($\leq 1\%$) video kvalitātes novērtēšanai nav ieteicams izmantot metodes, kuras ir piemērotas kodēšanas ietekmes kvalitātes novērtēšanai. Savukārt kodēšanas rezultātā, kad video attēlam ir veikta nebūtiska attēla kvalitātes pazemināšana, nav ieteicams izmantot metodes, kuras ir piemērotas pārraides kvalitātes ietekmes novērtēšanai. Pirmajā gadījumā kvalitātes vērtējums varētu būt sliktāks nekā ir patiesībā, bet otrajā gadījumā pilnīgi pretēji – vērtējums būs labāks nekā ir patiesībā.

Turpmāk tekstā ir izklāstīta autora rekomendācija un piedāvāts risinājums video kvalitātes novērtēšanas metožu uzlabošanai. Rekomendācija attiecas tikai uz tām metodēm, kurās tiek izmantotas vispārējās kvalitātes 5, 9, 11 baļļu diskrētas novērtēšanas skalas – *ACR* un *ACR – HR*. Turpinājumā, aprakstot metodes darbības principus, tiks apskatīta tikai 5 baļļu diskrētās skalas pielietojuma piemērs.

Pēc katra video fragmenta atskaņošanas respondenti novērtē ne tikai video vispārējo kvalitāti pēc 5 baļļu skalas, bet arī novērtē šī paša video fragmenta akceptēšanas kvalitāti pēc 5 baļļu skalas, uz kuras nav atzīmētas vērtības 2.9. tabulā, bet vārdiski atzīmēti trīs

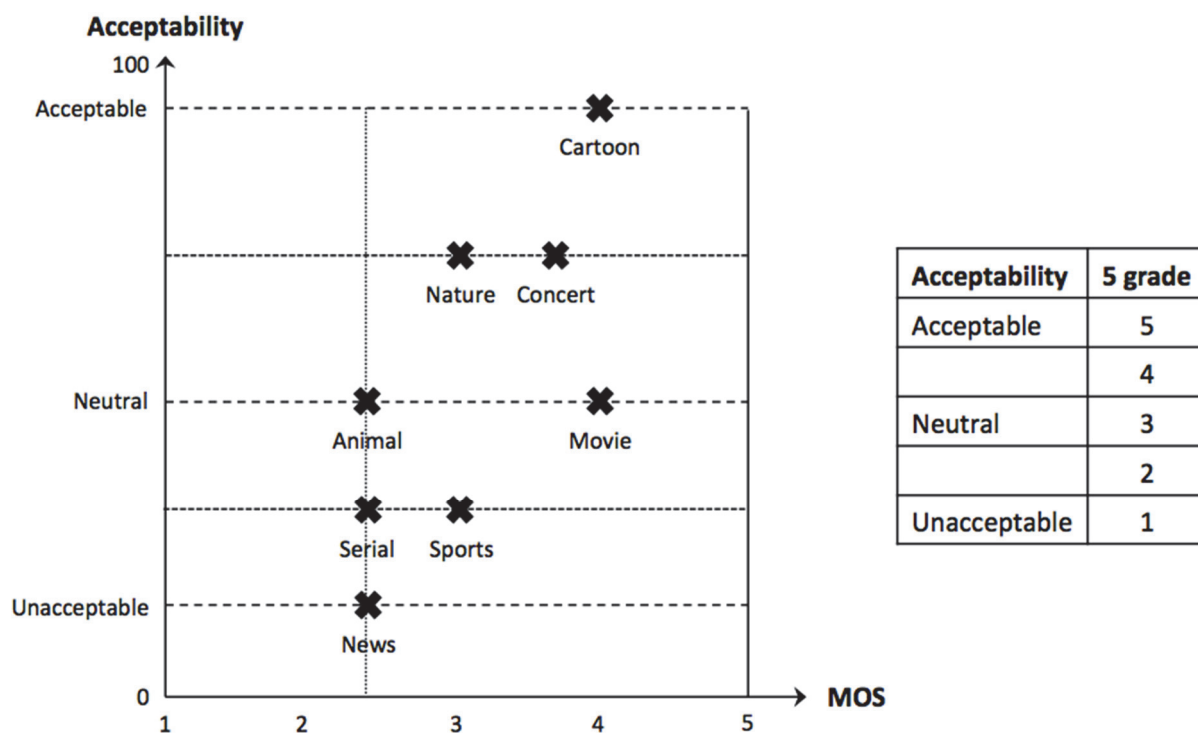
novērtējumi – pieņemama (*acceptable*), neitrāla (*neutral*) vai nepieņemama (*unacceptable*) kvalitāte. Apzīmējumam “*pieņemama kvalitāte*” atbilst 5, apzīmējumam “*neitrāla kvalitāte*” atbilst 3, apzīmējumam “*nepieņemama kvalitāte*” atbilst 1. Savukārt nosacīto vērtējumu 4, kas atrodas starp “*pieņemama*” un “*neitrāla*” kvalitāte, izvēlas tie respondenti, kuri nevar izlemt starp šiem diviem vārdiskajiem apzīmējumiem. Līdzīga situācija attiecas uz nosacīto vērtējumu 2, kas atrodas starp “*neitrāla*” un “*nepieņemama*” kvalitāte, un ko izvēlas tie respondenti, kuri nevar izlemt starp šiem diviem vārdiskajiem apzīmējumiem. Ļoti būtiski, ka šis divkārtšais novērtējums visai nebūtiski pagarina kopējo testēšanas laiku. Tas nozīmē, ka viendimensionāla MOS novērtējuma vietā var iegūt divdimensionālu vispārējās kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.

2.9. tabula

Kvalitātes un akceptēšanas novērtējuma skalas

Vērtība	Kvalitātes novērtējuma skala (quality scale)	Vērtība	Akceptēšanas novērtējumu skala (acceptability)
1	Ļoti slikta, vāja (<i>Bad</i>)	X	Pieņemama (<i>Acceptable</i>)
2	Slikta, vāja (<i>Poor</i>)	X	
3	Mērena, vidēja (<i>Fair</i>)	X	Neitrāla (<i>Neutral</i>)
4	Laba (<i>Good</i>)	X	
5	Lieliska (<i>Excellent</i>)	X	Nepieņemama (<i>Unacceptable</i>)

Provizorisks rezultātu grafiks, kurā ir attēlots divdimensionāla MOS kvalitātes un akceptēšanas novērtējums, skatīt 2.9. attēlā. Pēc nepieciešamības 5 baļļu marķēto kvalitātes skalu, kā arī 5 baļļu nemarķēto akceptēšanas skalu var lineāri transformēt uz vērtējuma skalu 0–100 [164], kur 1 atbilst 10 un 5 atbilst 90.



2.9. att. Provizorisks rezultātu grafiks – divdimensionāls MOS

Šajā pētījumā [165] ir mēģināts analizēt dažādus daudzdimensionālus video kvalitātes novērtēšanas paņēmienus, kur atsevišķi no tiem ir sarežģīti un laikietilpīgi. Sarežģīta metode nav piemērota nespeciālistiem.

Metodē ir apvienota marķēta un nemarkēta kvalitātes novērtējuma skala, jo atsevišķos pētījumos ir konstatēts [166], ka marķētas skalas gadījumā respondentiem ir tendence izvairīties no novērtēšanas skalā atzīmētiem galējiem (minimālais un maksimālais) vērtējumiem.

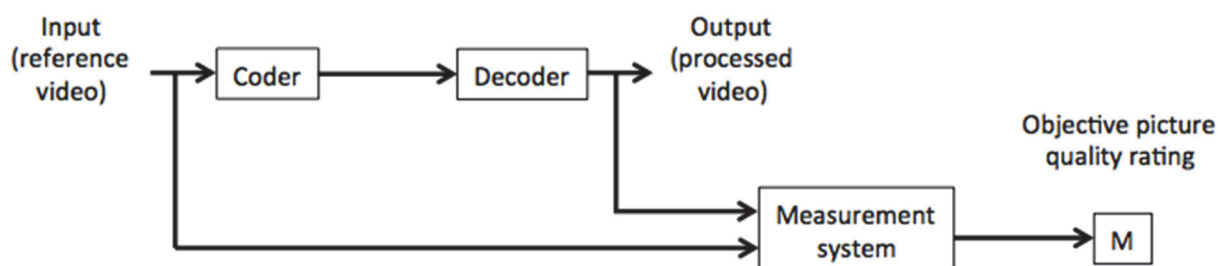
Eksperimentālā pētījumā [163] ir parādīta ļoti spēcīga lineāra sakarība starp 5, 9 baļļu diskretām un 5, 11 baļļu nepārtrauktām novērtēšanas skalām. Tika konstatētas nebūtiskas statistiskas atšķirības starp video kvalitātes vērtējumiem, kuri iegūti, izmantojot minētās novērtēšanas skalas.

Nodaļas ietvaros tika analizētas dažādas kvalitātes novērtēšanas metodes, bet, kā vienu no svarīgākajiem rezultātiem, var minēt autora izstrādāto rekomendāciju ar atbilstošu risinājumu video kvalitātes novērtēšanas metožu uzlabošanai. Ar izstrādātās metodes palīdzību var iegūt divdimensionāla MOS kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.

2.2. Objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodes

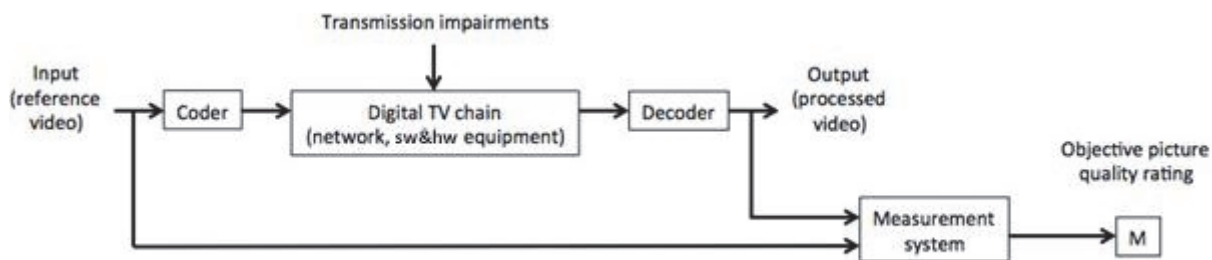
Mūsdienās vizuālās informācijas satura apjoms pieaug ļoti strauji, kur katra indivīda personīgi radīto attēlu un video vienību skaits gadā ir mērāms tūkstošos, tāpēc pat katra cilvēka personīgās informācijas kolekcijas attēla kvalitāti novērtēt, caurskatot attēlus vai video, vairs nav fiziski iespējams. Minēto iemeslu dēļ ir radusies nepieciešamība pēc automātiskas attēlu un video informācijas kvalitātes novērtēšanas vai diferencēšanas sistēmas izveides. Video kompresijas pakāpes novērtēšanai parasti izmanto objektīvos video kvalitātes mērīšanas algoritmus, šos algoritmus mēdz dēvēt arī par metrikām.

Video kvalitātes testēšanas algoritmus ir iespējams iedalīt trīs lielās grupās: *FR* (*Full Reference*), *RR* (*Reduced Reference*) un *NR* vai *ZR* (*No Reference* vai *Zero Reference*). *FR* metodē vai paņēmienā tiek detalizēti, pikseli pēc pikseļa (*pixel-by-pixel*) salīdzināti oriģinālā un uztvertā/izkropļotā video attēli, veicot laikietilpīgas un apjomīgas skaitļošanas operācijas. *FR* [167] [168] parasti izmanto testgultnes apstākļos, novērtējot video kompresijas algoritmu veikspēju 2.10. attēlā, papildu tam tas var kalpot kā labs palīgs, noskaņojot kompresijas algoritma parametrus, bet tikpat lielā mērā tas ir izmantojams video pārraides procesa ietekmes kvalitātes mērījumiem 2.11. attēlā. *FR* modelim ir pilnīga piekļuve oriģinālā video signāla kanālam, bet *RR* modelim ir atvēlēts ierobežotas caurlaides spējas piekļuves kanāls oriģinālajam video signālam, *NR* modeļa gadījumā nav pieejams oriģinālā video signāla kanāls. *FR* un *RR* metodes pieder pie abpusēja (*double ended*) sistēmas modeļa, kur mērījumu veikšanai ir pieejami gan oriģinālā, gan izkropļotā/uztvertā video signāla kanāli, bet *NR* metode pieder pie vienusēja (*single ended*) sistēmas modeļa, kura gadījumā ir pieejams tikai izkropļotais/uztvertais video signāla kanāls.



2.10. att. *FR* metode video kompresijas algoritmu kvalitātes mērījumiem

2.11. att. *FR* metode video pārraides kanāla kvalitātes mērījumiem



RR (Reduced Reference) metode salīdzina oriģinālā un uztvertā/izkropļotā signāla atsevišķus parametrus, veicot salīdzinoši vienkāršākas, mazāk skaitļošanas jaudas prasīgas operācijas. *RR* metodes pielietojums var būt visai līdzīgs *FR*, ar vienu būtisku izņēmumu, ka *RR* gadījumā ir pieejams ierobežotas caurlaides spējas kanāls, parasti *VGA*, *CIF*, *QCIF* izšķirtspējas oriģināla signāls ir līdz 4 *Mbp/s*. No šī oriģinālā signālā tiek izdalīts kāds zināms parametrs, kas kalpos kā kvalitātes novērtēšanas rādītājs, piemēram, attēla malu degradācijas algoritms *EPSNR (Edge PSNR)* [169]. Šo algoritmu var izmantot reālā laika mērījumiem, taču tā izpildei ir nepieciešama salīdzinoši neliela skaitļošanas jauda. Minētais algoritms ir piemērots reālā laika video kvalitātes uzraudzībai, ja ir pieejams ierobežotas caurlaides spējas kanāls oriģinālā signāla pievadā. Ja savstarpēji tiek salīdzināti dažādi video signāli, tad ieteicams izmantot kādu kvantitatīvu metodi, piemēram, [170], lai noteiktu atbilstošā modeļa precizitāti.

NR (No Reference) metodes gadījumā, kad oriģinālā signāla kanāls nav pieejams, tad mērījumi, aprēķini un lēmums par video kvalitātes vērtējumu notiek, balstoties tikai uz uztverto/izkropļoto signālu. Kā vienu *NR* metodes piemēru var minēt *IP* pakešu līmeņa analīzes algoritmu *MDI (Media Delivery Index)* [131]. *MDI* dokumentam ir informatīvs raksturs, kā arī tam nav piešķirts standarta statuss, iespējams, tas arī ir viens no iemesliem nelielam pētījumu skaitam par šo tēmu [171], kaut arī vesela virkne mēraparatūras ražotāju izmanto šo metriku savos produktos, piemēram, *IneoQuest*, *Agilent Technologies*, u.tml. *NR* metodi, līdzīgi kā *RR*, var izmantot reālā laika mērījumiem, parasti tā izpildei ir nepieciešama salīdzinoši neliela skaitļošanas jauda. *MDI* ir definētas *IPTV* divu parametru *DF (Delay Factor)* un *MLR (Media Loss Rate)* mērījumu vadlīnijas *CBR (Constant Bit Ratio)* datu plūsmas plūsmas gadījumā.

Ir pieejami pētījumi, kuru ietvaros ir izstrādāti un analizēti *FR* attēlu kvalitātes novērtēšanas algoritmi, bet ievērojami mazāk pētījumu ir pieejami par *RR* un *NR* algoritmiem. Pašos pirmsākumos video kvalitātes mērījumos visbiežāk izmantoja dažādus statistisku attēlu analīzes algoritmus, piemēram, *VIF*, *PSNR*, u.tml. Savukārt pēdējo desmit gadu laikā ļoti daudzi pētījumi ir veltīti objektīvo video kvalitātes algoritmu izstrādei, kuri nodrošina augstu

korelāciju ar cilvēka video kvalitātes novērtējumu (*MOS*). Turpmāk tekstā tiks raksturoti un salīdzināti populārākie algoritmi.

VIF (*Visual Information Fidelity*) ir pazīstams kā *FR* statistiku attēlu analīzes algoritms [172] [173]. *VIF* algoritma gadījumā mēra Šenona informācijas atšķirību starp oriģinālo un bojāto attēlu. Attēla kvalitātes novērtēšanai tiek izmantota dabas ainu statistika *NSS* (*Natural Scene Statistics*). *NSS* ir dabas ainas [174], kurās nav mākslīgu objektu. Tiek uzskatīts, ka ar to palīdzību var novērtēt oriģinālā un bojātā attēla vizuālo kvalitāti, kura cieši korelē ar *HVS* [175].

Ar *PSNR* (*Peak Signal to Noise Ratio*) palīdzību var aprēķināt *SNR* (*Signal to Noise Ratio*) signāla un trokšņa attiecību starp diviem attēliem un izteikt to decibelos. Šī attiecība bieži tiek izmantota kā kvalitātes mērījums starp oriģinālo un kompresēto attēlu.

Lai iegūtu *PSNR*, vispirms aprēķina *MSE* pēc (2.3). formulas:

$$MSE = \frac{\sum_{M,N} [I_1(m,n) - I_2(m,n)]^2}{M \times N}, \quad (2.3)$$

kur *M* un *N* ir attēla bitu rindas un kolonnas.

MSE (*Mean Square Error*) un *PSNR* ir divas kļūdu aprēķinu formulas, lai salīdzinātu attēla kompresijas pakāpi. Ar *MSE* aprēķina vidējo kvadrātisko kļūdu starp oriģinālo un kompresēto attēlu, bet ar *PSNR* palīdzību aprēķina maksimālās kļūdas lielumu. Jo mazāka *MSE* vērtība, jo mazāka kļūda.

Tad aprēķina *PSNR* pēc (2.4). formulas:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{MSE} \right), \quad (2.4)$$

kur *R* ir maksimālā bitu vērtība, piemēram, 8 bitu attēlam *R*=255.

Lai novērtētu oriģināla un pārkodēta video sižeta attēla krāsu izmaiņas, ieteicams izmantot salīdzinoši vienkāršu paņēmieni (*Delta*), atbilstoši (2.5). formulai. Šo paņēmieni visbiežāk izmanto video kodēšanas un video filtru kvalitātes testēšanai.

$$Delta(X,Y) = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{m,n} (X_{i,j} - Y_{i,j})}{mn}, \quad (2.5)$$

kur $X_{i,j}$ oriģināla un $Y_{i,j}$ pārkodēta attēla pikseļi, m un n ir attēla bitu rindas un kolonnas.

$PSNR$ krāsainu attēlu aprēķinam var izmantot dažādus paņēmienus, galvenokārt veicot konvertācijas no vienas krāsu telpas uz citu, piemēram, RGB konvertāciju uz $YCbCr$ krāsu telpu, jo cilvēka redze ir jūtīgāka uz spilgtumu Y (*luminance*), salīdzinoši mazāk uz krāsām $CbCr$ (*chrominance*). Augstāk minēto apsvērumu dēļ, $PSNR$ bieži aprēķina tikai spilgtuma Y (*luminance*) komponentei.

Virknē pētījumu eksperimentāli ir pārbaudīts, ka MSE un $PSNR$ mērījumi vāji korelē ar cilvēka video kvalitātes vērtējumu [176] [177] [178]. Tieši tāpēc jau daudzu gadu garumā notiek aktīvs darbs pie esošo algoritmu uzlabojumiem un papildinājumiem, piemēram, [179], retāk tiek radītas pilnīgi jaunas video kvalitātes novērtēšanas metrikas. Kopš pašas idejas pirmsākumiem [180], $SSIM$ (*Structural Similarity Index*) ieviešanas 2004. gadā, tas mūsdienās ir kļuvis par plaši izmantotu rīku video kvalitātes novērtēšanai [181] [182]. $SSIM$ ideja ir viegli saprotama. Pieņemot, ka x un y ir attēla pikseļu kopa, kura ir atlasīta no vienas un tās pašas vietas oriģinālam un bojātam attēlam, tad tie savstarpēji tiek salīdzināti. Ar $SSIM$ indeksu var izmērīt divu attēlu savstarpējo līdzību vai atšķirību pikseļu kopai pēc trīs dažādām komponentēm: $l(x,y)$ spilgtuma vērtības, $c(x,y)$ kontrasta vērtības un $s(x,y)$ struktūras. Šīs komponentes tiek aprēķinātas un apvienotas $SSIM$ indeksā pēc (2.6). formulas.

$$S(x,y) = l(x,y) * c(x,y) * s(x,y) \quad (2.6)$$

$$= \left(\frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \right) * \left(\frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \right) * \left(\frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \right),$$

kur μ_x un μ_y ir pikseļu kopas vidējās vērtības no x un y , bet σ_x un σ_y ir pikseļu kopas dispersija no x un y , bet σ_{xy} ir atbilstošās pikseļu kopas pāru korelācijas no x un y . $C1$, $C2$ un $C3$ ir skaitliski nelielas pozitīvas konstantes, kuras ir paredzētas katras rezināmās sastāvdaļas stabilizācijai, lai izlases vidējās, dispersijas vai korelācijas skaitliskās vērtības, kuras ir tuvu nullei, neradītu skaitlisko nestabilitāti. Ja $C1=C2=C3=0$, tad $SSIM$ strādā korekti. Minēto konstanšu izvēli nosaka viena no pirmajām un vienkāršākajām $SSIM$ versijām. $SSIM$ indekss ir simetrisks: $S(x,y)=S(y,x)$, ja divi attēli savstarpēji tiek salīdzināti, tad indeksa vērtība būs identiska neatkarīgi no salīdzināšanas pikseļu bloku izvēles kārtības. Ierobežojums: -

$I < S(x,y) \leq I$, kur $S(x,y)$ maksimālo vērtību sasniedz tikai tad, kad $x = y$. *SSIM* indekss tiek aprēķināts pikseļa blokam virzoties pa attēlu pikseli pēc pikseļa, izmantojot slīdošā loga principu. Rezultātā tiek aprēķināta *SSIM* indeksa vidējā vērtība visam kartētajam attēlam [181]. No *SSIM* ir iegūta vesela virkne atvasinātu algoritmu, piemēram, *MS-SSIM* (*Multiscale SSIM*), *PSSIM* (*Percentile Pooling SSIM*), *CW-SSIM* (*Complex-Wavelet SSIM index*), *G-SSIM* (*Gradient-based Structural Similarity*), un *3SSIM* (*Three-Component Weighted*). Visu šo atvasināto *SSIM* versiju galvenais mērķis ir uzlabot algoritma precizitāti, kas neizbēgami noved pie skaitļošanas apjoma pieauguma, taču *Fast MS-SSIM* gadījumā, uz precizitātes reķina, ir panākts ievērojams skaitļošanas ātrdarbības pieaugums [183].

Sakarā ar veiksmīgiem panākumiem starptautiskajos *VQEG* (*Video Quality Expert's Group*) [184], neatkarīgajos novērtēšanas testos, *ITS* (*Institute for Telecommunication Science*), *NTIA* (*National Telecommunication and Information Administration*), *VQM* (*Video Quality Metric*) [185] video kvalitātes mērīšanas un novērtēšanas metode [186] ir apstiprināta un iekļauta atbilstošajos *ANSI* un *ITU* standartos. *VQM* galvenā metode ir standartizēta identiska trīs dažādās rekomendācijās [187] [188] [189].

Atzīstamus video kvalitātes testa rezultātus ir uzrādījis *MOVIE* (*MOtion-based Video Integrity Evaluation*) [190] [191] [192] indekss, lai gan testi pārsvarā veikti, izmantojot vienu [193] video un attēlu datubāzi. Pastāv vesela virkne pētījumu, kuros savstarpēji tiek salīdzināta dažādu algoritmu veiktspēja, piemēram, *MS-SSIM* pret *MOVIE* [194]. Vairumam praksē populāru video kvalitātes novērtēšanas algoritmu, piemēram, *MSE* un *PSNR*, nav ņemtas vērā mērāmā video kustības telpas (*SA*) un laika lielumu (*TA*) vērtības, kaut arī daudzos pētījumos šie lielumi ir uzskatīti par būtiskiem, to arī apliecina autora pētījuma rezultāti [195] [196]. *SA* un *TA* parametru skaitliskās vērtības raksturo video attēla piesātinājumu, kustību dinamiku un dabiskumu, kas nepārprotami atstāj būtisku iespaidu uz cilvēka video kvalitātes novērtējumu. *MOVIE* indeksa metrikai tiek ņemts vērā kustības telpas (*SA*) un laika lielumu (*TA*) vērtības, kā rezultātā ir panākta augsta korelācija ar cilvēka video kvalitātes novērtējumu [190].

Kodēšanas kropļojumu novērtēšanai ir pieejamas vairākas metrikas, piemēram, *SSD* (*Sum of Squared Differences*), *SAD* (*Sum of Absolute Hadamard Differences*) un *SATD* (*Sum of Absolute Transformed Differences*).

Minētās metrikas tiek izmantotas attēlu un video datu apstrādē, piemēram, kompresētu video fragmentu kustības novērtēšanai, objektu atpazīšanai, 3D attēlu ģenerēšanai. Attēla bloku līdzības vai atšķirības *SSD* gadījumā var aprēķināt pēc (2.7). formulas, bet *SAD* gadījumā pēc (2.8). formulas.

$$SSD(d_x, d_y) = \sum_n [S_k(x, y) - S_{k-1}(x + d_x, y + d_y)]^2, \quad (2.7)$$

kur summa ir n – to attēlu logu vērtības, S_k ir pašreizējais attēls, S_{k-1} ir iepriekšējais attēls, d_x ir horizontāla loga nobīdes un d_y ir vertikāla loga nobīdes.

$$SAD(d_x, d_y) = \sum_n |S_k(x, y) - S_{k-1}(x + d_x, y + d_y)| \quad (2.8)$$

SAD ir viens no vienkāršākajiem paņēmieniem, ja abi salīdzināmie video attēla fragmenti ir identiski, tad rezultāts būs nulle, jo *SSD* un *SATD* algoritmiem ir jāveic vairāk matemātisku operāciju, līdz ar to arī nepieciešama lielāka skaitļošanas jauda [197].

PEVQ (*Perceptual Evaluation of Video Quality*) ir [198] [199] izstrādāta *FR* metrika un apstiprināta kā [167] sastāvdaļa. *PEVQ* ir paredzēta pārraides traucējumu mērījumiem un objektīvās video kvalitātes novērtēšanai. *MOS* novērtēšanai *PEVQ* izmanto *HVS* svarīgākos tehniskos raksturlielumus, tāds kā kustības telpas (*spatial*) un laika (*temporal*), spilgtuma (*luminance*) un krāsu (*chrominance*) izmaiņas, kā arī detektē un uzskaita video kadra pauzes (*frame freezing*), kadra nepareizu novietojumu (*frame clipping*), iztrūkstošos kadrus (*frame skipping*). Atsevišķu ražotāju tehniskajā dokumentācijā šos tehniskos raksturlielumus, kuri ir apvienoti zem vienas video kvalitātes metrikas, mēdz dēvēt par *KPI* (*Key Performance Indicators*).

Pētniecības centriem sadarbojoties ar ražotājiem, ir izveidota vesela virkne video kvalitātes testēšanas produktu, kuros ir iestrādāts kāds no esošiem algoritmiem, atsevišķos gadījumos arī radīts kāds jauns patentēts risinājums, piemēram, *Rohde & Schwarz* algoritms *qPSNR* (*Quasi PSNR*), kā arī *VQuad – HD* metrika kas ir apstiprināta kā [168] sastāvdaļa. *JND* (*Just Noticeable Difference*) ir [200] izstrādāta *FR* metode, kuru mēdz dēvēt par *PQR* (*Picture Quality Rating*), un apstiprināta kā [187] sastāvdaļa, kā arī citas mazāk populāras – *Sarnoff JNDmetrix*.

Rekomendācijās un standartos iekļautos objektīvos video kvalitātes novērtēšanas paņēmienus, skatīt 2.10. tabulā. Savukārt J.140 – 149 sērijas rekomendācijas ir veltītas ciparu televīzijas *QoS* mērījumiem, t.sk. televīzijas objektīvās 2.10. tabulā un subjektīvās 2.5. tabulā video kvalitātes novērtēšanai.

Objektīvie video kvalitātes novērtēšanas modeļi

Dokuments	Nosaukums
ITU – T Rec. [167]	Pilna references signāla objektīvā multimediju video kvalitātes mērīšana (<i>Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference</i>)
ITU – T Rec. [169]	Samazinātas joslas platuma objektīvā multimediju video kvalitātes pakalpojumu mērīšana kabeļu televīzijas tīklos (<i>Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference</i>)
ITU – R Rec. [201]	Zemas izšķīrtpējas televīzijas pilna references signāla objektīvā vizuālās kvalitātes mērīšanas tehnika platjoslas pakalpojumiem (<i>Objective perceptual visual quality measurement techniques for broadcasting applications using low definition television in the presence of a full reference signal</i>)
ITU – R Rec. [202]	Zemas izšķīrtpējas televīzijas samazinātas joslas platuma objektīvā vizuālās kvalitātes mērīšanas tehnika platjoslas pakalpojumiem (<i>Objective perceptual visual quality measurement techniques for broadcasting applications using low definition television in the presence of a reduced bandwidth reference</i>)
ITU – T Rec. [168]	Pilna references signāla objektīvā multimediju video kvalitātes mērīšana HDTV ciparu kabeļu televīzijas tīklos (<i>Objective perceptual multimedia video quality measurement of HDTV for digital cable television in the presence of a full reference</i>)
ITU – T Rec. [203]	Samazinātas joslas platuma signāla objektīvā multimediju video kvalitātes mērīšana HDTV ciparu kabeļu televīzijas tīklos (<i>Objective multimedia video quality measurement of HDTV for digital cable television in the presence of a reduced reference signal</i>)
ITU – T Rec. [33]	Video telefonijas lietojumprogrammu kvalitātes novērtēšanas modelis (<i>Opinion model for video-telephony applications</i>)
ITU – T Rec. [204]	Lietotāju prasības ciparu kabeļu televīzijas objektīvas video uztveres kvalitātes mērīšanai (<i>User requirements for objective perceptual video quality measurements in digital cable television</i>)

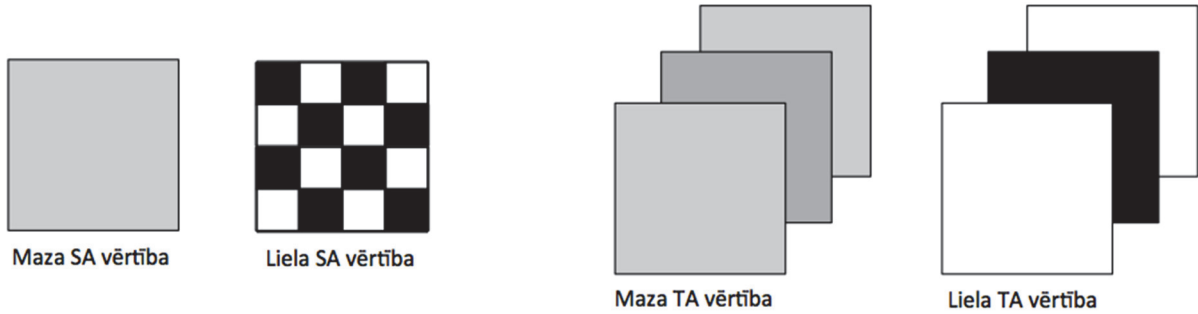
ITU – T Rec. [187]	Pilna references signāla objektīvā uztveres video kvalitātes mērīšanas tehnika ciparu kabeļu televīzijas tīklos (<i>Objective perceptual video quality measurement techniques for digital cable television in the presence of a full reference</i>)
ITU – T Rec. [205]	Objektīvā attēla kvalitātes mērīšanas metode izmantojot reālā laika pakalpojuma signālu (<i>Objective picture quality measurement method by use of in-service test signals</i>)
ITU – T Rec. [206]	Objektīvās uztveres multimediju kvalitātes modeļa prasības (<i>Requirements for an objective perceptual multimedia quality model</i>)
ITU – T Rec. [170]	Video kvalitātes metrikas precizitātes kalibrēšanas metode (<i>Method for specifying accuracy and cross-calibration of Video Quality Metrics (VQM)</i>)
ITU – T Rec. [207]	Parametriska audiovizuālās straumēšanas kvalitātes novērtēšana (<i>Parametric non-intrusive assessment of audiovisual media streaming quality</i>)
ITU – T Rec. [208]	Parametriskabitu plūsmas audiovizuālās straumēšanas kvalitātes novērtēšana (<i>Parametric non-intrusive bitstream assessment of video media streaming quality</i>)
IETF [131]	Multimediju indeksa kvalitātes novērtējums (<i>A Proposed Media Delivery Index (MDI)</i>)

12. pielikumā ir apkopotas ITU rekomendācijās atrodamās subjektīvās un objektīvas kvalitātes novērtēšanas metodes. Tā kā darba uzdevumos neietilpa objektīvo video kvalitātes algoritmu analīze, tie ir iztirzāti tikai tik lielā mērā, lai identificētu subjektīvās video kvalitātes lomu un nepieciešamību izstrādāt un verificēt jebkuru objektīvo video kvalitātes algoritmu (*metriku*).

2.3. Objektīvās video kvalitātes novērtēšanas izmantojot SA un TA

Video kvalitātes novērtēšanas testos svarīga ir izvēlēto video sižetu atlase. Būtiski ir video sižeta telpiskie SA (*Spatial Activity*) un laika TA (*Temporal Activity*) parametri [66] [209] [210], kā arī video sižetu saturs [211]. Praksē ir pieejamas vairākas metodes video sižeta SA un TA parametru aprēķinam, bet darbā tiks izmantota metode no rekomendācijas [23].

SA vērtība norāda uz attēla informatīvo piesātinājumu, jo vairāk smalku elementu attēlā, jo lielāka SA vērtība.



2.12. att. SA un TA vērtību ilustratīvs attēlojums

Atsevišķus video attēla kvalitātes bojājumus / artefaktus 2.4. tabulā ir iespējams saistīt ar video fragmenta SA un TA aprēķinātām vērtībām un to izmaiņām laikā. Piemēram, SA bojājumus (*artefaktus*) var saistīt ar attēla kontrasta, spilgtuma, krāsu izmaiņām, redzamu troksni attēlā, bloku efektu (*blocking*) un izplūdušu, neskaidru, attēla fragmentu ar samazinātu izšķirtspēju (*blurring*), u.c. Savukārt TA bojājumus / artefaktus var saistīt ar video attēla iesaldēšanu (*picture freeze*), attēla raustīšanos (*jerkiness*), mirgošanu (*flickering*), objektu kustību kompensācijas neatbilstībām; stacionāru objektu fluktuācijas (*fluctuation*), u.c.

SA aprēķinu var veikt, izmantojot *Sobela filtru*, kur katram video kadrā malu detektēšanai (Y spilgtuma komponente) laika momentā (F_n) pielieto $[Sobel(F_n)]$ filtrēšanu. Atfiltrētā rezultātā kadrā pikseli pēc pikseļa aprēķina standarta novirzi (std_{space}). Minētie aprēķini tiek veikti visiem video fragmenta kadriem. Maksimāli iegūtā vērtība arī atspoguļo video fragmenta SA , kuru aprēķina šādi:

$$SA = std_{space}[Sobel(F_n)] \quad (2.9)$$

TA ir kustību mēra laika funkcija. Jo vairāk kustību ir starp diviem secīgiem video kadriem, jo lielāka būs TA vērtība. Ja salīdzināmie video kadri ir identiski, tad $TA = 0$.

TA vērtību atrod aprēķinot starpību $M_n(i, j)$ starp diviem secīgiem video kadriem

$$M_n(i, j) = F_n(i, j) - F_{n-1}(i, j), \quad (2.10)$$

kur $F_n(i, j)$ ir n -tā kadra pikselis i -tajā rindā un j -tajā kolonnā. TA aprēķina šādi:

$$TA = std_{space}[M_n(i, j)] \quad (2.11)$$

TA un SA parametrus ir iespējams izmantot video kvalitātes monitoringam, piemēram, sastinguša kadra (*picture freeze*) gadījumā $TA = 0$, pazaudēta kadra gadījumā gan $TA = 0$, gan $SA = 0$.

Vairums gadījumos SA un TA vērtību aprēķinam izmantots *Matlab*, skatīt 13. pielikumā, atsevišķos gadījumos specializēts video kvalitātes testēšanas aprīkojums. Testēšanā izmantoto video fragmentu paraugu skatīt www.youtube.com (meklētājā ierakstīt Romass Pauliks video quality testing).

2.4.Video kvalitātes prognozēšana pēc tehniskajiem parametriem

Video kvalitātes prognozēšanas modeļi ir matemātisku formulu kopums, kurās iekļauj zināmu skaitu specifiskus, ar video kodēšanu un pārraidi saistītus parametrus. Dažādiem telekomunikāciju tīklu pakalpojumiem praksē ir pieejami daudz un dažādi kvalitātes novērtējuma prognozēšanas modeļi. Par vienu no pirmajiem objektīvās kvalitātes novērtēšanas algoritmiem vai metrikām telefonijā (*VoIP*, *POTS*, *ISDN*, *GSM*) var uzskatīt *PESQ* (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*). *PESQ* ir standartizēta [212] un populāra metode šaurjoslas telefonijas pakalpojumu kvalitātes objektīvai novērtēšanai. *PESQ* metrika ir izstrādāta un aprobēta ar daudz un dažādiem subjektīvās telefonijas kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem, kuros izmantotas atbilstošas metodes [128]. Tādas metodes, kā *ACR* (*Absolute Category Rating*), *DRC* (*Degradation Category Rating*) un vidējais kvalitātes novērtējums *MOS* (*Mean Opinion Score*) ir pārņemti no telefonijas kvalitātes novērtēšanas metodēm [128], un mūsdienās tiek izmantoti arī video kvalitātes novērtēšanā, t.sk. video telefonijā, video konferencēs, televīzijā, tiešsaistes spēlēs un *VoD* (*Video on Demand*) [22] [127]. Savukārt platjoslas telefonijas pakalpojumu (augstas izšķirtspējas *HD* balss kodētāji *3G/4G LTE*) kvalitātes objektīvai novērtēšanai ir jāizmanto *POLQA* (*Perceptual Objective Listening Quality Assessment*) [213].

Šajā pētījumā [89] ir veikts pārskats par trim objektīvās kvalitātes novērtēšanas modeļiem, bet pētījumā [214] ir ietverts desmit dažādu autoru novērtēšanas modeļu pārskats. Turpinājumā par E – modeļa vai interneta telefonijas pārraides tīkla plānošanas modeļiem [32] un video telefonijas pārraides kvalitātes modeļiem [33].

Interneta telefonijas pārraides tīkla plānošanas modelī [32] ir iekļauti vairāki pārraides tīkla un atskaņošanas parametri, piemēram, signāla un trokšņa attiecība, balss skaļuma līmenis, atbalss līmenis, balss aizture, kvantēšanas kropļojumu līmenis, u.tml. Interneta telefonijas kvalitāti novērtē izmantojot R – faktoru, kuru aprēķina:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e, \quad (2.12)$$

kur R_o ir signāla un trokšņa attiecība, t.sk. pārraides kanāla troksnis, balss skaļums un apkārtējais fona troksnis; I_s ir runas signāla degradācija, piemēram, kvantēšanas trokšņa lielums; I_d ir degradācija, kura saistīta ar runas aizturi un atbalss lielumu; I_e ir degradācija, kuru izraisa augstas balss kompresiju (izmantotie kodētāji), pakešu zuduma, pakešu sastrēgumu un uzplaiksnījuma (*burst*) lielums.

Lai arī (2.12). formula izskatās pēc dažu parametru kombinācijas, tomēr tās vērtības R_o , I_s , I_d un I_e aprēķina pēc sarežģītām formulām, kurās ir iekļauti 18 dažādi ar pārraidi un atskaņošanu saistīti parametri un to robežvērtības, skatīt 17. pielikumā.

R – faktoram tiek izmantota 100 baļļu skala, skatīt 2.11. tabulā, kur 0 raksturo sliktāko iespējamo kvalitāti, bet 100 raksturo labāko iespējamo kvalitāti. Ja visi 18 parametri ir atbilstoši 17. pielikumā rekomendēto robežvērtību intervālā, tad R – faktora vērtējums ir 93.2.

2.11. tabula

Interneta telefonijas R – faktora vērtības

R – faktora vērtība	Pieņemtais kvalitātes novērtējums
Virs 90	Vislabākā (<i>Best</i>)
90 – 80	Augsta (<i>High</i>)
80 – 70	Vidēja (<i>Average</i>)
70 – 60	Zema (<i>Low</i>)
Zem 60	Nepieņemama (<i>Unacceptable</i>)

2.11. tabulas vērtības ir indikatīvi lielumi, kurus telekomunikāciju operators var izmantot par pamatu, plānojot un novērtējot savus tīkla resursus, lai varētu nodrošināt atbilstošu pakalpojuma kvalitāti. Šīs R – faktora vērtības eksperimentālu pētījumu rezultātā nav saistītas ar MOS , toties ir pieejamas R – faktora un MOS vērtību provizorisks konvertācijas tabula. E – modelī ir ņemts vērā statistiskais kvalitātes novērtējums, kur lēmumu par procentuālu atkarību

no labs un labāks *GoB* (*Good or Better*) un slikts un sliktāks *PoW* (*Poor or Worse*) rezultātiem ir iegūta R – faktora vērtība kā *Gausa* kļūdas funkcija:

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.13)$$

GoB aprēķina šādi:

$$GoB = 100E\left(\frac{R - 60}{16}\right)\% \quad (2.14)$$

PoW aprēķina šādi:

$$PoW = 100E\left(\frac{45 - R}{16}\right)\% \quad (2.15)$$

R – faktora iegūtās vērtības var konvertēt uz provizoriskām 5 baļļu *MOS* vērtībām izmantojot šādu aprēķinu:

$$\begin{cases} R < 0: & MOS = 1 \\ 0 < R < 100: & MOS = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)7 * 10^{-6}, \\ R > 100: & MOS = 4.5 \end{cases} \quad (2.16)$$

kur $6.5 \leq R \leq 100$.

Lai konvertētu zināmas *MOS* vērtības uz R – faktora vērtībām ir jāizmanto šādi aprēķini:

$$R = \frac{20}{3} \left(8 - \sqrt{226} \cos \left(h + \frac{\pi}{3} \right) \right), \quad (2.17)$$

kur $6.5 \leq R \leq 100$, bet parametru h aprēķina šādi:

$$h = \frac{1}{3} \arctan2(18566 - 6750MOS, 15\sqrt{-903522 + 1113960MOS - 202500MOS^2}) \quad (2.18)$$

Parametru $\arctan2(x,y)$ aprēķina šādi:

$$\arctan2(x,y) = \begin{cases} \arctan(\frac{y}{x}) & ,ja\ x \geq 0 \\ \pi - \arctan(\frac{y}{-x}) & ,ja\ x < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

kur $\arctan2(x,y)$ ir iebūvēta *ANSI C* funkcija.

Provizorisku R – faktora, MOS , GoB un PoW vērtību konvertācijas skatīt 2.12. tabulā. Minētās konvertācijas tabula ir paredzēta pārraides tīkla plānošanai, tā nav paredzēta MOS prognozēšanai.

2.12. tabula

Provizoriska R , MOS , GoB un PoW konvertācijas tabula

R – faktors (zemākā vērtība)	MOS (zemākā vērtība)	GoB (zemākā robeža)	PoW (augstākā robeža)	Lietotāja apmierinātības novērtējums
90	4.34	97	-0	Ļoti apmierināti (<i>Very satisfied</i>)
80	4.03	89	-0	Apmierināti (<i>Satisfied</i>)
70	3.60	73	6	Daži lietotāji ir neapmierināti (<i>Some users dissatisfied</i>)
60	3.10	50	17	Daudzi lietotāji ir neapmierināti (<i>Many users dissatisfied</i>)
50	2.58	27	38	Gandrīz vai visi lietotāji ir neapmierināti (<i>Nearly all users dissatisfied</i>)

2.12. tabulā R – faktora vērtības varētu kalpot kā telekomunikāciju operatoru interneta telefonijas pakalpojuma kvalitātes novērtēšanai. Līdz šim šāds kvalitātes novērtējums nav ieviests praksē, jo veikt visu 18 parametru mērījumus, lai aprēķinātu R – faktoru, ir ļoti sarežģīti un laikietilpīgi, varētu pat teikt, ka praksē to paveikt ir gandrīz neiespējami. E – modelis ir jāvienkāršo, būtiski jāsamazina parametru un to mērījumu skaits.

Video telefonijas pārraides kvalitātes modelis [33] sastāv no trīs sastāvdaļām, atbilstoši 18. pielikumam. Pirmkārt, balss pārraides S_q kvalitātes novērtējums, izmantojot R – faktoru atbilstoši [32]. Otrkārt, video pārraides kvalitātes novērtējums, kuru aprēķina pēc formulas:

$$V_q = 1 + I_{coding} \exp\left(-\frac{Pp_{IV}}{Dp_{pIV}}\right), \quad (2.20)$$

kur I_{coding} ir video kodēšanas bojājumi, kuri atkarīgi no video bitu pārraides ātruma Brv (Kb/s) un video kadru nomaiņas ātruma Frv (fps); pakešu zuduma faktors Dp_{pIV} , kas raksturo video kvalitātes noturības pakāpi pret degradāciju pakešu zuduma gadījumos; Pp_{IV} ir pakešu zuduma koeficients.

Savukārt uz trešo sadaļu attiecas multimediju kvalitātes MM_q novērtējums, kuru aprēķina, kā balss S_q un video V_q pārraides kvalitātes novērtējumu un pārraides kanāla aiztures summu pēc formulas:

$$MM_q = m_1 MM_{SV} + m_2 MM_T + m_3 MM_{SV} MM_T + m_4, \quad (2.21)$$

kur MM_{SV} ir audiovizuālā kvalitāte; MM_T ir aiztures audiovizuālās informācijas pārraide; koeficienti m_1, m_2, m_3 un m_4 ir atkarīgi no displeja izmēra, sarunas veida. MM_q vērtību izsaka 5 baļļu skalā.

MM_T ir audiovizuālās kvalitātes novērtēšanas rādītājs, kas ir atkarīgs no audiovizuālās informācijas aiztures un sinhronizācijas:

$$MM_{SV} = m_5 S_q + m_6 V_q + m_7 S_q V_q + m_8 \quad (2.22)$$

$$MM_T = \max\{AD + MS, 1\} \quad (2.23)$$

$$AD = m_9 (T_S - T_V) + m_{10} \quad (2.24)$$

$$MS = \min\{m_{11} (T_S - T_V) + m_{12}, 0\}, \text{ ja } T_S \geq T_V \quad (2.25)$$

$$MS = \min\{m_{13} (T_V - T_S) + m_{14}, 0\}, \text{ ja } T_S < T_V,$$

kur AD ir audiovizuālās informācijas aizture; MS ir audiovizuālās informācijas sinhronizācija; koeficienti $m_9, m_{10}, \dots, m_{14}$ ir atkarīgi no displeja izmēra, sarunas veida.

Kodēšanas bojājumu parametru I_{coding} aprēķina:

$$I_{coding} = I_{ofr} \exp \left\{ -\frac{(\ln(F_{rV}) - \ln(O_{fr}))^2}{2D_{FrV}^2} \right\} \quad (2.26)$$

O_{fr} parametrs ir optimāls kadru maiņas ātrums, kas palielina video un video bitu pārraides ātrumu B_{rV} (Kb/s), kuru aprēķina:

$$O_{fr} = v_1 + v_2 B_{rV}, 1 < O_{fr} \leq 30, v_1 \text{ un } v_2: const, \quad (2.27)$$

kur $F_{rV} = O_{fr}$; $I_{coding} = I_{ofr}$; I_{ofr} parametrs raksturo maksimālo video kvalitāti atbilstoši video bitu pārraides ātrumam B_{rV} , kuru aprēķina:

$$I_{ofr} = v_3 - \frac{v_3}{1 + \left(\frac{B_{rV}}{v_4}\right)^{v_5}}, 0 \leq I_{ofr} \leq 4, v_3, v_4 \text{ un } v_5: const \quad (2.28)$$

D_{FrV} raksturo video kvalitātes noturības pakāpi attiecībā pret video kadru maiņu F_{rV} (fps), kuru aprēķina:

$$D_{FrV} = v_6 + v_7 B_{rV}, 0 < D_{FrV}, v_6 \text{ un } v_7: const, \quad (2.29)$$

kur koeficienti $v_1, m_2, \dots, v_7$ ir atkarīgi no kodēšanas algoritma, video formāta, I kadru intervāla un video displeja izmēra.

Pakešu zuduma faktors D_{pIV} , kas raksturo video kvalitātes noturības pakāpi pret degradāciju pakešu zuduma gadījumos, to aprēķina:

$$D_{pIV} = v_{10} + v_{11} \exp\left(-\frac{F_{rV}}{v_8}\right) + v_{12} \exp\left(-\frac{B_{rV}}{v_9}\right), 0 < D_{pIV}, \quad (2.30)$$

kur $PplV$ ir pakešu zuduma koeficients; koeficienti $v_8, m_9, \dots, v_{12}$ ir atkarīgi no kodēšanas algoritma, video formāta, I kadru intervāla un video displeja izmēra.

Svarīgākie video kvalitātes parametri:

- Video aizture (ms) ir vienvirziena “gals – gals” pārraides aizture, t.sk. aiztures gala termināli, video apstrādes aizture un trīces kompensācijas bufera aizture. Rekomendējamai vērtībai ir jābūt mazākai par 1000 milisekundēm.
- Kodēšanas un pakešu zuduma koeficientus iegūst no datubāzes, kurā tiek uzkrāti atbilstošie koeficienti, skatīt 18. pielikumā.
- Telpiskās izšķirtspējas ietekmes koeficients, kuru aprēķina atbilstoši [128]. Tomēr, ir neskaidrs, kā šī koeficienta vērtības atspoguļot multimediju kvalitātes modelī, tas ir izpētes stadijā.
- I kadru intervāls, tas ir laika intervāls starp diviem I kadriem. Jo mazāks intervāls, jo lielāks bitu pārraides ātrums un labāka noturība pret pakešu zudumu.
- Video pakešu zuduma koeficients $PplV$ (%), t.i. pakešu zudums, kas radies “gals – gals” pārraides rezultātā. Rekomendējamai vērtībai ir jābūt mazākai par 10 %.
- Video kadru nomaiņas ātrums FrV (fps). Rekomendējamai vērtībai ir jābūt robežās no 1 līdz 30 kadriem sekundē.
- Video bitu pārraides ātrums BrV (Kb/s). Kodētāja ģenerēts bitu pārraides ātrums.

Aprēķinu rezultātā ir iegūts multimediju kvalitātes vērtējums MMq , kur runas kvalitātes novērtējumā ir iekļauta arī video kvalitāte $Sq(Vq)$ un video kvalitātes novērtējumā ir iekļauta runas kvalitāte $Vq(Sq)$. Multimediju kvalitātes novērtēšanas (2.21). formula sastāv no 14 dažādiem koeficientiem, kuri katrs no tiem ir saistīts ar dažādiem video parametriem. Pētījumā [33] neskaidri un vispārināti ir definētas dažādu video parametru un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības, iespējams, jo $Sq(Vq)$ un $Vq(Sq)$ parametri vēl nav izpētīti un aprobēti. Rezultātā var secināt, ka [33] modelis nav izmantojams multimediju kvalitātes novērtēšanā, tomēr specifiski runas un video kvalitātes novērtēšanas parametru aprēķini ir izmantojami, novērtējot atsevišķus runas un video kvalitātes aspektus.

Papildus [33] aprakstītam modelim, $VQEG$ (*Video Quality Experts Group*) pētniecības grupas aktivitāšu rezultātā, ir izstrādātas vairākas video kvalitātes novērtēšanas modeļa alternatīvas, kuras ir aprakstītas *ITU* (*International Telecommunication Union*) rekomendācijās, piemēram, [187], [169], [167] un [215], kā arī *IETF* (*Internet Engineering*

Task Force) [131]. Turpmāk tekstā par dažādu pētniecības grupu aktivitātēm un to izstrādātajiem prognozēšanas modeļiem.

Kā vienu no pirmajiem var minēt *Kazuhisa Yamagishi* pētījumu [216], [217] rezultātā izstrādāto *ITU – T* [33] rekomendācijas modeli. Līdzvērtīgs modelis [126] ir adaptēts *IPTV* (*Internet Protocol Television*) *SD* un *HD* video pārraides tīkla plānošanai un *QoE* (*Quality of Experience*) video kvalitātes monitoringam.

[33] ir ņemts vērā tikai vienmērīgais varbūtību sadalījums, aprakstot pakešu zuduma statistiku, bet nav ņemts vērā pakešu plūsmas zuduma modelis vai šablons (*packet loss pattern*). Šajā pētījumā [218] ir piedāvājums papildināt [33] modeli ar formulām:

$$I_t = e^{\frac{P}{B_{pplV} D_{pplV}}} \quad (2.31)$$

$$B_{pplV} = 1 + \alpha \frac{Den_{burst}}{N_{BP}} + \beta \frac{Den_{burst} D_{burst}}{Loss}, \quad (2.32)$$

kur Den_{burst} ir pakešu uzplaiksnījuma (*burst*) blīvums; D_{burst} ir uzplaiksnījuma (*burst*) ilgums; $Loss$ ir pakešu zudums, kas var rasties uzplaiksnījuma vai pārtraukuma periodos; N_{BP} ir uzplaiksnījuma perioda kārtas numurs; α un β koeficienti ir saistīti ar multimediju saturu, t.sk. atkarīgi no dažādiem video kodētāja parametriem.

Pētījumā [219] ir piedāvāts *SD* un *HD* televīzijas kvalitātes novērtēšanas modelis, kas ir izstrādāts, vadoties pēc [32] rekomendācijas parauga. *SD* un *HD* televīzijas kvalitātes novērtēšanas modeļa V_q , I_c un I_t parametrus aprēķina atbilstoši trim formulām:

$$V_q = Q_o - I_c - I_t \quad (2.33)$$

$$I_c = a_3 - a_1 e^{-a_2 b} \quad (2.34)$$

$$I_t = (b_0 - I_c) \frac{P}{b_1 + P}, \quad (2.35)$$

kur Q_o ir maksimālā iespējamā kvalitāte; b ir bitu pārraides ātrums; p ir procentuālais pakešu zudums; a_1 - a_3 un b_0 - b_1 ir koeficienti, kuri jāaprēķina katram video kodētājam un displeja izmēram. Aprēķinos redzams, ka video sižeta satura parametri netiek ņemti vērā.

Pētījumā [220] visai vispārināti ir analizēts video sižeta ietekmes novērtējums. Savukārt pētījumā [221] ir piedāvāta (2.36). formula, kurā tiek ņemts vērā video kodētāja degradācijas parametrs, kuru nosacīti var attiecināt uz video sižeta ietekmes novērtējumu.

$$I_c = a_3 + a_6 MV_1 - a_1 e^{-a_1 b + a_4 QP_1}, \quad (2.36)$$

kur MV_1 ir kustību vektoru standarta novirze; QP_1 ir katra I kadra makrobloku kvantēšanas parametra vidējā vērtība.

Pētījumā [222] ir piedāvāta I_t parametra modifikācija, kurā ir ņemti vērā pakešu zuduma rezultātā radītie bojājumi un bojājumu izplatīšanās, izmantojot (2.37). formulu.

$$I_t = a_4 d_{mb} + d_{prop}^{a_5} + a_6, \quad (2.37)$$

kur pakešu zuduma rezultātā redzami bojājumi vai artefakti ir aprakstīti ar diviem parametriem: d_{md} iespējamās kļūdas prognozēšana (MSE novērtējums makrobloku līmenī) un d_{prop} kļūdu izplatīšanās rezultātā bojāto pikseļu skaits.

Pētījumā [223] ir piedāvāts $MPQoS$ (*Mean Perceived Quality of Service*) modelis, kas ir paredzēts $MPEG - 4$ CIF un $QCIF$ multimediju pakalpojumu kvalitātes novērtēšanai, izmantojot šādu formulu:

$$V_q = I_c = [PQ_H - PQ_L](1 - e^{-\alpha(b - BR_L)}) + PQ_L - 1, \quad (2.38)$$

kur b ir bitu pārraides ātrums; PQ_H , PQ_L , BR_L un α ir četri koeficienti.

$MPQoS$ modeļa video kvalitāte ir novērtēta, vadoties pēc šī pētījuma [224] PQM (*Picture Quality Metric*) piedāvātā modeļa vadlīnijām. Minētajā modelī ir ņemts vērā tikai viens koeficients, kas ir atkarīgs no video sižeta saskaņā ar šo formulu:

$$\alpha = f_1(x), BR_L = f_2(x), PQ_H = f_3(x) \quad (2.39)$$

Pētījumā [225] ir konstatēts, ka *SD* un *HD* televīzijas modeļa aprēķini pēc (2.34). formulas un *MPQoS* modeļa aprēķini pēc (2.38). formulas ir vienādi, ja tiek izmantoti koeficienti, kuri iekļauti (2.40). formulā:

$$a_1 = (PQ_H - PQ_L)e^{\alpha BR_L}, a_2 = \alpha, a_3 = PQ_H - 1 \quad (2.40)$$

Savukārt šajā pētījumā [226] ir piedāvāts video kvalitātes novērtēšanas modelis, izmantojot (2.41). formulu:

$$V_q = I_c = A + Bb + \frac{C}{b} + Df + \frac{E}{f}, \quad (2.41)$$

kur b ir bitu pārraides ātrums; f ir video kadru nomainas ātrums (*fps*); A , B , C , D un E ir parametru koeficienti. Video sižeti ir klasificēti pēc noteiktiem kritērijiem piecās klasēs, kur katram kritērijam atbilst zināms koeficients.

Šajā pētījumā [227] par galvenajiem kvalitātes novērtēšanas parametriem ir izvēlēti pakešu zudums un buferatmiņas apjoms, taču pašā pētījumā pakešu zuduma un buferatmiņas parametru aprēķina formulas nav atrodamas, tikai vispārēja kvalitātes novērtēšana, atbilstoši (2.42). formulai:

$$V_q = 1 + I_c I_b I_t, \quad (2.42)$$

kur I_b parametrs raksturo buferatmiņas ietekmi.

Šajā pētījumā [124] ir piedāvāti trīs kvalitātes novērtēšanas parametri, atbilstoši (2.43). formulai, (2.44). formulai un (2.45). formulai.

$$V_q = I_c I_t \quad (2.43)$$

$$I_c = a_1 + a_2 f + a_3 \ln(b) \quad (2.44)$$

$$I_t = \frac{1}{1 + a_4 p + a_5 p^2}, \quad (2.45)$$

kur b ir bitu pārraides ātrums; f ir video kadru nomaiņas ātrums (*fps*); $a_1, a_2, \dots, a_5$ ir parametru koeficienti. Pētījuma rezultāti nav aprobēti ar subjektīvas kvalitātes eksperimentiem. Eksperimentos tika izmantots nepieņemami liels pakešu zudums 1–20 %.

Savukārt šajā pētījumā [228] iepriekš minētais modelis ir adaptēts *H.264 QCIF* kvalitātes novērtēšanai, atbilstoši (2.46). formulai, (2.47). formulai un (2.48). formulai:

$$V_q = a_1 + I_c I_t \quad (2.46)$$

$$I_c = a_2 e^f + a_3 \ln(b) + CT(a_4 + a_5 \ln(b)) \quad (2.47)$$

$$I_t = \frac{1}{1 + (a_6 p + a_7 p^2) a_8 B'} \quad (2.48)$$

kur CT ir video sižeta saturs; B uzplaiksnījuma (*burst*) ilgums.

Šajā pētījumā [229] ir piedāvāts izmantot kadru nomaiņas ātruma parametru, atbilstoši (2.49). formulai:

$$V_q = a_1 + \frac{a_2 - a_1}{1 + e^{a_3 f + a_4}}, \quad (2.49)$$

kur f ir video kadru nomaiņas ātrums; $a_1, a_2, \dots, a_4$ ir parametru koeficienti.

Arī šajā pētījumā [230] ir piedāvāts izmantot kadru nomaiņas ātruma parametru, atbilstoši (2.50). formulai. Pašā pētījumā video sižetu koeficientu aprēķina formulas nav aprakstītas. Savukārt šajā pētījumā [231] ir ņemta vērā video kvalitātes kodēšanas degradācija.

$$V_q = V_{qmax} \frac{1 - e^{-c \frac{f}{f_{max}}}}{1 - e^{-c}}, \quad (2.50)$$

kur V_{qmax} ir video kvalitātes vērtējums, kas iegūts pie maksimālā kadru nomaiņas ātruma; f ir bitu pārraides ātrums; c ir parametru koeficienti.

Šajā pētījumā [232] ir piedāvāts modelī iekļaut video kadru nomaiņas ātruma, bitu pārraides ātruma, displeja izmēra un video sižeta satura parametrus, atbilstoši (2.51). formulai, (2.52). formulai, (2.53). formulai, (2.54). formulai un (2.55). formulai:

$$V_q = 1 + I_c \quad (2.51)$$

$$I_c = v_3 \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{ab}{v_4} \right)^{v_5}} \right] \quad (2.52)$$

$$v_3 = 4 + 4(f_{max} - f)(k_1 s + k_2 e^{-k_3(f_{max}-f)ab}) \quad (2.53)$$

$$v_4 = c_1 s^{c_2} + c_3 \quad (2.54)$$

$$v_5 = c_4 s^{c_5} + c_6, \quad (2.55)$$

kur b ir bitu pārraides ātrums; f ir video kadru nomaiņas ātrums; s ir pikseļa vidējo vērtību izmaiņas izmantojot *SAD* (*Sum of Average Differences*); $c_1, c_2, \dots, c_6$ un k_1, k_2, k_3 ir parametru koeficienti.

Piedāvātajā modelī nav iekļauts pārraides procesa ietekmes parametrs, toties ir iekļauts video sižeta satura ietekmes parametrs, kuru pēc *FR* (*Full Reference*) metodes principa aprēķina izmantojot *SAD* (*Sum of Average Differences*) metriku.

Kopumā var secināt, ka katram no iepriekš aprakstītajiem modeļiem ir savas stiprās un vājās puses, precīzākas vai ātrākas [214], bet praktiski visu apskatīto modeļu gadījumā ir novērots, ka tiem nav definētas vai arī visai virspusēji aprakstītas video kvalitātes novērtēšanas parametru robežvērtības, un kā šīs robežvērtības ir saistītas ar katra konkrēta parametra koeficientiem. Piemēram, [33] rekomendācijā pakešu zuduma koeficients ir ļoti vispārināts un apšaubāms, tam ir jābūt mazākam par 10 %, līdzīgi arī pārējos aprakstītajos modeļos ir ļoti neskaidri vai vispārināti aprakstīti dažādi video parametri un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības. Vairums modeļu gadījumos nav veikta vai arī ir virspusēji aprakstīta piedāvāto parametru aprobācija, izmantojot video kvalitātes novērtēšanas eksperimentus. Minētajos

modeļos ir iekļauts ļoti liels video kodēšanas un pārraides parametru skaits, tomēr daudzi svarīgi parametri nav ņemti vērā, piemēram, specifiski displeja iestatījumi, kā arī dažādu video kvalitātes uzlabošanas filtru izmantošana, kodētāja specifiski iestatījumi, t.sk. *GOP I, P* un *B* kadru struktūra, u.tml. Lai kādu no video kvalitātes novērtēšanu modeļiem vai to modifikācijām varētu ieviest praksē, nomērāmo un novērtējamo parametru skaits ir būtiski jāsamazina. Autors ir pārliecināts, ka televīzijas un video pārraides kvalitātes novērtēšanai, vajadzētu pietikt ar diviem parametriem: pakešu zudums un video sižeta saturs, kur katram no tiem ir jādefinē skaidri saprotami koeficienti ar eksperimentāli aprobētām robežvērtībām.

Savukārt interneta *TV, IPTV, OTT* ir radīta pakešu līmeņa kvalitātes novērtēšanas metrika *MDI (Media Delivery Index)*. *MDI* nav ne standarts, ne rekomendācija [131], bet informatīva rakstura tehnisku ideju apkopojums, kurā ir definēti divi izmērāmi lielumi, kuri netieši var kalpot kā kvalitātes novērtēšanas rādītāji: *DF (Delay Factor)* un *MLR (Media Loss Rate)*. *DF* ir paredzēts tikai *CBR* video pakešu trīces mērījumiem un nav piemērots *VBR* video mērījumiem. *DF* (aiztures faktors) ir starpība starp minimālo un maksimālo uztverto pakešu skaitu vai nepieciešamo bufera atmiņas apjomu. *DF* vai pakešu trīce no 9 līdz 50 milisekundēm ir uzskatāma par pieņemamu.

$$DF = \frac{\max(\Delta) - \min(\Delta)}{\text{pakešu pārraides ātrums}}, \quad (2.56)$$

kur Δ ir uztvertais pakešu skaits mīnus pārraidītais pakešu skaits.

Savukārt *MLR* (pakešu pārraides zuduma līmenis) ir nosūtīto un saņemto pakešu starpība. *MLR* vērtības ir uzskatāmas par pieņemamām, ja *SDTV MLR* = 0.004, *HDTV* un *VoD* = 0.0005.

$$MLR = \frac{1}{\text{pārraidītās paketes} - \text{uztvērtās paketes}}, \quad (2.57)$$

kur noteiktā laika intervālā, parasti 1 sekundē, aprēķina zaudēto IP pakešu skaitu. Ja zaudēta viena IP pakete, tad tas atbilst 7 *MPEG* paketēm.

Vairumam objektīvās kvalitātes novērtēšanas un prognozēšanas modeļiem nav nekādas saistības ar video kvalitātes novērtējumu vai *MOS (Mean Opinion Score)* prognozēšanu, bet

atsevišķi no tiem ir izmantojami tikai kā tīkla plānošanas rīki, piemēram, interneta telefonijas tīkla kvalitātes plānošana atbilstoši [32], video telefonijas pārraides plānošana atbilstoši [33]. Pašlaik par vienīgo, interneta tīklos izmantojamo kvalitātes diagnostikas vai monitoringa paņēmieni video un televīzijas signālu pārraidei, izmantojot *IPTV* un *OTT*, var uzskatīt *IETF* radīto pakešu līmeņa kvalitātes novērtēšanas metriku *MDI* (*Media Delivery Index*). *MDI* atbilstoši [131] ir minēta svarīga piezīme, ka dokuments nav ne rekomendācija, ne standarts, tam ir tikai informatīva nozīme. *MDI* nav nekādas saistības ar *MOS* prognozēšanu. Pašlaik gan var minēt tikai vienu visiem labi pazīstamu un vispāratzītu telefonijas balss kvalitātes novērtēšanas metriku *PESQ* (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*) [212], kura ir testēta un aprobēta ar milzīgu skaitu video kvalitātes novērtēšanas testiem. *PESQ* ir ļoti cieša korelācija ar *MOS*. Iespējams *POLQA* (*Perceptual objective listening quality assessment*) [213], kuru var dēvēt par *PESQ* pēcteci gūs līdzvērtīgu atzišanas statusu. Iepriekš minētais sasniegums gan attiecas tikai uz telefonijas balss kvalitātes prognozēšanu, video signāla pārraides sfērā šādi rezultāti vēl līdz šim nav sasniegti. Minētais arī kalpoja kā motivācija tam, kāpēc autora pētījumos ir meklētas un atrastas dažas, ļoti svarīgas objektīvo kodēšanas un tīkla parametru robežvērtības, kuri kā mainīgie var tikt iekļauti objektīvās kvalitātes novērtēšanas un prognozēšanas modeļos.

2.5.Kopsavilkums un secinājumi

Otrā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas metožu pārskatam. Pirmā apakšnodaļa ir atvēlēta video kvalitātes novērtēšanas metožu, skalu un pielietojuma sfēras aprakstam un analīzei. Otrajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodēm. Trešajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par objektīvo video kvalitātes novērtēšanu izmantojot *SA* un *TA*. Ceturtajā apakšnodaļā ir apkopota informācija par video kvalitātes prognozēšanu izmantojot objektīvos video kvalitātes parametrus.

Darba nodaļas rezultāti un secinājumi:

- Ir veikts literatūras pārskats par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem:
 - Ir izstrādātas rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēlei. Rekomendējamie metodes izvēles kritēriji: kas jānovērtē – kodēšanas vai pārraides procesu ietekme uz kvalitāti –, kā jānovērtē – vispārējā kvalitāte vai

bojājumu ietekmes kvalitāte –, kura no metodēm respondentiem ir vieglāk uztverama un saprotama, kā arī kura no metodēm ir ātrāka, kura precīzāka.

- Ir izstrādātas vadlīnijas video kvalitātes metožu uzlabošanai, kur vienlaicīgi tiek izmantota gan marķēta, gan nemarkēta kvalitātes novērtēšanas skala, tādējādi iegūstot datus par novērtējamā video fragmenta vispārējo un akceptēšanas kvalitāti. Izstrādātā metode dod iespēju iegūt divdimensionāla *MOS* kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.
- Konstatēts, ka *ITU – T* [33] rekomendācijā ir neskaidri un vispārināti definētas dažādu video parametru un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības, piemēram, pakešu zudumam ir jābūt mazākam par 10 %. Turpretī autora eksperimentālo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka pakešu zudums virs 1 % ir nepieņemami liels $MOS = 1.4 - 2.2$.
- Konstatēts, ka *ITU – T* [33] un [32] rekomendācijās, lai novērtētu kvalitāti, ir radīti ļoti daudz kvalitātes novērtēšanas parametri un ar tiem saistīti koeficienti. Praktiski realizēt šādu kvalitātes novērtējuma modeli ir ļoti sarežģīti un laikietilpīgi, varētu pat teikt, ka praksē ieviest praktiski neiespējami. Parametru skaits ir būtiski jāsamazina, un koeficientu robežvērtībām ir jābūt precīzi definētām, kuras eksperimentāli ir aprobētas ar subjektīviem kvalitātes novērtēšanas testiem.

Primāri video kvalitātes novērtēšanas metodes izvēlē ir jāvadās pēc tā, kas ir jānovērtē – kompresijas vai pārraides procesu ietekme uz kvalitāti –, kā jānovērtē – vispārējā kvalitāte vai bojājumu (degradācijas) ietekmes kvalitāte. Sekundāri, bet ne mazsvarīgi, ir jāņem vērā, kura no metodēm respondentiem ir vieglāk uztverama un saprotama, kura ātrāka, kura precīzāka.

ACR un *ACR – HR* var uzskatīt par populārākām vispārējās kvalitātes novērtēšanas metodēm, kuru parasti izmanto video signālu pārraides ietekmes novērtēšanai. *ACR* un *ACR – HR* ir ieteicams izmantot pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai. Savukārt *DCR* ir zināma kā ienesto bojājumu vai degradācijas apmēra novērtēšanas metode, kuru var izmantot gan kompresijas, gan pārraides ietekmes novērtēšanai. Savukārt *PC* un *SCJAC* ir vispārējās kvalitātes novērtēšanas metodes, kuras ieteicams izmantot video kompresijas ietekmes novērtēšanai. Dažādu kompresijas parametru noskaņošanai, kur nepieciešama ļoti augsta precizitāte, ir ieteicams izmantot *PC* vai *SCJAC* metodes.

Praksē ir pieejami dažādi paņēmieni video attēla kvalitātes novērtēšanai, piemēram, *FR* (*Full Reference*), *RR* (*Reduced Reference*), *NR* vai *ZR* (*No Reference* vai *Zero Reference*). *FR* ir populārs un nosacīti vienkāršs paņemiens subjektīvās un objektīvās video attēla kvalitātes

novērtēšanai. Savukārt salīdzinoši niecīgas pētniecības aktivitātes ir veltītas *RR* un *NR/ZR* paņēmieniem, ko arī apliecina šajā pētījumā [233] veiktais pārskats. Šī promocijas darba eksperimentos ir izmantotas *FR* subjektīvās un objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodes.

Cilvēka īstermiņa atmiņas ilgums svārstās no 15 sekundēm līdz 30 sekundēm, bet atmiņas apjoms ir ierobežots ar 7 ± 2 elementiem. Tāpēc attēla kvalitātes testēšanā izmantotā video fragmenta ilgumam nevajadzētu būt garākam par 30 sekundēm, kā arī sižetā redzamo bojājumu skaitam nevajadzētu būt lielākam par 9.

Par vispārējās video kvalitātes vai ienesto bojājumu novērtējuma rādītāju parasti izmanto *MOS*, kuru mēdz dēvēt par viendimensiju kvalitātes novērtējumu, jo tas neietver visas cilvēka vizuālās uztveres īpatnības. Tomēr *MOS* jau vairāk kā desmit gadus var dēvēt par (*de-facto*) mēru video kvalitātes novērtēšanā. *MOS* datu ieguvei un aprēķinam izmanto dažādas video kvalitātes novērtēšanas skalas. Lai arī teorētiski 9, 11 un 100 baļļu skalām ir jābūt mazākai standarta novirzei salīdzinot ar 5 baļļu skalu, tomēr praksē šīs atšķirības ir statistiski nenozīmīgas. Tāpēc par vienu no galvenajiem kvalitātes novērtēšanas skalas izvēles kritērijiem var būt respondentu izvēlēta skala, kura ir atzīta par vieglāk uztveramu un saprotamu. Pareiza respondentu izvēle un atlase ir būtiska. Vispirms respondentus izvēlas pēc dzimuma, vecuma, izglītības, kā arī citiem sociāli ekonomiskiem rādītājiem. Otrkārt, visiem atlasītajiem respondentiem, izmantojot specializētus testus, tiek novērtēts vispārējās redzes asums (*Snellen*) un krāsu redze (*Ishihara*), atsevišķos eksperimentos tika izmantots kontrasta jūtības novērtēšanas tests (*Pelli-Robson*). Lai video kvalitātes novērtēšanas testa rezultātus varētu uzskatīt par ticamiem, respondentu skaitam ir jābūt lielākam par 15, kaut gan dažādos literatūras avotos, t.sk. *ITU* rekomendācijās un pētījumos, šis skaits svārstās no 6 līdz 40.

Pēc literatūras pārskata un analīzes var secināt, ka tehniski piemērotas metodes izvēle ir ļoti būtiska, tāpēc, nepieciešams izveidot eksperimentos izmantojamo kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas, un turpmākie nodaļas darba uzdevumi ir sekojoši::

- Izveidot testgultni un metodiku, kura tiks izmantota darba eksperimentos:
 - Izveidot testgultni video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai;
 - Izveidot metodiku video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai, ar kuras palīdzību var modelēt video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus;
 - Veikt respondentu redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) pārbaudes;

- Veikt monitora kalibrēšanu;
- Veikt respondentu atlasu eksperimentiem;
- Veikt video sižetu atlasu un novērtēšanu, kuri tiks izmantoti darba eksperimentos:
 - Veikt video sižetu atlasu pēc satura (daba, dzīvnieki, sports, ziņas, u.tml.);
 - Veikt video sižetu atlasu pēc telpas (SA) un telplaika (TA) mērījumiem;
 - Veikt oriģinālā un bojāto (kodēšanas vai pārraides rezultātā radušos bojājumu) video sižetu salīdzinājumu pēc MSE un $PSNR$ mērījumiem.

3. VIDEO KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS METODIKA

Trešā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas metodikas aprakstam. Pirmajās trijās apakšnodaļās ir apkopota informācija par eksperimentālajos pētījumos izmantotās testgultnes izveidošanas nosacījumiem, t.sk. kompresijas un pārraides aprīkojuma tehniskajiem raksturlielumiem, monitora kalibrēšana, kā arī testēšanas telpas uzbūvi, mikroklimatu un mērījumi. Ceturtajā apakšnodaļā aprakstīta eksperimentos piesaistīto respondentu atlases principi, t.sk. respondentu atlase pēc dzimuma, vecuma, nodarbošanās, kā arī atlase izmantojot redzes asuma, krāsu redzes un kontrasta jūtības testus. Piektajā apakšnodaļā aprakstīts testēšanā izmantotā video materiāla sagatavošanas un atlases prasības, t.sk. video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc *SA* un *TA*, kā arī video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc *MSE* un *PSNR*. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīta video kvalitātes novērtēšana – statistiskā datu apstrāde. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

3.1. Testgultne un metodika

Video kompresijas un pārraides tehniskie parametri var būtiski ietekmēt video kvalitātes novērtējumu, tāpēc, lai nodrošinātu ticamus eksperimentu rezultātus tika izveidota atbilstoša testgultne un video kvalitātes novērtēšanas metodika. Pirmkārt bija izveidota eksperimentu veikšanas testgultne, kura nodrošināja visiem respondentiem identiskus testa apstākļus, kā arī kontrolējamus un nemainīgus tehniskos parametrus. Otrkārt bija izstrādāta metodika, kura apraksta specifiskus testgultnes parametrus, to kalibrāciju un mērījumus, eksperimentos izmantojamo kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles rekomendācijas, kā arī iegūto datu apstrādes un analīzes procedūru.

Video kvalitātes novērtēšanas metodiku var iedalīt vairākos posmos:

- Video kvalitātes testēšanas laboratorija;
- Respondentu atlase pēc *Ishihara*, *Snellen* un *Pelli-Robson*;
- Respondentu atlase pēc vecuma, dzimuma, izglītības;
- Video sižetu atlases rekomendācijas (sintētiski, tipiski video sižeti);
- Video sižetu novērtējums pēc *SA* un *TA*;
- Video sižetu novērtējums pēc *MSE* un *PSNR*;
- Video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles rekomendācijas;

- Rekomendācijas divdimensionāla video kvalitātes un akceptēšanas novērtējuma (*2D-MOS*) ieguvei;
- Statistisko datu apstrāde;
- Pakešu zuduma, trīce un aiztures emulācijas.

Pamatojoties uz literatūras pārskatu un situācijas analīzi video kvalitātes novērtēšanā, konstatēts, ka eksperimentu veikšanai ir jāizveido atbilstoša testgultne un metodika.

3.2. Testgultnes telpas sagatavošana

Testgultnes telpa ir aprīkota vadoties pēc rekomendācijās [22] un [23] noteiktajiem parametriem. Testēšanai izmantota 25 m² telpa, aptuveni 5 m × 5 m. Dabīgā apgaismojuma aizturēšanai un apgaismojuma intensitātes regulēšanai izmantotas necaurspīdīga auduma rullo žalūzijas, apgaismojuma līmenis aizvērtā veidā 0 lx. Mākslīgam apgaismojumam izmantotas 2700–3200 K krāsu temperatūras fluorescentās lampas, kuru apgaismojumu intensitāte ir regulējama 50–800 lx, mērot perpendikulāri monitoriem, galda virsmas augstumā, izmantojot luksometru un kolorimetru. Kolorimetrs tika izmantots telpas apgaismojuma temperatūras (*K*, *CCT* pēc *X* un *Y*), gaismas avotu dominējošā viļņa garuma un krāsu mērījumiem, kā arī telpas temperatūras noskaņošanai, dominējošo krāsu izolēšanai. Tieši pretī monitoriem ir ierīkota testētāja sēdvietā. Tikpat svarīgi ir ņemt vērā arī rekomendācijās neminētos, bet, iespējams, traucējošos faktorus, kuri var ietekmēt testēšanas rezultātus, piemēram, fona trokšņa līmenis [128], temperatūra, mitrums, vēdināšanas trūkums, u.tml. Visiem respondentiem tika nodrošināti izmērāmi, kontrolējami un pēc iespējas vienādi testēšanas apstākļi, skatīt 3.1. tabulā. Fona troksnis 30–35 dB, gaisa temperatūra 20–22 °C, gaisa relatīvais mitrums 40–60 %, caurvējš, gaisa kustības ātrums 0.1 – 0.2 m/s, kā arī regulāri tika kontrolēts CO₂ līmenis un tā regulēšana tika nodrošināta ar ventilāciju, nepieciešamības gadījumā kompensēta ar vēdināšanu. 3.1. tabulā ir uzskaitīti svarīgākie testēšanas telpas mikroklimata rādītāji un to vērtības.

Testēšanas telpas mikroklimats

Rādītājs	Vērtība
Apgaismojuma līmenis	200 lx
Apgaismojuma temperatūra (CCT)	3000 K
Gaisa temperatūra	20–22 °C
Gaisa mitrums	40–60 %
Fona trokšņa līmenis	30–35 dB
Gaisa kustības ātrums	0.1–0.2 m/s

Telpas apgaismojuma mērījumiem izmantots gaismas mērītājs (*illuminance meter, lux*), apgaismojuma krāsu mērījumiem kolorimetrs (*chrominance meter, XYZ, xyY*). Testgultnes telpas aprīkojums nodrošināja visiem respondentiem kontrolējamus un gandrīz identiskus testēšanas apstākļus.

3.3. Testgultnes aprīkojuma sagatavošana

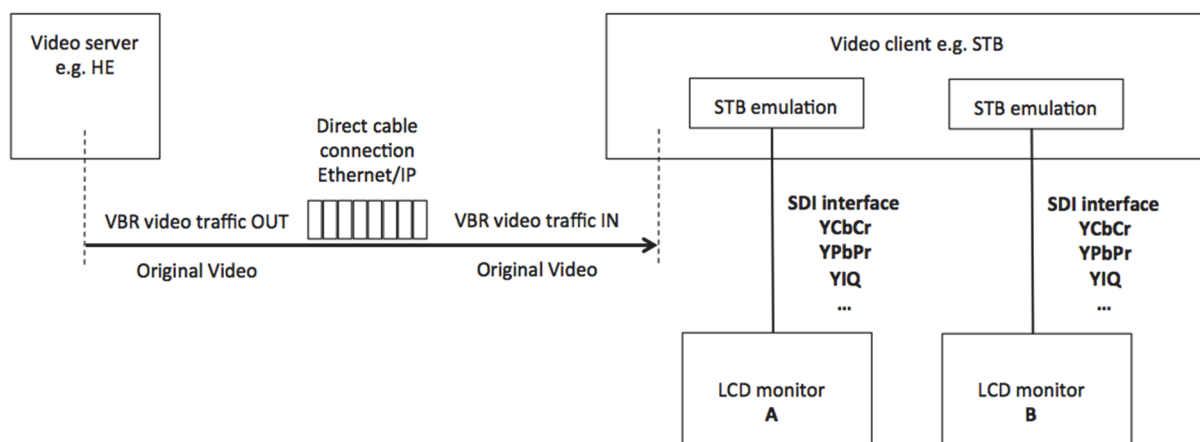
Pētījumos tika izmantota vairāku ražotāju aparatūra un programmatūra, t.sk. dažādas klases monitori, dekoderi, savienošanas interfeisi, galvstacijas un tīkla aprīkojums, bet pamatu tika izmantota speciāli aprīkota testa telpa, apgaismojuma un krāsas mērījumu aprīkojums, studiju kvalitātes LCD monitori, jēldatu video signāla interfeisa kartes, dators video servera (*HeadEnd*) un klientu (*Set-top-Box*) simulācijām ražotāja *Apple MacPro*, reālā laika tīkla aprīkojuma emulāciju un pārraides procesa simulāciju rīki – ražotāja Cisco komutatori, maršrutētāji, specializēta emulācijas programmatūra, kā arī vesela virkne programmlīdzekļu un papildu aprīkojums, skatīt 2. pielikumā.

Monitora ekrāns 1920 x 1080, 4 : 2 : 2, RGB 10 – biti, video interfeisi: *SDI, CVBS, RGB/YPbPr, HDMI/YCbCr*, ekrāna spilgtuma uzstādīšana un mērījumi (cd/m^2 , 0–500), kontrasta attiecība (1300 : 1), iebūvēta kalibrēšana izmantojot spektraskopu, *AWB (Automatic White Balance)* uzstādīšana, krāsu temperatūras uzstādīšana (*K*, 4000 – 13000, *CCT, X, Y* = 0.27 – 0.35) un mērījumi, krāsu intensitātes vektraskops un signāla amplitūdas (*IRE*, 0/7.5 – 100) mērījumi, u.c., ir tikai daži kontrolējami monitora parametri, pārējos skatīt 2. pielikumā. 3.2. tabulā ir uzskaitīti svarīgākie raksturlielumi, kuri izmantoti ekeprimentos pielietoto monitoru kalibrēšanai.

Monitora parametri un kalibrēšana

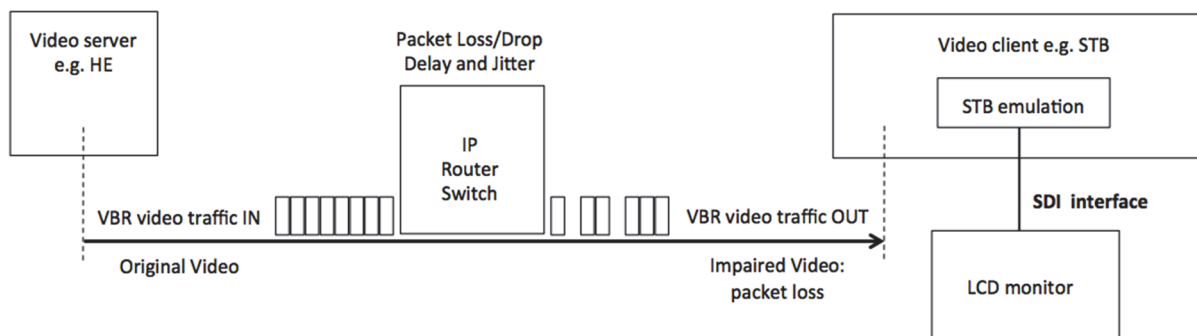
Rādītājs	Vērtība
Spilgtuma līmenis (pīķa vērtības)	200 cd/m ²
Apgaismojuma temperatūra (<i>CCT</i>)	6500 K
Baltās krāsas punkts (<i>CCT</i>)	D65
<i>CIE xyY</i> (<i>CCT</i>)	x = 0.3128, y = 0.3292
Ekrāna izšķirtspēja un proporcija	1920 x 1080, 16 : 9
Ciparu video signāls (jēldatu/ <i>RAW</i>)	<i>SDI</i> 1920 x 1080p
Skatīšanās attālums un leņķis	3 <i>H</i> , 30°
Pārējie tehniskie raksturlielumi atbilstoši [22], [127] un [128]	

Pētījumos par video kodēšanas un video interfeisu kvalitātes novērtēšanu [196] ir izmantota 3.1. attēlā parādītā slēguma shēma. Minētajā testēšanas shēmā izmantots *FR* (*Full Reference*) paņēmieni.



3.1. att. Video kodēšanas kvalitātes novērtēšanas blokshēma

Pētījumos par pakešu zuduma ietekmi uz video pārraides kvalitātes novērtēšanu [107] ir izmantota 3.2. attēlā parādītā slēguma shēma. Līdzīgi kā kodēšanas, tā arī pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas testos izmantots *FR* (*Full Reference*) paņēmieni, kur pikseli pēc pikseļa (*pixel-by-pixel*) tiek salīdzināti oriģinālā (*original*) un uztvertā/bojātā (*impaired*) video attēli, veicot laikietilpīgas un apjomīgas skaitļošanas operācijas.



3.2. att. Video pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas blokshēma

Viens no svarīgākajiem faktoriem ir eksperimentos lietoto monitoru kalibrēšana, izmantojot vektraskopu (*vactroscope*) un viļņu formas monitoru (*waveform monitor*), kā arī spilgtuma līmeņa, *AWB* (*Automatic White Balance*) un krāsu temperatūras mērījumi un noskaņošana. Tikpat būtiski ir veikt eksperimentos izmantotās testa telpas apgaismojuma līmeņa (*luxometer*) un krāsu tonalitātes (*colorimeter*) mērījumus un noskaņošanu.

Monitoru spilgtuma mērījumiem telpā tika izmantots spilgtuma mērītājs (*luminance meter*), bet testēšanas telpas apgaismojuma mērījumiem izmantots gaismas mērītājs (*illuminance meter*), apgaismojuma krāsu mērījumiem – korolimetrs (*chrominance meter* vai *colorimeter*). Pakešu zuduma, aiztures un trīces emulācijām izmantoti simulatori, piemēram, *ns2*, *netem*, *anue*, kā arī dažādi *Unix/Linux* pakešu filtrācijas rīki. Video apstrādei izmantota virkne programmrīku no *WinOS* un *MacOS*, piemēram, *Final Cut Pro X*, *Compressor*, *Broadcaster*, *Darvin*, *Matlab/Simulink*, *AJA TV*, *h264*, *x264*, *ffmpeg*, *VLC*, u.tml.

Papildus augstāk minētajam aprīkojumam tika izmantota arī speciāla datu apstrādes un analīzes programmatūra, piemēram, *MS Excel*, *StatPlus:mac LE*, *WEKA*, *JMP*. Izmantotās aparatūras un programmatūras tehniskās specifikācijas skatīt 2. pielikumā.

3.4. Monitora kalibrēšana

Viens no svarīgākajiem faktoriem ir eksperimentos lietoto monitoru kalibrēšana, izmantojot vektraskopu (*vactroscope*) un viļņu formas monitoru (*waveform monitor*), kā arī spilgtuma līmeņa, *AWB* (*Automatic White Balance*) un krāsu temperatūras mērījumi un noskaņošana.

Krāsu temperatūra ir redzamās gaismas mērvienība izteikta *Kelvinos (K)*. Krāsu temperatūras definīcija ir atrodama *CIE (International Commission on Illumination)* [234] standarta vārdnīcā. Krāsas temperatūra ir absolūti melna ķermeņa starojuma (*blackbody radiator*) temperatūra, kura uztvertā krāsa visprecīzāk atgādina konkrētā ierosinātāja krāsu pie tā paša spilgtuma, noteiktos novērošanas apstākļos. Absolūti melna ķermeņa vai *Planka* starojuma avota temperatūru aprēķina pēc (3.1). formulas.

$$M(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1}, \quad (3.1)$$

kur λ ir viļņa garums metros (m), T ir absolūti melna ķermeņa temperatūra *Kelvinos (K)*, $C_1 = 3.74183 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ un $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$. Spektrālā starojuma sadalījums $M(\lambda, T)$ ir tieši proporcionāls atbilstošai temperatūrai T .

Pēc (3.1). formulas aprēķiniem var secināt, ka zemas temperatūras krāsām ir sarkanīgs tonis, bet augstas temperatūras krāsām zilgans tonis. Tas ir pilnīgi pretēji tam, kā vairums cilvēku psiholoģiski asociē krāsas ar temperatūru, sarkano krāsu uztver kā siltu krāsu, bet zilā krāsa tiek uztverta kā auksta krāsa.

CCT (Correlated Color Temperature) [235] aprēķinam izmantojam šo [236] metodi. (3.2. formulā ir parādīts paņēmieni, kā aprēķināt *CCT* pēc dotām *CIE 1931* krāsu telpas X un Y koordinātēm. *CIE (International Commission on Illumination)* nav apstiprinājuši nevienu konkrētu metodi, ar kuras palīdzību var aprēķināt krāsu temperatūru, tāpēc praksē tiek izmantoti ļoti daudz un dažādi algoritmi, autors savā darbā izmantojis augstāk minēto [236] metodi.

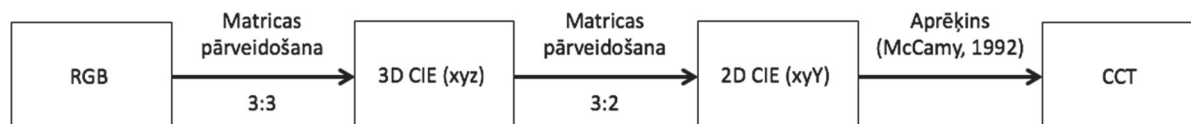
$$n = \frac{(X - X_e)}{(Y_e - Y)} \quad (3.2)$$

$$T_{CCT} = 449.0 * n^3 + 3525.0 * n^2 + 6823.3 * n + 5520.33,$$

kur $X_e = 0.3320$ un $Y_e = 1.858$.

[236] metode ir precīza krāsu temperatūras aprēķinu metode no 2000 K līdz 10000 K , kur maksimālā absolūtā kļūda pie 6500 K ir mazāka par 2 K . Precizitāte atbilstošajā diapazonā ir pilnībā pietiekama, jo eksperimentos izmantotā monitora pieejamais diapazons ir robežās no 4200 K līdz 13000 K (kombinējot *CIE 1931 X, Y, Z* ievadvērtības $2D$ plaknē (xyY) $X, Y = 0.270 - 0.350$), tad kalibrēšanā baltā punkta iestatīšanai, galvenokārt, tika izmantoti divi lielumi

6500 K (*D65*) un 9300 K (*D93*). Ar specializētu monitora zondi monitorā virsmas nomērītas *RGB* signālu vērtības, tad tās pārrēķinus uz 3D *CIE* (*xyz*), 2D *CIE* (*xyY*) un *CCT*, skatīt 3.3. attēlā.



3.3. att. *CCT* aprēķina process

Tā kā trihomātiskās vērtības *CIE* (*xyz*) vai arī tās 2D analogus *CIE* (*xyY*) tiešā veidā izmērīt nav iespējams, tad izmantojot ārējos sensorus, mēra *RGB* signālus, tad veic to pārveidošanu uz *CIE* (*xyz*) vērtībām, tad uz *CIE* (*xyY*), un tikai tad aprēķina *CCT*, aprēķina process vizualizēts 3.3. attēlā.

Vispirms veic *RGB* signālu mērījumus, tad *RGB* matricas kartēšanu uz *CIE* (*xyz*) trihromātiskajiem ekvivalentiem atbilstoši 3.3. tabulai. Korelācijas matrica ir aprēķināta, par pamatu izmantojot empīriskus datus no trim dažādiem gaismas avotiem pietiekami plašā diapazonā: luminiscences gaismas avots ar augstu 6400 K un zemu 3000 K temperatūru un 60 W kvēlspuldze. Ļoti specifiskos gadījumos, ja nepieciešama vēl augstāka precizitāte, tad jāizvēlas pietiekami šaura diapazons gaismas avoti. Atbilstošā gaismas avotu diapazons *CIE* trihromātisko krāsu vērtību mērījumiem vēlams izmantot pēc iespējas augstākas precizitātes krāsu mērītāju (kolorimetru vai krāsu spektroskopu). Pēc iegūtajiem datiem var formēt jaunu *RGB-CIE* (*xyz*) korelācijas matricu. Skatīt 4. pielikumā *RGB-CIE* (*xyz*) korelācijas matricas aprēķinus atbilstoši 3.3. tabulai.

3.3. tabula

RGB-CIE (*xyz*) korelācijas matricu aprēķins

X	=	(-0.14282) (R)		(1.54924) (G)		(-0.95641) (B)	
Y		(-0.32466) (R)	+	(1.57837) (G)	+	(-0.73191) (B)	= Spilgtums*
Z		(-0.68202) (R)		(0.77073) (G)		(0.56332) (B)	

* Spilgtums (*Illuminance*)

Nākamajā solī veic trīsdimensiju $3D$ CIE (xyz) pārveidošanu uz divdimensiju $2D$ CIE (xyY) atbilstoši (3.3). formulai, kur $z = 1 - x - y$ un netiek izmantots divdimensiju gadījumā $2D$ CIE (xyY).

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{(X + Y + Z)} \\ y &= \frac{Y}{(X + Y + Z)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Galarezultātā var veikt CCT aprēķinu atbilstoši (3.2). formulai.

3.5. Respondentu atlase eksperimentiem

Pirmajā posmā respondenti tika atlasīti pēc dzimuma, vecuma, izglītības līmeņa, profesijas vai nodarbošanās sfēras [21]. Šajā pašā pētījumā salīdzināti dažādu respondentu atbildes, kuri atlasīti pēc šādām pazīmēm: dzimums, vecums, izglītība, profesija, kā arī profesionalitāte vai pieredze darbam ar ciparu video tehnoloģijām (šos respondentus mēdz dēvēt par ekspertiem). Pētījumā konstatēts, ka kvalitātes novērtējumu ietekmē visas respondentu pazīmes, bet par statistiski nozīmīgām var uzskatīt tikai divas pazīmes – respondenta vecums un profesionalitāte vai zināšanas un pieredze darbā ar ciparu video tehnoloģijām. Novērots, ka gados jaunāki cilvēki un respondenti, kuri ir atlasīti kā eksperti, vērtē kvalitāti kritiskāk salīdzinājumā ar vecāka gadagājuma cilvēkiem, kā arī visiem pārējiem respondentiem, kuri ir atlasīti kā nespeciālisti vai tipiski lietotāji (ne – eksperti) (*non-expert*). Minētie respondentu atlases kritēriji ir ņemti vērā visos eksperimentos. Visos darba eksperimentos bija pieaicināti respondenti, kuri nav eksperti. Svarīgi pieminēt, ka kodēšanas algoritmu uzlabošanai un izstrādei tiek izmantoti nespeciālistu, nevis ekspertu kvalitātes novērtējuma testi. Šajā [237] un šajā [238] pētījumā konstatēts, ka ekspertu un nespeciālistu kvalitātes vērtējumi var atšķirties, jo nespeciālisti, novērtējot kvalitāti, vairāk koncentrējas uz attēla spilgtuma izmaiņām, bet eksperti pievērš uzmanību attēlā redzamo elementu kontūrām un kopējās tekstūras dzidrumam. Visos darba eksperimentos bija pieaicināti respondenti, kuri nav eksperti. Minētie respondentu atlases kritēriji ir ņemti vērā visos eksperimentos.

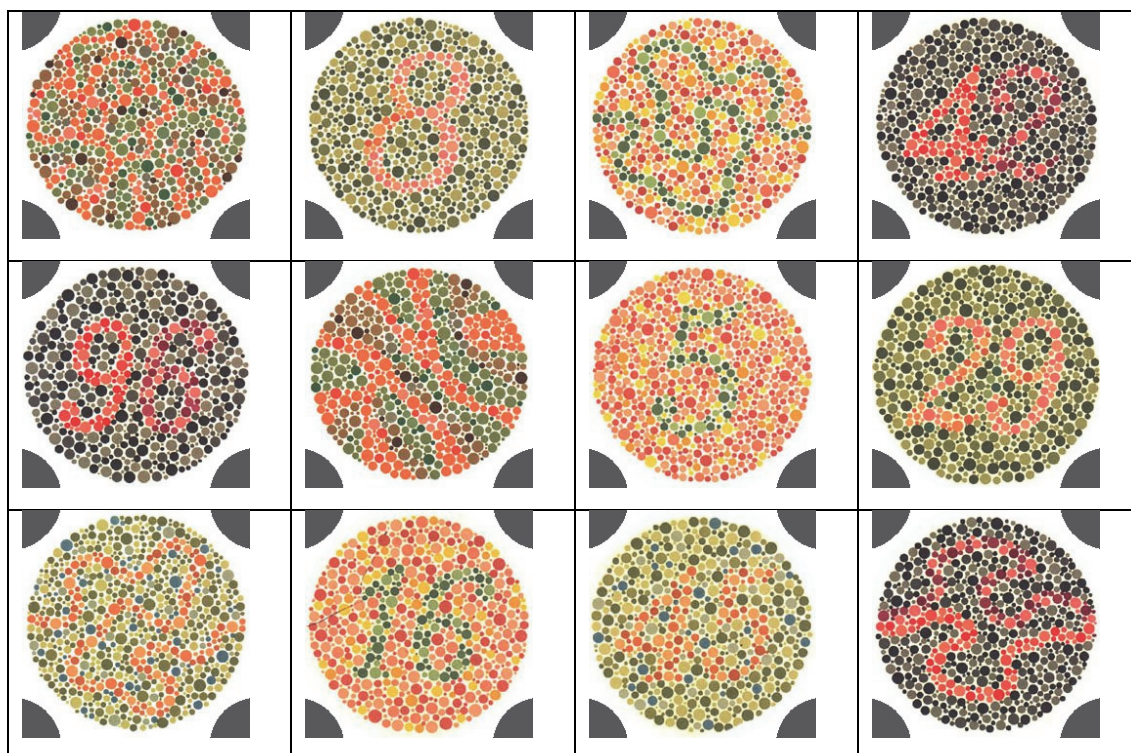
Otrajā posmā, lai novērtētu atlasīto respondentu vispārējo redzes līmeni, tikai izveidots vienkāršots redzes, krāsu atšķirtspējas un kontrasta jūtības pārbaudes tests, skatīt 1. pielikumā.

Lai savāktu augstāk minēto informāciju par respondentiem, tika izstrādāta speciāla anketa, skatīt 14. pielikumā.

3.5.1. Cilvēka redzes testi – Ishihara, Snellen un Pelli-Robson

Ņemot vērā cilvēka redzes īpatnības darba eksperimentos izmantoti trīs dažādi cilvēka redzes novērtēšanas testi – krāsu redzes tests izmantojot *Ishihara*, vispārējas redzes novērtēšanas tests izmantojot *Snellen* un kontrasta jūtības tests izmantojot *Pelli-Robson*.

Respondentu krāsu atšķirtspējas testēšanai tika izmantots krāsu uztveres tests, kas palīdz vienkāršotā veidā noskaidrot, vai respondentiem ir krāsu redzes defekti (daltonisms). Pēc vispārējās statistikas visā pasaulē 8 % vīriešu un 0.5 % sieviešu ir krāsu redzes defekti, īpaši izteikti ir zaļo un sarkano krāsu redzes defekti. Tieši tāpēc pārbaudei tika izmantots *Ishihara Color Test*, kas pirmo reizi ir publicēts 1917. gadā un nosaukts tā izstrādātāja prof. dr. Shinobu Ishihara vārdā. *Ishihara* pārbaudes kartiņu attēlu paraugus skatīt 3.4. attēlā. *Ishihara* tests ļauj vienkāršā un ātrā veidā identificēt problēmu, ja nepieciešams ļoti augstas precizitātes tests, tad ieteicams izmantot *Nagel's Anomaloscope* mēraparātu vai arī atbilstošu *Anomaloscope* programmatūru, bet obligāts nosacījums ir kalibrēts monitors.



3.4. att. *Ishihara* testa kartiņu attēlu paraugi

Respondentu krāsu redzes pārbaudei tika izmantoti 24 *Ishihara* kartiņu elektroniskie attēli, kuri secīgi viens aiz otra tika attēloti monitorā. Katra kartiņa ekrānā tiek attēlota 3 sekundes, kartiņu nomaiņas laikā tiek attēlots pelēks ekrāns ar instrukciju, kā jāaizpilda anketa. Respondentiem jāaizpilda anketa ar 24 tukšiem tabulas laukiem 96 sekunžu laikā. Testā izmantoto kartiņu attēlus, pareizo un nepareizo atbilžu paskaidrojumus, kā arī iespējamo krāsu redzes problēmu aprakstu skatīt 1. pielikumā.

Ishihara krāsu redzes testu vēlams veikt dabīgā dienas apgaismojumā. Ja tādu iespēju nav, tad testu var veikt mākslīgā apgaismojumā, bet mākslīgā apgaismojuma spilgtumu un krāsu maksimāli pietuvināt dabiskajam dienas apgaismojumam. Jāizmanto foto vai TV studiju mākslīgā apgaismojuma sistēma ar dažādu krāsu filtriem, regulējamu apgaismojuma intensitāti, virzienu un leņķi, kā arī atbilstoša mēraparatūra: apgaismojuma (*Illuminance*) un krāsu (*Color Meter*) mēraparatūra, skatīt 2. pielikumā.

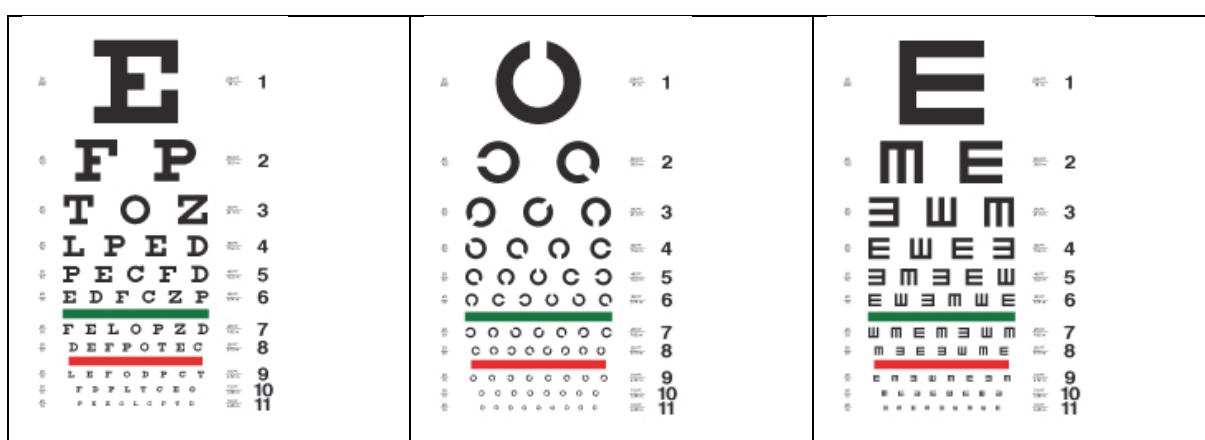
Ishihara grāmatā iekļauto testa kartiņu izmēri ir 15×15 cm, bet testa attēli uz TV ekrāna ir 4 reizes lielāki, nekā attēli grāmatā. Ja testēšanas attālumam līdz attēlam grāmatā ir jābūt 75 cm, tad attālumam līdz TV ekrānam jābūt vismaz 3 m ($75 * 4 = 300$).

Respondentu redzes novērtējuma testēšanai tika izmantots tests *Snellen Chart*, kuru 1892. gadā izstrādāja Herman Snellen, lai varētu novērtēt respondenta redzes asumu. *Snellen* testu izmantoja, lai noteiktu cilvēka redzes asumu. *Snellen chart* testa plakāts parasti atrodas uz apgaismotas sienas 6 metru (20 pēdu) attālumā no respondenta (testējamās personas). Ja respondenta redzes asuma novērtējums ir “6/60”, tas nozīmē, ka šī persona var nolasīt augšējo “6/60” rindiņu no Snellen testa plakāta. Tas nozīmē, ka jūs varat izlasīt augšējo tabulas burtu (augstākais burts gandrīz vienmēr ir “6/60” vai “20/200”) no 6 metru attāluma. Skaitlis 60 šajā gadījumā nozīmē, ka cilvēkam ar labu redzes asumu ir jāspēj nolasīt šo burtu no 60 metru attāluma. Savukārt respondentam ar redzes asuma novērtējumu “6/6” vai “20/20” ir jāspēj nolasīt skaitli 6 no 6 metru attāluma. Eiropā ir pieņemts izmantot decimālo ekvivalentu, piemēram, “20/200” apzīmē kā “0.1”, “20/20” apzīmē kā “1” u.tml.

Izpildot *Snellen* testu, nosaka redzes asuma vērtību. Ja cilvēks labi redz “20/50” burtu rindu, tad redzes asums ir daļskaitlis no “20/50” (jeb 0,4). Ļoti bieži rodas pārpratumi starp tādiem lielumiem, kā redzes asums un acs refrakcija (tuvredzība vai tālredzība). Acu ārsts vai optometrists novērtē redzi ar diviem lielumiem: redzes asumu (0.2) un acs refrakciju (-5). Redzes asumu novērtē ar *Snellen* testu, bet acs refrakciju ar speciālām lēcām vai reflektometru / foropters, kur lielums (-5) nozīmē tuvredzību ar lielumu 5 dioptrijas.

Labas redzes asumam atbilst tabulas rindas “6/6” vai “20/20”. Parasti tabulas apakšā ir atrodamas papildu – 2 – 3 rindiņas, kuras nepieciešamas, lai pārbaudītu respondentus, kuriem ir labāka redze par statistiski atzītu labu redzes asumu, piemēram, “6/5” vai “20/16”.

Snellen Chart ir pieejams ļoti daudzos variantos, piemēram, bērniem, cilvēkiem ar sliktām lasīšanas prasmēm vai arī cilvēkiem, kuru dzimtajā valodā lieto hieroglifus, būs piemērots *Landolt C* (*Landolt ring* vai *Landolt broken ring*), *E chart* (*Tumbling E chart*) vai arī mūsdienās jaunākais tests (*ETDRS chart*). *Snellen Chart* pārbaudes kartiņas attēlu paraugu skatīt 3.5. attēlā. *Snellen Chart* testam ieteicams izmantot speciāli sagatavotas kartiņas vai arī elektroniskus attēlus uz kalibrēta monitora.



3.5. att. *Snellen Chart* pārbaudes kartiņas attēla paraugs

Minētos trīs *Snellen Chart* veidus izmanto visbiežāk, kaut arī ir pieejami ļoti daudz to paveidu, piemēram, kirilicas, grieķu, japāņu, korejas hieroglifi vai burti, dažādi attēli, elementi – domino kauliņi, ceļa zīmes, dzīvnieki, u.tml. Kā vēl vienu alternatīvu var minēt *Jaeger Reading Eye Chart*, bet šis tests eksperimentos netika izmantots, jo galvenokārt paredzēts redzes lasīšanas novērtēšanai, apgrūtinot izmantot cilvēkiem ar sliktām lasīšanas prasmēm un bērniem, nepieciešams teksts vairākās valodās. Salīdzinoši laikietilpīgs un sarežģīts tests, kas prasa no respondenta pastiprinātu uzmanību, izpildot testu, kā arī pašam pētniekam, fiksējot un novērtējot rezultātu.

Respondentu vispārējās redzes pārbaudei tika izmantots *Snellen Chart* kartītes elektroniskais attēls, kas tika attēlots monitorā. Kartīte ekrānā tiek attēlota kā statisks attēls, kartītes attēlošanas laikā jāaizpilda anketa. Respondentiem jāaizpilda anketa ar 29 tukšiem burtu laukiem 30 sekunžu laikā. Testā izmantoto kartīšu attēlus skatīt 1. pielikumā.

Darba eksperimentos tika izmantots 24 kartīšu (*Ishihara Color Vision Test*) tests, latīņu alfabēta burtu *Snellen Chart* un *Pelli-Robson Chart* plakātus, skatīt 1. pielikumā. Eksperimentos tika izmantoti vairāki testēšanas paņēmieni (krāsainas papīra kartītes, melnbalts plakāts vai A4 lapa, elektronisku kartīšu attēlošana nekalibrētos displejos, t.sk. mobilajos telefonos, planšetēs, monitoros), bet, galvenokārt, tika izmantota elektronisko *Ishihara*, *Snellen* un *Pelli-Robson* kartīšu attēlošana uz kalibrēta monitora, tādējādi nodrošinot visiem vienādus un kontrolējamus testēšanas apstākļus.



A. Pelli-Robson kontrasta jūtības attēls B. Attēls ar burtiem uz trokšņaina fona C. Pelli-Levi divkārss asuma pārbaudes attēls

3.6. att. *Pelli-Robson* pārbaudes kartiņas attēla paraugs

Savukārt atsevišķos eksperimentos kontrasta jūtības pārbaudēm tika izmantota (*Pelli-Robson Chart*) metodes [239] kartītes elektroniskais attēls [240], kas tika attēlots monitorā, skatīt 3.6. attēlā. Kartīte ekrānā attēlota kā statisks attēls, kartītes attēlošanas laikā jāaizpilda anketa. Respondentiem jāaizpilda anketa ar 48 tukšiem burtu laukiem 60 sekunžu laikā. Testos biežāk izmantots “A. *Pelli-Robson* kontrasta jūtības attēls” 3.6. attēlā. Praksē ir pieejamas dažādas alternatīvas [241], bet *Pelli-Robson* testu var uzskatīt par “*de-facto*” testu, novērtējot kontrasta jūtību.

3.6. Eksperimentos izmantotā video materiāla sagatavošana

Video kvalitātes testēšanā izvēlētais video materiāls būtiski ietekmē iegūtos rezultātus, tāpēc, atlasot video materiālu, tika ņemti vērā ieteikumi no šī pētījuma [242], kā arī atsevišķi ieteikumi no pētījumā analizēto publisko video materiālu datubāzēs pieejamās informācijas [243], t.sk. individuāliem pētījumiem par katru video materiālu datu krātuvi. Testēšanā izmantotais video materiāls tika atlasīts pēc dažādiem video datnes raksturlielumiem [244], [245]: video kodēšanas parametri, video fragmentu *SA* un *TA* mērījumi, oriģinālās un bojātās video datnes ienesto bojājumu kvantitātes mērījumi *MSE*, *PSNR* vai *SSIM*. Eksperimentēšanas vajadzībām galvenokārt tika izmantots publiski pieejams jēldatu / nekompresēts (*raw*) video materiāls, piemēram, [246], šāda veida materiāli publiski ir pieejami visai ierobežotā skaitā. Atsevišķos eksperimentos video testēšanai tika izmantoti sintētiski radīti video materiāli no komerciālām video datu krātuvēm [247]. Sevišķi sarežģīti ir atrast un atlasīt saturiski plašu spektru (ziņas, seriāli, filmas, multfilmās, daba, dzīvnieki, sports, u.tml.) video materiālu ar vēlamiem video datnes parametriem (jēldati, kodējuma formāts, izšķirtspēja, kadru nomaiņas ātrums, *I*, *P* un *B* kadru struktūra, u.tml.).

Pētījumu eksperimentālajā daļā galvenokārt tika izmantoti autora skrupulozi atlasīti un sagatavoti video fragmenti, skatīt 3.4. tabulu, video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā. Minētie video fragmenti tika izmantoti [107] pētījumā par pakešu zudumu ietekmi uz video kvalitātes vērtējumu. Savukārt [195], [196] pētījumos tika izmantoti sintētiskie video sižeti, kuru ekrānšāviņus skatīt 15. pielikumā.

3.4. tabula

Standarta video fragmentu raksturojums

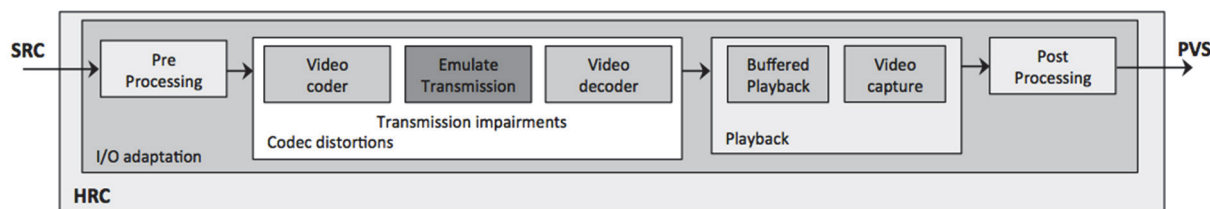
Video	Video fragmenta raksturojums
Daba	Saule, debesis, koki, ūdens, ledus, sniegs, kalni, upes, jūra, puķes, zāle, dubļi, lietūs; karsts un auksts; saulains un apmācies; vējains un lietūs
Ziņas	Diktors/-i lasa ziņas pie galda, stāvēt kājās; fonā redzams ekrāns ar kustīgu ziņu sižetu, tekstuāla informācija; notiek pārslēgšanās uz ziņu sižetiem
Sports	Vairāki sporta veidi: hokejs, basketbols, futbols; skatītāji; zāle; spēlētāju tuvskati, ātra spēlētāju un bumbas vai ripas pārvietošanās pa laukumu
Koncerts	Dziedātāja/-as, grupas tuvskati, tuvināšana un tālināšana; skatītāji; zāle; gaismas efekti; dūmi; ugunošana; iekštelpas un brīvā daba; diena un nakts

Filmas	Detektīvi, melodrāmas, asa sižeta; cilvēku sarunas uz ielas un telpās; skriešana un sēdēšana; diena un nakts; filmas ar specefektiem (sprāgst, deg)
Multfilmas	Dažāda žanra multfilmas (pieaugušajiem, bērniem); kantainas kontūras ar pavisām zīmētu fonu; multfilmas, kuru zīmējumu kvalitāte atgādina filmas
Seriāli	Cilvēku sarunas iekštelpās stāvēt, sēžot, ejot; tuvskati; regulāra pārslēgšanās no viena sarunas partnera uz otru
Dzīvnieki	Dzīvnieki uz zemes, ūdenī, zem ūdens un gaisā; putni, lauvas, citi plēsēji, ziloni, žirafes, krokodils, begemots, zivis; dienā un naktī

Video fragmentu atlasē pirmais solis ir izslēgt testēšanā izmantojamus video fragmentus, kuri ļoti būtiski var ietekmēt katra indivīda saturisko novērtējumu [245]: vardarbību, šausmu filmas, politiku, reliģiju, pornogrāfiju, erotiku, medicīniskas operācijas, u.tml. Aizskarošs, strīdīgs vai kaitinošs video saturs var būtiski traucēt respondentam koncentrēties uzdevuma izpildei, kopumā samazinās vidējā *MOS (Mean Opinion Score)*, palielinās dispersija starp diviem saturiski dažādiem video fragmentiem, tāpēc vēlams izvēlēties pēc iespējas neitrālākas tēmas.

Sevišķi svarīgi, salīdzinot kustīgus attēlus vai video ar statiskiem attēliem, ir novērtēt katra izvēlēta video fragmenta kustības informācijas lielumu un veidu. Pēdējo divdesmit gadu laikā ir radīts vienkāršs un spēcīgs cilvēka vizuālās uztveres kustības novērtēšanas modelis, kas ir izklāstīts veselā virknē pētījumu. Pirmos fizioloģiskos pētījumus un eksperimentus par cilvēka vizuālā ātruma uztveri saistībā ar video kvalitātes novērtēšanu aizsāka Stockers un Simoncelli [248]. Piemēram, ja video fragmenta fonam ir ļoti augsta kustību intensitāte, tad cilvēka uztvere nespēj iegūt tikpat precīzu strukturālu informāciju par video fragmentā redzamo objektu salīdzinājumā ar statisku attēlu. Savukārt, palielinot video fragmenta kontrastu, objekti tiek uztverti ar mazāku nenoteiktību [249]. Video kvalitātes novērtēšanas algoritmu galvenais mērķis ir prognozēt cilvēku uzvedību video kvalitātes novērtēšanā, tāpēc ir svarīgi ņemt vērā arī video fragmenta kustības informāciju, kura var atstāt būtisku ietekmi uz respondentu video kvalitātes novērtējumu. Piemēram, Beijesa (*Bayesian*) teorēma vai lēmumu pieņemšanas sistēma nodrošina iespēju modelēt dažādus cilvēka vizuālās motorikas uzdevumus, t.sk. bioloģiskās uztveres modelēšanu. Eksperimentu veicējs var izmantot *Bayesian* varbūtību, lai aprēķinātu kāda konkrēta uzdevuma etalona vērtības un statistiski salīdzinātu tās ar katra konkrēta respondenta paveikto. *Bayesian* varbūtība ir lēmumu pieņemšanas sistēma, kas ir izveidota uz spēļu teorijas matemātiskā modeļa bāzes.

Vēl viena ļoti svarīga lieta, kura seko pēc video fragmentu atlasē, ir video fragmentu sagatavošana. Testēšanā izmantoto video fragmentu *HRC* (*Hypothetical Reference Circuits*) iegūvi no atlasītiem (oriģināliem) video fragmentiem *SRC* (*Source Reference Channel*) vai *Circuits* skatīt 3.7. attēlā.



3.7. att. *HRC* video ieguve no *SRC* video fragmentiem

No *SRC* iegūst *HRC*, bet respondentiem ekrānā tiek attēlota testēšanas video fragmentu virkne, kuru sauc par *PVS* (*Processed Video Sequences*). *FR* (*Full Reference*) metodes gadījumā savstarpēji jāsalīdzina divi video sižeti oriģināls video (*SRC*) un bojāts video (*PVS*). Svarīgi atzīmēt, ka *PVS* ir rezultējošais video sižets, kas sevī ietver kodēšanas vai pārraides procesa ietekmes atspoguļošanu hipotētiskajā *HRC* kanālā, kuru iegūst no *SRC* video. Video fragmentu atskaņošanas ilgumu, skaitu un secību (oriģināls un bojāts sižets) nosaka izvēlētajā video kvalitātes testēšanas metode.

Ja testēšanā plānots izmantot video materiālu, kuru pašam jānofilmē, jānofotografē un jāapstrādā, tad ir jāņem vērā vēl divi būtiski aspekti, pirmais optiskās ilūzijas un otrais video uzņemšanas procesā radītie optiskie efekti un defekti.

3.6.1. Objektīva video sižetu atlase un kvalitātes novērtēšana pēc SA un TA

Video kvalitātes novērtēšanas testos svarīga ir izvēlēto video sižetu atlase ne tikai pēc sižeta, bet arī pēc objektīvi izmērāmiem parametriem, skatīt aprakstu 2. nodaļā. Būtiski ir video sižeta telpiskie *SA* (*Spatial Activity*) un laika *TA* (*Temporal Activity*) parametri. Praksē ir pieejamas vairākas metodes video sižeta *SA* un *TA* parametru aprēķinam, bet darbā tiks izmantota metode no rekomendācijas [23].

3.6.2. Objektīva video sižetu kvalitātes novērtēšana pēc MSE un PSNR

PSNR un *MSE* izmanto video kvalitātes prognozēšanā, bet eksperimentos tie galvenokārt izmantoti nevis kā kvalitatīvie rādītāji, bet kā kvantitatīvie bojājuma apjoma rādītāji, lai vienkāršotā veidā varētu salīdzināt oriģinālo ar bojātu video, skatīt aprakstu 2. nodaļā.

Ar *PSNR* palīdzību var aprēķināt signāla un trokšņa attiecību starp diviem attēliem un izteikt to decibelos. Šī attiecība bieži tiek izmantota kā kvalitātes mērījums starp oriģinālo un kompresēto attēlu. Lai iegūtu *PSNR*, vispirms aprēķina *MSE*. *MSE* un *PSNR* ir divas kļūdu aprēķinu formulas, lai salīdzinātu attēla kompresijas pakāpi. Ar *MSE* aprēķina vidējo kvadrātisko kļūdu starp oriģinālo un kompresēto attēlu, bet ar *PSNR* palīdzību aprēķina maksimālās kļūdas lielumu. Jo mazāka *MSE* vērtība, jo mazāka kļūda.

3.7.Video kvalitātes novērtēšana

Mūsdienās *MOS* var uzskatīt par (*de-facto*) metriku vai mēru novērtējot multimediju kvalitāti [29]. Ticamu secinājumu iegūšanai, vadoties pēc aprēķinātā *MOS*, ir jānodrošina pietiekoši liels respondentu skaits, kur pēc [23] ir jābūt no 6 līdz 40, bet pēc [22] ne mazākam par 15. Pirms aprēķiniem ir jāveic testa datu apstrāde ar mērķi atrast un dzēst kļūdainus vai nepatiesus datus [22].

Vispirms aprēķina MOS_i vai visu respondentu vidējo vērtējumu $\overline{X_i}$, tad standarta novirzi S_i un ticamības intervālus μ ;

$$MOS_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij}}{N}, \quad (3.4)$$

kur $MOS_i = \overline{X_i}$.

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - MOS_i)^2} \quad (3.5)$$

$$MOS_i - t_{\alpha,N} \frac{S_i}{\sqrt{N}} < \mu < MOS_i + t_{\alpha,N} \frac{S_i}{\sqrt{N}}, \quad (3.6)$$

kur $1-\alpha=0.95$.

Atsevišķos gadījumos aprēķināta korelācija (Pīrsona korelācijas koeficients) r :

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x}) (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (3.7)$$

vai arī Spīrmana korelācija ρ :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (3.8)$$

kur $d_i = X_i - Y_i$ ir atšķirība starp rangiem.

Augstāk minētie aprēķini ir izmantoti video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu datu apstrādei, t.sk. *MOS* vērtību ieguvei. *MOS* ir vidējais aritmētiskais rādītājs (viendimensionāls rādītājs), kuru nevar uzskatīt par viennozīmīgi precīzu objektīvu mērījumu [30], jo tas ir viens no vairākiem statistikas mēriem, kā standartnovirze, ticamības intervāls, variācijas, asimetrijas, ekscesa koeficients, mediāna, moda, korelāciju aprēķins, u.tml.

3.8. Kopsavilkums un secinājumi

Trešā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas metodikas aprakstam. Pirmajās trijās apakšnodaļās ir apkopota informācija par eksperimentālajos pētījumos izmantotās testgultnes izveidošanas nosacījumiem. Ceturtajā apakšnodaļā aprakstīta eksperimentos piesaistīto respondentu atlases principi. Piektajā apakšnodaļā aprakstīts testēšanā izmantotā video materiāla sagatavošanas un atlases prasības. Sestajā apakšnodaļā ir aprakstīta video kvalitātes novērtēšana – statistiskā datu apstrāde.

Darba nodaļas rezultāti un secinājumi:

- Ir izveidota testgultne video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai:

- Ir izveidota testgultnes telpa ar tehniskiem parametriem atbilstoši (BT.500, 2012), (P.910, 2008) un [128], t.sk. telpas apgaismojums, apgaismojuma krāsas un mikroklimata mēraparatūra, skatīt 2. Pielikumā;
- Ir izveidots testgultnes video kodēšanas un pārraides tīkla aprīkojums, t.sk. *LCD* displeji, video serveris (*HE*), video klientu (*STB*) un pārraides tīkla (*Ethernet*, *IP*, *MPEG*) emulāciju aparatūra un programmatūra, skatīt 2. pielikumā.
- Ir izveidota metodika video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai, ar kuras palīdzību var modelēt video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus:
 - Ir izveidotas pakešu atmešanas emulācijas, lai var modelēt dažādus pakešu zuduma scenārijus (aizture, trīces un pakešu zudums) IP tīklos, t.sk. dažādus pakešu atmešanas varbūtību sadalījumus (*Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgais*);
 - Ir izveidotas video kodēšanas un pakešu zuduma rezultātā radīto bojājumu emulācijas, lai varētu modelēt vizuāli redzamus artefaktus skatītājam ekrānā (attēla bloku un šķēles bojājumi, izplūduši attēla elementi, u.tml.);
 - Ir izveidoti respondentu redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) pārbaudes.

Video kompresijas un pārraides tehniskie parametri var būtiski ietekmēt video kvalitātes novērtējumu, tāpēc, lai nodrošinātu ticamus eksperimentu rezultātus, tika izveidota atbilstoša testgultne un metodika. Pirmkārt, tika izveidota eksperimentu veikšanas testgultne, kura nodrošināja visiem respondentiem identiskus testa apstākļus, kā arī kontrolējamus un nemainīgus tehniskos parametrus. Otrkārt, tika izstrādāta metodika, kura apraksta specifiskus testgultnes parametrus, to kalibrāciju un mērījumus, eksperimentos izmantojamo kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas, kā arī iegūto datu apstrādes un analīzes procedūru.

Darba eksperimentos kā pirmais solis, atlasot un klasificējot respondentus, tika veikts redzes skrīnings (redzes kvalitātes novērtējums). Redzes skrīningā tika novērtēti respondentu redzes asums, izmantojot *Snellen* metodi, krāsu redzes pārbaudēm tika izmantota *Ishihara* metode, bet kontrasta jūtības novērtēšanai – izmantota *Pelli-Robson* metode. Redzes skrīnings kalpoja kā papildus kritērijs, veicot datu atlasī, atdalot ticamus no šaubīgiem rezultātiem.

Video kvalitātes testēšanā izvēlētais video materiāls atstāj būtisku ietekmi uz video kvalitātes vērtējumu vai *MOS*, tāpēc, atlasot video materiālu, bija jāņem vērā vairāki būtiski priekšnosacījumi. Vispirms video fragmentus atlasa pēc satura (daba, sports, dzīvnieki, u.tml.), tad izslēdz aizskarošus, strīdīgus vai kaitinošus video sižetus (vardarbību, šausmu filmas, politiku, reliģiju, pornogrāfiju, u.tml.), kuri var būtiski traucēt respondentam koncentrēties uzdevuma izpildei, kā rezultātā samazinās *MOS* un palielinās ticamības intervāla robežas, tāpēc

ieteicams izvēlēties pēc iespējas neitrālākas tēmas. Otrkārt, video sižeti ir jāatlasa pēc tehniskiem parametriem, jāaprēķina katra individuāla video sižeta telpiskās *SA* un laika *TA* vērtības. Jo vairāk smalku elementu attēlā, jo lielāka *SA* vērtība, jo vairāk kustību video sižetā, jo lielāka *TA* vērtība. Tāpēc video kvalitātes novērtēšanas testos jāizmanto plaša spektra video sižeti ar dažādām *SA* un *TA* vērtībām. Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telpa laika aktivitāte – *TA* (*Temporal Activity*) – jo lielāka *TA* vērtība, jo zemāks video sižeta kvalitātes vērtējums *MOS*. Savukārt telpas aktivitātes *SA* (*Spatial Activity*) vērtība neietekmē sintētiskā video sižeta vērtējumu – nav novērotas kvalitātes vērtējuma atšķirības ne lielu, ne arī mazu *SA* vērtību gadījumos.

Ja testēšanā tiek izmantoti dažādu tehnisko parametru *HRC* video, tad šo dažādo *HRC* video fragmentus savstarpējai salīdzināšanai un salīdzināšanai ar *SRC* oriģināla video var izmantot *PSNR*. Kaut arī *PSNR* visai vāji korelē ar *MOS*, tomēr tā ir visiem labi zināma un vienkārša metode, kuru var izmantot kā vispārēju kvantitatīvu kompresijas pakāpes un bojājuma apjoma novērtēšanas rādītāju.

Respondenti tika atlasīti pēc dzimuma, vecuma, izglītības līmeņa, profesijas vai nodarbošanās sfēras. Pētījumā konstatēts, ka kvalitātes novērtējumu ietekmē visas respondentu pazīmes, bet par statistiski nozīmīgām var uzskatīt tikai divas pazīmes – respondenta vecums un profesionalitāte vai zināšanas un pieredze darbā ar ciparu video tehnoloģijām (eksperti). Svarīgi pieminēt, ka kompresijas algoritmu uzlabošanai un izstrādei tiek izmantoti nespeciālistu, nevis ekspertu kvalitātes novērtējuma testi, tāpēc visos darba eksperimentos bija pieaicināti respondenti, kuri nav eksperti.

Pēc literatūras pārskata un analīzes var secināt, ka tehniski piemērots un precīzs eksperimentu izpildes process ir ļoti būtisks, tāpēc, tika izstrādāta metodika, kura apraksta specifiskus testgultnes parametrus, to kalibrāciju un mērījumus, eksperimentos izmantojamo kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas, kā arī iegūto datu apstrādes un analīzes procedūru. Tāpēc turpmākās nodaļas darba uzdevumi ir sekojoši:

- Veikt dažādu video kvalitātes metožu salīdzināšanu ar mērķi noskaidrot, kura no metodēm ir vieglāk uztverama un saprotama:
 - Salīdzināt viena ekrāna un divu ekrānu metodes;
 - Salīdzināt 5, 9, 11 un 100 balļu skalas;
- Veikt dažādu video signālu un interfeisu video kvalitātes salīdzināšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi:

- Veikt video signālu un interfeisu kvalitātes novērtēšanu: komponentais ciparu (*YCbCr 1080i*), komponentais analogais (*YPbPr 720p*), kompozītais (*YIQ 576p*);
 - Salīdzināt rezultātus un pārbaudīt, vai ir statistiski nozīmīgas atšķirības video kvalitātes novērtēšanā, izmantojot *PC* (viena ekrāna metode) un *SCJAC* (divu ekrānu metode);
 - Veikt sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanu 1080i un 576p video signāliem, izmantojot komponento *YCbCr* un kompozīto *YIQ* video interfeisu;
 - Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.
- Veikt pakešu zuduma ietekmes uz video kvalitāti novērtēšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi:
 - Mainīga ātruma video (*VBR*) plūsmai veikt pakešu atmešanu;
 - Atmest 0.25%, 1%, 2% un 5% paketes no kopējā video sižeta apjoma;
 - Pakešu atmešanai izmantot *Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu;
 - Veikt video kvalitātes novērtēšanu:
 - Veikt video kvalitātes novērtēšanu, izmantojot *ACR – HR* (0.25% un 1% pakešu zudumam);
 - Veikt video kvalitātes novērtēšanu pēc *MSE* un *PSNR* (0.25%, 1%, 2% un 5% pakešu zudumam).
 - Veikt bojāto video sižetu *GOP* kadru (*I* un *P* kadri) mērījumus.
 - Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.

4. VIDEO KVALITĀTES EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Ceturtnā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu aprakstam, kuros pētītas video attēla kvalitātes subjektīvo un objektīvo parametru sakarības. Vispirms tika veikta dažādu vērtēšanas skalu un metožu salīdzināšana, lai izvēlētos piemērotākos apstākļus galvenajiem eksperimentiem. Otrajā apakšnodaļā pētīta dažādu video kompresijas variantu un interfeisu ietekme uz video kvalitātes vērtējumu. Pakešu zuduma ietekme uz video kvalitāti eksperimentāli pētīta trešajā apakšnodaļā. Nodaļas nobeigumā ir kopsavilkums un secinājumi.

4.1.Video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu pielietojuma novērtēšana

Atsaucoties uz literatūras pārskatu, skatīt 3. nodaļā, redzams, ka ir pieejamas vairākas video kvalitātes novērtēšanas metodes, daudz un dažādu video kvalitātes novērtēšanas skalu, atsevišķas metodes ir izmantojamas gan viena ekrāna, gan divu ekrānu eksperimentiem. Svarīgākais šajā eksperimentā bija noskaidrot respondenta viedokli. Minētais arī kalpoja kā galvenā motivācija pētījumiem, kā rezultātā izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentiem.

Eksperimenta mērķis:

1. Veikt salīdzinošus pētījumus par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, lai izvēlētos piemērotākās metodes darba eksperimentālajiem testiem:
 - 2.1.1. Noskaidrot, kura no metodēm ir vieglāk uztverama un saprotama;
 - 2.1.2. Salīdzināt viena ekrāna un divu ekrānu metodes;
 - 2.1.3. Salīdzināt 5, 9, 11 un 100 baļļu skalas.

Kā alternatīva kontrolētiem testgultnes apstākļiem šajā eksperimentā tika izvēlēti reālie sadzīves apstākļi (mājās uz dīvāna, darbā pie galda, kafējnīcā, parkā, autobusā, u.tml.), kur tehnisko parametru precīza fiksēšana nav iespējama un kvalitātes novērtēšanas eksperimentālos datus visbiežāk iegūst, izmantojot internetu (speciāli sagatavoti eksperimenti tīmeklī – tīmekļa mājas lapa), un to izplatīšanu sociālajos tīklos, piemēram, *researchgate.net*, *facebook.com*, *linkedin.com*, *twitter.com*, *draugiem.lv*, *vk.com*, *ok.ru*, u.tml. Šo paņēmieni mēdz dēvēt par *crowdsourcing*.

Tīmekļa mājas lapā bija iestrādāta specializēta 8 jautājumu anketa *skypromo.lv/iptv*. Anketas aizpildei nepieciešams dators ar interneta pieslēgumu un interneta pārlūkprogramma, un tās aizpildīšana aizņēma ne vairāk nekā 2-3 minūtes. Izmantojot šo 8 jautājumu testu bija jānoskaidro, kura no video kvalitātes testēšanas metodēm jāizvēlas. Testos tika izmantotas viena un divu ekrānu metodes, 5, 9, 11 un 100 baļļu skalas.

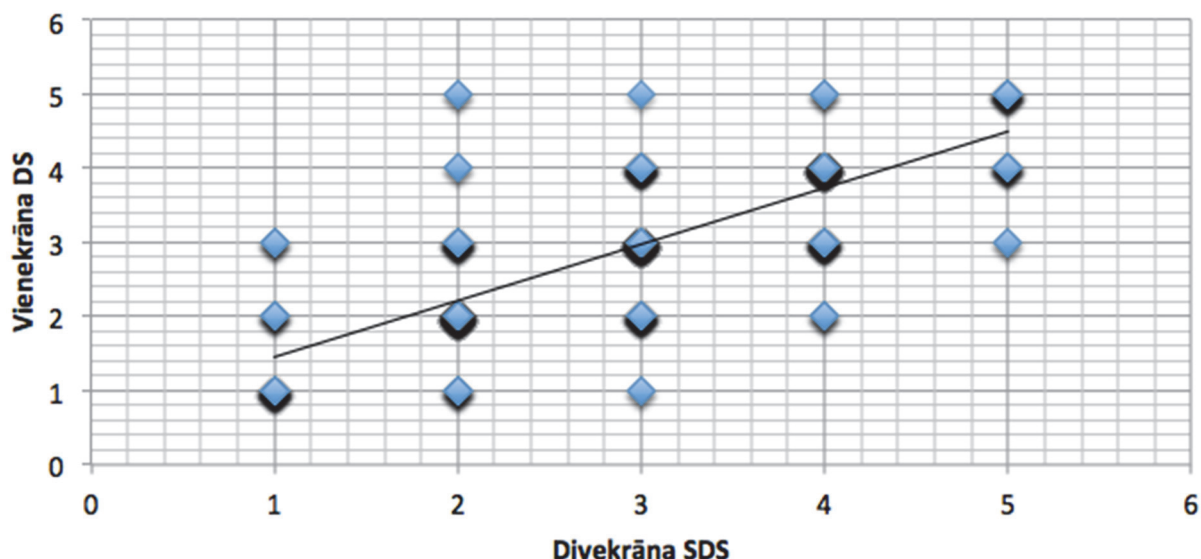
Eksperimentā piedalījās vairāk nekā 1300 respondenti, 1265 respondentu anketas tika atzītas par derīgām datu apkopošanai un statistiskai apstrādei. Eksperimenta izlase bija nejauša un pietiekoši reprezentatīva, jo ietvēra 738 sievietes un 527 vīriešus, vecumā no 11 līdz 85 gadiem.

Pētījuma rezultāti apkopoti rakstā [250] un galvenais secinājums ir, ka 5 baļļu skalu lielākais respondentu skaits uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu 4.1. tabulā, līdzīgs rezultāts ir iegūts arī citā pētījumā [152], kur *ACR* metode ar 5 un 11 baļļu skala ir atzīta par saprotamāko.

4.1. tabula

Novērtēšanas skalu izvēle	
Novērtēšana skala	Respondentu izvēle
5 baļļu skala	399
9 baļļu skala	97
11 baļļu skala	117
100 baļļu skala	280
5, 9, 11 vai 100	372
Kopā	1265

Salīdzinot viena un divu ekrānu metodes konstatēts, ka ir nebūtiskas statistiskas atšķirības starp viena ekrāna un divu ekrānu metodēm, kaut gan vairums (70 %) respondentu testēšanā vēlētos izmantot divu ekrānu metodi. 5 baļļu skalas gadījumā atšķirība starp *DS* un *SDS* metodēm ir statistiski nenoīmīga ($r = 0.78$), skatīt 4.1. attēlā.



4.1. att. Viena ekrāna un divu ekrāna metožu izvēle

Eksperimenta galvenie rezultāti:

- Video kvalitātes novērtēšanā viena ekrāna un divu ekrānu metodes dod statistiski līdzvērtīgus rezultātus ($r = 0.78$), bet, dodot izvēles iespēju, 70 % vērtētāju priekšroku dod divu ekrānu metodei.
- Ņemot vērā iegūtos rezultātus, turpmākiem eksperimentiem kodēšanas un video interfeisu parametru ietekmes novērtēšanai izmantota *PC* metode (*DS* un *SDS*), bet pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai izmantota *ACR – HR* metode.

4.2. Sintētisko video sižetu kvalitātes vērtējums atkarībā no kompresijas parametriem un interfeisa

Atsaucoties uz literatūras pārskatu, skatīt 1. nodaļā, redzams, ka praksē tiek izmantoti ļoti daudz un dažādi video interfeisi – analogie, ciparu, standarta vai augstas izšķirtspējas, kur katram no tiem ir savi specifiski video kompresijas parametri. Pētījumos līdz šim plaši izmantoti klasiskie videosižeti (daba, ziņas, sports u. tml.), taču praksē arvien vairāk sastopam datorgrafikā veidotos sintētiskos videosižetus. Tas arī kalpoja kā galvenā motivācija pētījumiem, kā rezultātā jānoskaidro video interfeisu kvalitātes rangs un būtiskākie video kompresijas parametri, kuri ietekmē video sižetu, tai skaitā sintētisko, kvalitātes vērtējumu.

Eksperimenta mērķis:

1. Veikt video kvalitātes salīdzināšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi dažādiem video signāliem un interfeisiem:
 - 1.1. Veikt video signālu un interfeisu kvalitātes novērtēšanu: komponentais ciparu (*YCbCr 1080i*), komponentais analogais (*YPbPr 720p*), kompozītais (*YIQ 576p*);
 - 1.2. Salīdzināt rezultātus un pārbaudīt, vai ir statistiski nozīmīgas atšķirības video kvalitātes novērtēšanā, izmantojot *PC* (viena ekrāna metode) un *SCJAC* (divu ekrānu metode);
 - 1.3. Veikt sintētisko video sižetu kvalitātes novērtēšanu 1080i un 576p video signāliem, izmantojot komponento *YCbCr* un kompozīto *YIQ* video interfeisu;
 - 1.4. Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.
2. Noskaidrot vai sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir atkarīgs no *SA* un *TA* parametru vērtībām.
3. Veikt video sižetu atlasu un novērtēšanu, kuri tiks izmantoti darba eksperimentos:
 - 3.1. Veikt video sižetu atlasu pēc satura (sintētiskie video sižeti);
 - 3.2. Veikt video sižetu atlasu pēc telpas (*SA*) un telpaika (*TA*) mērījumiem.

Vairums pētījumus video kvalitātes novērtēšanā izmanto standarta video sižetus (Daba, Ziņas, Sports. u.tml.), kuri atspoguļo mūsdienu televīzijas pārraides. Vairums gadījumos tās ir statiskas video ainas, lai gan mūsdienās strauji pieaug dinamiski video sižeti, galvenokārt specefekti ar sintētiskiem objektiem. Šādas datorgrafikas programmu radītās filmas ir piesātinātas ar dažādiem grafiskiem specefektiem, kuri nav sastopami reālajā dzīvē, tāpēc tie tiek saukti par sintētiskiem video sižetiem, piemēram, tādās filmās kā “*Avatar*”, “*The Lord of the Rings 3*”, kā arī video spēlēs.

Pētījumos par video kodēšanas un video interfeisu kvalitātes novērtēšanu [196] ir izmantota 3.1. attēlā parādītā slēguma shēma.

Video kvalitātes novērtēšanas testi tika veikti divās testa grupās: *DS* - Double stimulus (2 testi) un *SS* - Single stimulus (3 testi), kopā 58 video kvalitātes vērtējumi (*SS* testos 3x12 + *DS* testi 2x11). Kopējais testa laiks 60 minūtes.

Eksperimentā piedalījās vairāk nekā 30 respondenti, 25 respondentu anketas tika atzītas par derīgām. No 25 respondentiem 28% sievietes un 72% vīrieši, 90% 20-30 gadus veci un 10% 30-50 gadus veci. 28% ikdienā nesā brilles vai lēcas. 48% inženierzinātnes, 28% sociālās zinātnes un 24% humanitārās zinātnes pārstāvji.

Testos tika izmantotas *PC* un *SCJAC* metodes, 5 un 7 baļļu skalas.

Ietilpīga eksperimentāla pētījuma ietvaros, kura rezultāti ir atspoguļoti [195] un [196], ir veikta gan video interfeisu, gan arī video kodētāju kvalitātes novērtēšana.

Savstarpēji tiek salīdzināti trīs video interfeisi, kur *SS1* ir analogais komponentais signāls *YPbPr* ar 720p video, *SS2* ir ciparu *HDMI* signāls *YCbCr* ar 1080i video, bet *SS3* ir kompozītais signāls *YIQ* ar 576p video. Sintētisko un dabisko video sižetu *SA* un *TA* aprēķinus skatīt 3. un 4. nodaļā un to ekrānšāviņus skatīt 15. pielikumā un 16. pielikumā.

4.2. tabula

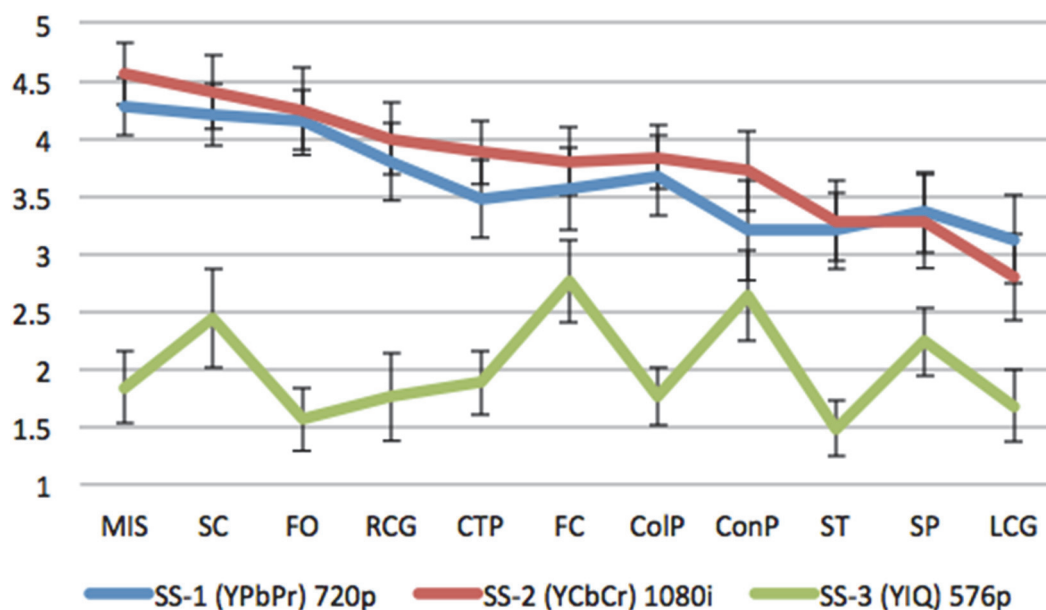
Video interfeisu salīdzinājums (vienekrāna)

Video sižeti	<i>SS1 (YPbPr) 720p</i>		<i>SS2 (YCbCr) 1080i</i>		<i>SS3 (YIQ) 576p</i>	
	<i>MOS</i>	<i>Std.</i>	<i>MOS</i>	<i>Std.</i>	<i>MOS</i>	<i>Std.</i>
<i>MIS</i>	4.28	0.25	4.56	0.27	1.84	0.31
<i>SC</i>	4.20	0.27	4.40	0.32	2.44	0.43
<i>FO</i>	4.16	0.26	4.24	0.38	1.56	0.27
<i>RCG</i>	3.80	0.34	4.00	0.32	1.76	0.38
<i>CTP</i>	3.48	0.34	3.88	0.27	1.88	0.27
<i>FC</i>	3.56	0.36	3.80	0.29	2.76	0.36
<i>ColP</i>	3.68	0.35	3.84	0.28	1.76	0.25
<i>ConP</i>	3.20	0.43	3.72	0.35	2.64	0.39
<i>ST</i>	3.20	0.34	3.28	0.35	1.48	0.24
<i>SP</i>	3.36	0.36	3.28	0.40	2.24	0.30
<i>LCG</i>	3.12	0.38	2.80	0.38	1.68	0.31

Kvalitātes novērtēšanas rezultāti attēloti 4.2. tabulā un 4.2. attēlā. Katram video interfeisam aprēķināts *MOS* (5 baļļu skala, *ACR*) un ticamības intervāli. Salīdzinot *SS1* un *SS2* rezultātus, var novērot ciešu sakarību ($r = 0.91$), bet *SS3* rezultāti būtiski atšķiras (par 1 līdz 2.5 ballēm zemāks salīdzinājumā ar *SS1* un *SS2*). Pamatojoties uz to, var secināt, ka vienekrāna metodes gadījumā kvalitātes novērtējuma atšķirības starp analogo *YPbPr 720p* un ciparu *YCbCr 1080i* video interfeisiem ir statistiski nenoīmīgas.

Video kvalitātes vērtējums ir atkarīgs no video sižeta, piemēram, *SS1* interfeisa gadījumā $MIS = 4.28$ un $LCG = 3.12$ vai *SS2* gadījumā $MIS = 4.56$ un $LCG = 2.80$. Video sižeta vērtējumu ietekmē telpaika aktivitāte *TA* (*Temporal Activity*) – jo lielāka *TA* vērtība, jo zemāks video sižeta kvalitātes vērtējums *MOS*. Savukārt telpas aktivitāte *SA* (*Spatial Activity*) vērtība

neietekmē sintētiskā video sižetu vērtējumu – nav novērotas kvalitātes vērtējuma atšķirības ne lielu, ne arī mazu *SA* vērtību gadījumos.



4.2. att. Vienekrāna MOS vērtības 720p, 1080i un 576p video signāliem

Pamatojoties uz iepriekš minēto, var secināt, ka starp 720p un 1080i kodējuma video ir statistiski nenozīmīgas kvalitātes atšķirības. 720p video pārraidei un uzglabāšanai nepieciešams par 10–15 % zemāks pārraides ātrums un apjoms, salīdzinot ar 1080i video. Resursu taupības nolūkos ieteicams izvēlēties 720p video. Nav novērotas arī būtiskas kvalitātes atšķirības starp analogo (*YPbPr 720p*) un ciparu (*YCbCr 1080i*) komponento video, bet ir novērotas būtiskas kvalitātes atšķirības, salīdzinot ar analogo kompozīto (*YIQ 576p*) video. Ieteicams izvēlēties analogo vai ciparu komponento video.

Var secināt, ka video kvalitātes ziņā nav būtiskas atšķirības starp analogo un ciparu interfeisu, ja tiek nodrošināta līdzīga izšķirtspēja (720p un 1080i), bet *YIQ 576p* interfeiss nenodrošina pietiekoši augstu video kvalitāti. Ar 720p un 1080i interfeisiem respondenti spēj pamanīt kvalitātes atšķirības dažādiem video sižetiem ar atšķirīgu *TA*, taču ar *YIQ 576p* interfeisu šīs atšķirības paliek nepamanītas. 720p un 1080i interfeisu gadījumā kustīgu objektu radītos kompresijas artefaktus ir vieglāk pamanīt salīdzinājumā ar 576p interfeisu. 576p interfeisa gadījumā šie artefakti ir grūtāk pamanāmi.

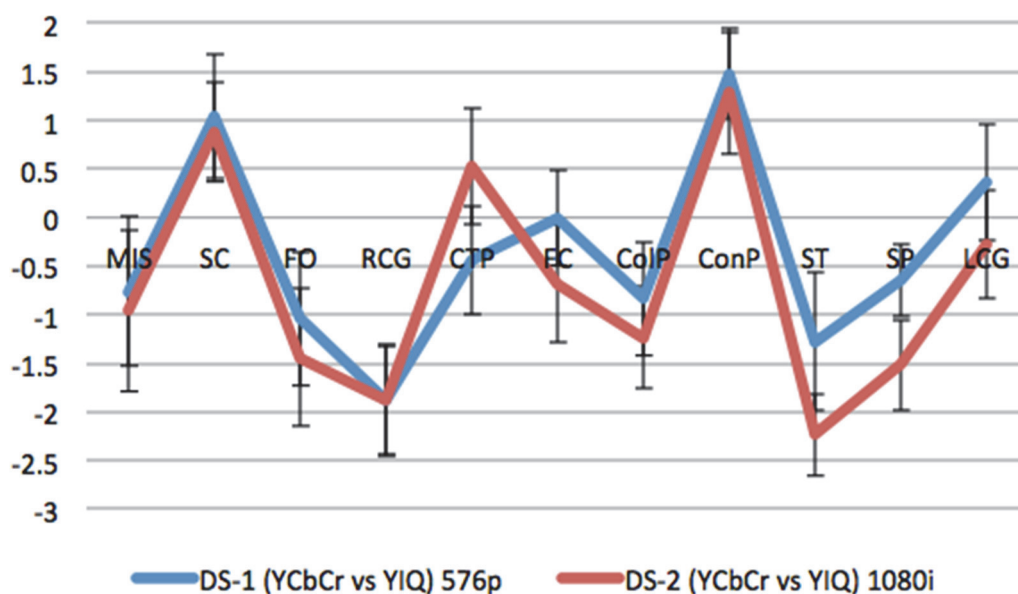
Vēl vienā eksperimentā tika salīdzināti video kvalitātes vērtējumi dažādiem interfeisiem, izmantojot divu ekrānu metodi. Šī metode, pēc iepriekšējā pētījuma rezultātiem, dod statistiski salīdzināamus rezultātus ar viena ekrāna metodi, taču respondenti divu ekrānu

metodi atzīst par pieņemamāku. Lai savstarpēji varētu salīdzināt divus dažādus video interfeisus specifikācijas, tad uz diviem ekrāniem vienlaicīgi savstarpēji tika salīdzināti divi video signāli, izmantojot vienu un to pašu ciparu video interfeisu, kur *DS1* ir *HDMI* signāls *YCbCr* ar 1080i video un *DS2* ir *HDMI* signāls *YCbCr* ar 576p video.

4.3. tabula

Video kodētāju salīdzinājums (diviekrānu)				
Video sižeti	DS1 (<i>YCbCr</i> vs <i>YIQ</i>) 576p		DS2 (<i>YCbCr</i> vs <i>YIQ</i>) 1080i	
	<i>MOS</i>	<i>Std.</i>	<i>MOS</i>	<i>Std.</i>
<i>MIS</i>	-0.76	0.77	-0.96	0.83
<i>SC</i>	1.04	0.64	0.88	0.51
<i>FO</i>	-1.04	0.69	-1.44	0.71
<i>RCG</i>	-1.88	0.58	-1.88	0.56
<i>CTP</i>	-0.44	0.56	0.52	0.60
<i>FC</i>	0.00	0.49	-0.68	0.60
<i>ColP</i>	-0.84	0.58	-1.24	0.52
<i>ConP</i>	1.48	0.46	1.28	0.63
<i>ST</i>	-1.28	0.71	-2.24	0.42
<i>SP</i>	-0.64	0.37	-1.52	0.46
<i>LCG</i>	0.36	0.59	-0.28	0.55

Kvalitātes novērtēšanas rezultāti attēloti 4.3. tabulā un 4.3. attēlā. Katram video interfeisam aprēķināts *MOS* (7 baļļu skala, *SCJAC*) un ticamības intervāli. Starp *DS1* un *DS2* var novērot ciešu korelāciju ($r = 0.89$). Tas nozīmē, ka ir novērotas statistiski nenoīmīgas atšķirības starp 576p un 1080i kodējuma video, kur abos gadījumos uz diviem neatkarīgiem ekrāniem tika izmantots viens un tas pats video interfeiss. *DS1* un *DS2* testos 4.3. tabulā un 4.3. attēlā ir novērojama tieši tāda pati video kvalitātes vērtējuma atkarība no video sižeta, kā *SS1*, *SS2* un *SS3* 4.2. tabulas un 4.2. attēla testos. Sintētisko video sižetu gadījumā ir novērojama negatīva logaritmiska atkarība no telpaika aktivitātes *TA* (*Temporal Activity*), piemēram, *DS2* pret $\lg(TA)$ $r = -0.85$. Sintētisko video *SA* un *TA* aprēķinus skatīt 3. un 4. nodaļā un to video sižetu ekrānšāviņus skatīt 15. pielikumā.



4.3. att. Divekrānu MOS vērtības 576p un 1080i video signāliem

Video sižetiem ar lielu telpaika aktivitāti *TA* video kvalitātes vērtējums 1080i video gadījumā bija zemāks nekā 576p video. Jo lielāka video sižeta *TA* un augstākas kvalitātes video (1080i) tiek izmantots, jo lielāka varbūtība ir novērot vizuāli redzamus bojājumus (*artefaktus*). Savukārt video sižetiem ar lielu telpisko aktivitāti *SA* video kvalitātes vērtējums 1080i video gadījumā bija augstāks nekā 576p video, skatīt 4.4. tabulu.

TA un *SA* aprēķinus skatīt 4.4. tabulā. Sintētiskie video izmantoti šajā [251] [252] pētījumā. Šajā pašā pētījumā sintētiskiem video sižetiem ir konstatēta negatīva logaritmiska atkarība no *TA* ($r = -0.85$).

4.4. tabula

Sintētisko video sižetu <i>SA</i> un <i>TA</i> vērtības			
Video	<i>SA</i>	<i>TA</i>	<i>T</i> (s)
<i>MIS</i>	64.92	8.23	47
<i>SC</i>	2.23	1.08	47
<i>FO</i>	27.27	7.31	73
<i>RCG</i>	3.43	23.71	47
<i>CTP</i>	31.05	2.77	37
<i>FC</i>	22.89	15.7	47
<i>ColP</i>	14.59	5.86	71
<i>ConP</i>	24.56	2.38	43

<i>ST</i>	52.04	46.16	79
<i>SP</i>	30.23	47.53	55
<i>LCG</i>	11.8	10.57	67

4.4. tabulas pirmajā kolonnā ir sintētisko video fragmentu nosaukumu saīsinājumi (*MIS*, *SC*, *FO*, *RCG*, *CTP*...), *TA* ir (*Temporal Activity*) aprēķinātā vērtība, *SA* ir (*Spatial Activity*) aprēķinātā vērtība un *T (s)* ir video fragmenta ilgums sekundēs. Sintētisko video ekrānšāviņus skatīt 15. pielikumā, bet standarta video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā.

Eksperimenta galvenie rezultāti:

1. Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telplaika (*TA*) parametru vērtības ($r = -0.85$).

4.3. Pakešu zuduma ietekmes uz video pārraides kvalitāti pētīšana

Atsaucoties uz literatūras pārskatu, skatīt 1. nodaļā, redzams, ka video kvalitātes samazināšanos pārraidot IP tīklos ietekmēt pakešu aiztures, trīce un pakešu zudums. Lielas pakešu aiztures un trīce rada pakešu zudumu, tāpēc eksperimentos izmantots pakešu zuduma rādītājs. Tas arī bija galvenais uzdevums pētījumiem – noskaidro kā pakešu zuduma apjoms un sadalījums ietekmē video kvalitātes vērtējumu.

Eksperimenta mērķis:

1. Veikt video sižetu atlasu un novērtēšanu, kuri tiks izmantoti darba eksperimentos:
 - 1.1. Veikt video sižetu atlasu pēc satura (daba, dzīvnieki, sports, ziņas, u.tml.);
 - 1.2. Veikt video sižetu atlasu pēc telpas (*SA*) un telplaika (*TA*) mērījumiem;
2. Veikt pakešu zuduma ietekmes uz video kvalitāti novērtēšanas eksperimentus un veikt iegūto rezultātu statistisko apstrādi:
 - 2.1. Mainīga ātruma video (*VBR*) plūsmai veikt pakešu atmešanu;
 - 2.1.1. Atmest 0.25%, 1%, 2% un 5% paketes no kopējā video sižeta apjoma;
 - 2.2. Pakešu atmešanai izmantot *Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu;
 - 2.3. Veikt oriģinālā un bojāto (kodēšanas vai pārraides rezultātā radušos bojājumu) video sižetu salīdzinājumu pēc *MSE* un *PSNR* mērījumiem;

- 2.4. Veikt video kvalitātes novērtēšanu, izmantojot *ACR – HR* (0.25% un 1% pakešu zudumam);
- 2.5. Veikt objektīvo video kvalitātes novērtēšanu pēc *MSE* un *PSNR* (0.25%, 1%, 2% un 5% pakešu zudumam);
- 2.6. Veikt bojāto video sižetu *GOP* kadru (*I* un *P* kadri) mērījumus;
- 2.7. Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus;
- 2.8. Noteikt vai ir sakarība starp video kvalitātes vērtējumu un tehnisko parametru degradāciju (pēc *MSE* un *PSNR*) pakešu zudumu dēļ.

Ir zināms, ka IP tīklos video straumēšanu ietekmē pakešu aiztures, trīce un zudums. Lielas pakešu aiztures un trīce rada pakešu zudumu, ko skatītājs ekrānā redz kā bojājumus (*artefaktus*), galarezultātā samazināsies video kvalitātes vērtējums (*MOS*). Vizuāli redzamu bojājumu veids un apjoms ir cieši saistīts ar video pakešu inkapsulācijas un kompresijas tehnoloģijām. Eksperimentāli tika noskaidrots, kā pakešu zuduma apjoms (0.25%, 1%, 2% un 5%) un zuduma sadalījums (*Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgais*) ietekmē video kvalitātes vērtējumu (*MOS*). Pētījuma un literatūras analīzes [107] rezultātā konstatēts, ka atsevišķos pētījumos 1% pakešu zuduma apjoms atbilst $MOS=2.5$, bet citos pētījumos pakešu zuduma apjoms bija pat desmit reizes lielāks vai mazāks. Iespējams, ka šīs milzīgās rezultātu atšķirības ir saistītas ar vāji definētiem eksperimenta nosacījumiem, kā arī bieži ir neskaidrs, kādi ir eksperimenta nosacījumi un kas tiek testēts, piemēram, pakešu zuduma ietekme, kļūdu labošanas algoritma veikspēja, buferizācijas veikspēja, u.tml.

Pētījumos par pakešu zuduma ietekmi uz video pārraides kvalitātes novērtēšanu [107] ir izmantota 3.2. attēlā parādītā slēguma shēma. Līdzīgi kā kodēšanas, tā arī pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas testos tiek izmantots *FR (Full Reference)* paņēmiens, kur pikseli pēc pikseļa (*pixel-by-pixel*) tiek salīdzināti oriģinālā (*original*) un uztvertā/bojātā (*impaired*) video attēli, veicot laikietilpīgas un apjomīgas skaitļošanas operācijas.

Kopējais testa laiks 45 minūtes.

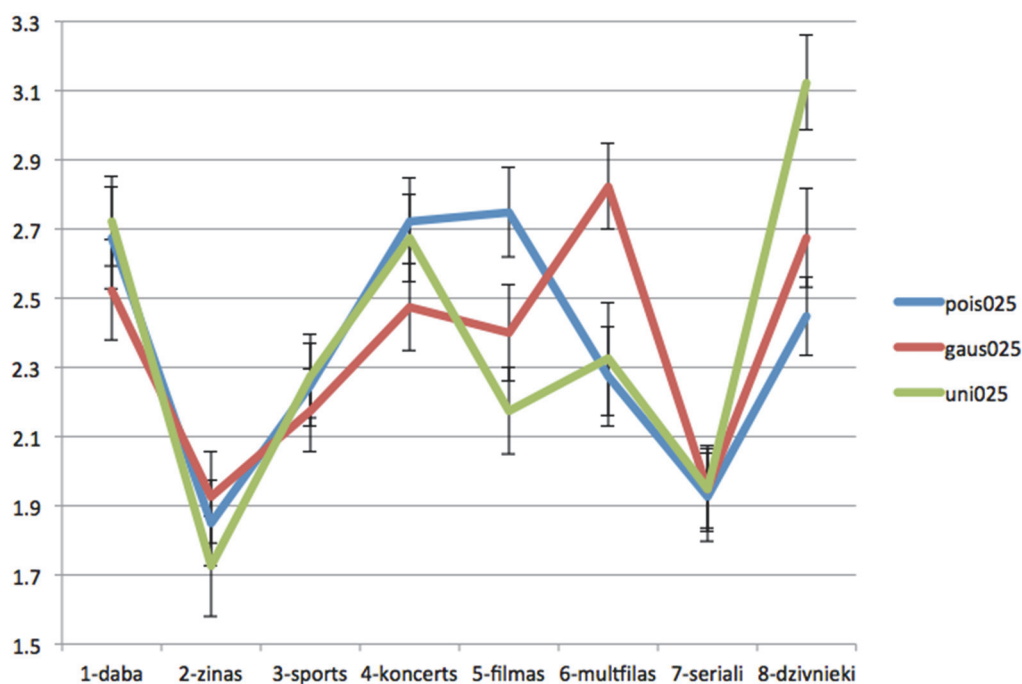
Eksperimentā piedalījās vairāk nekā 50 respondenti, 40 respondentu anketas tika atzītas par derīgām. 90% respondentu 20-25 gadus veci jaunieši.

Testos tika izmantota 5 baļļu skalas *ACR-HR* metode.

Minētais motivēja meklēt sakarības starp šiem dažādiem varbūtību sadalījumiem (*Puasona*, *Gauaa* un *vienmērīgais*), kuri tika izmantoti, aprakstot pakešu atmešanas statistiku.

Šajā pašā pētījumā ir meklētas un atrastas pakešu zuduma apjoma robežvērtību saistības ar *MOS* vai video kvalitātes novērtējumu.

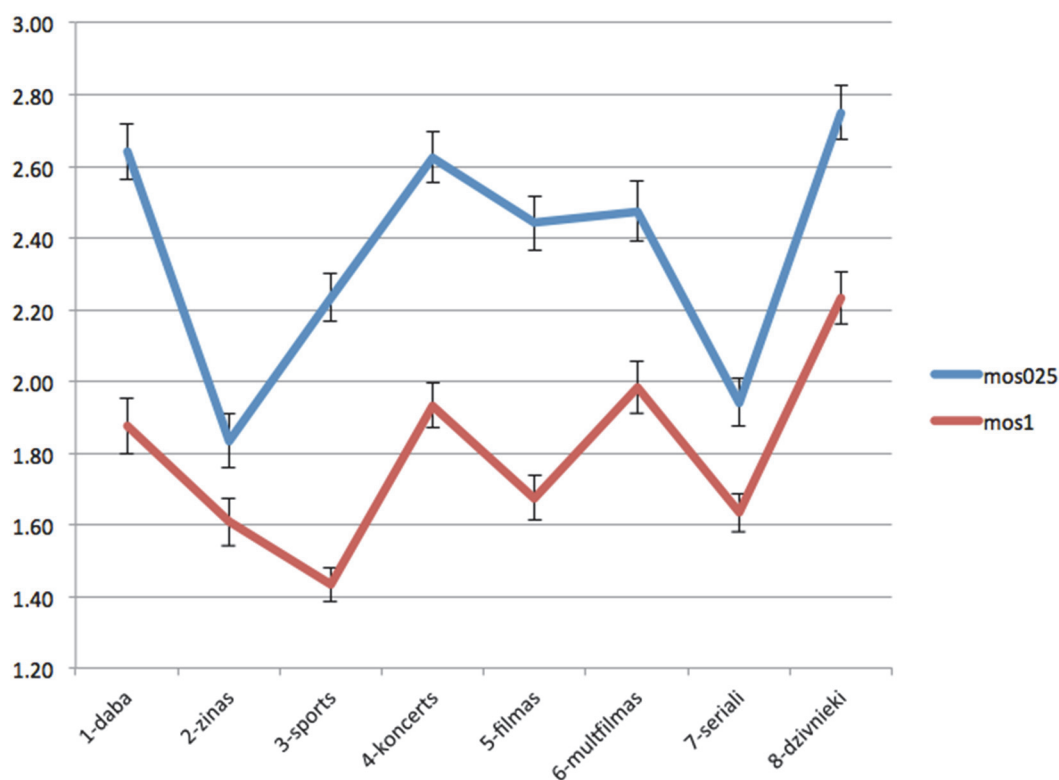
Pētījumā [107] par 0.25 % pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* nav novērota atšķirība starp *Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgo* sadalījumu, skatīt 4.4. attēlā, kuri tika izmantoti kā gadījuma sadalījumi, atmetot paketes. Testēšanā izmantoto video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā.



4.4. att. *MOS* vērtības *Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgam* sadalījumam

Pētījumā [107] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* nav novērota atšķirība starp *Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgo* sadalījumu, kuri tika izmantoti kā gadījuma sadalījumi, atmetot paketes.

Pētījumā [107] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* var novērot būtisku atšķirību starp 0.25 % un 1 % pakešu zudumu atkarībā no video sižetiem. Testēšanā izmantoto video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā.



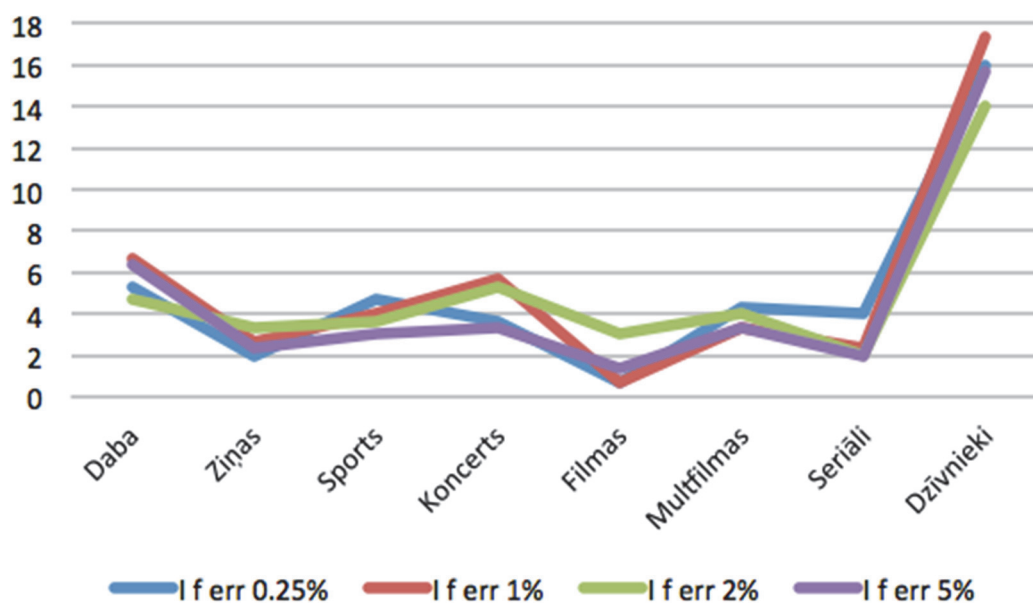
4.5. att. *MOS* vērtības 0.25% un 1% pakešu zudumam

Pētījumā [107] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* ir konstatēta visai vāja saistība ar *PSNR* ($r = 0.28 - 0.60$), skatīt 4.5. tabulā un 4.6. tabulā. Līdzīgi arī *I* un *P* kadru bojājumu skaitam ir visai vāja saistība ar *MOS* un *PSNR*, skatīt 4.5. tabulā. Testēšanā izmantoto video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā.

4.5. tabula

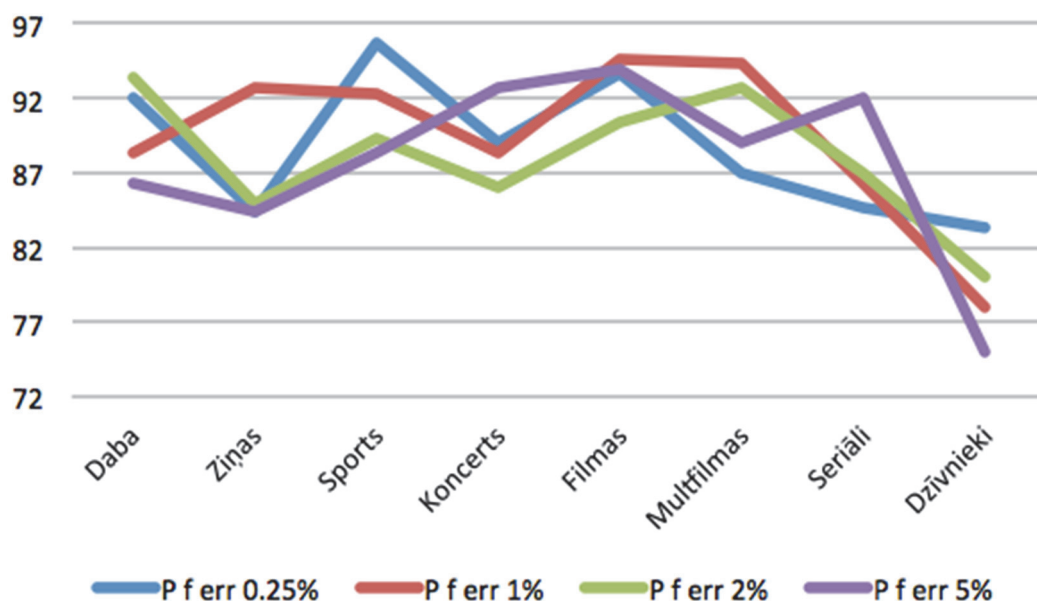
<i>MOS</i> salīdzinot ar <i>PSNR</i> un <i>I, P</i> kadru bojājumu statistiku				
Sižeti	<i>MOS</i>	<i>PSNR (dB)</i>	<i>I kadri</i>	<i>P kadri</i>
Daba	2.64	25.28	5,33	92
Ziņas	1.83	27.55	2	84,33
Sports	2.23	25.28	4,66	95,66
Koncerts	2.63	26.52	3,66	89
Filmas	2.44	27.68	0,66	93,66
Multifilmas	2.48	30.05	4,33	87
Seriāli	1.94	25.60	4	84,66
Dzīvnieki	2.75	29.22	16	83,33

Eksperimentu rezultātā netika atrasta vērā ņemama saistība starp *PSNR* un *I*, *P* kadru bojājumiem (0.25 % pakešu bojājumu gadījumā 0.33 un -0.48, bet 1 % gadījumā 0.50 un -0.28). Netika atrasta arī saistība starp *MOS* un *I*, *P* kadru bojājumiem (0.25 % pakešu bojājumu gadījumā 0.2 un 0.51, bet 1 % gadījumā 0.75 un -0.61), skatīt 4.5. tabulā.



4.6. att. *I* kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta

Pētījumu rezultātā tika identificēta negatīva korelācija ($r = -0.72$) starp *I* un *P* kadru bojājumu skaita izmaiņām atkarībā no pakešu zuduma lieluma un video sižetiem, skatīt 4.6. attēlā un 4.7. attēlā. Visiem video sižetiem kopā pie viena un tā paša pakešu zuduma lieluma var novērot ciešu saistību starp *I* un *P* kadru bojājumiem (0.25 % gadījumā -0.42, 1 % atbilst -0.88, 2 % atbilst -0.67 un 5 % atbilst -0.88). Jo lielāks *P* kadru bojājums, jo mazāks *I* kadru bojājums un otrādi, ko arī apliecina šī negatīvā korelācija ($r = -0.72$). Līdzīgu sakarību var atrast katram individuālam video sižetam pie visiem pakešu zuduma lielumiem (Daba = -0.91, Koncerts = -0.78, Filmas = -0.95, Multfilmas = -0.49, Seriāli = -0.67) ar atsevišķiem izņēmumiem, piemēram, Ziņas = 0.17 un Dzīvnieki = -0.13), bet sevišķi izceļot Sports, kur var novērot ļoti ciešu pozitīvu korelāciju ($r = 0.96$).



4.7. att. P kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta

Pakešu zuduma rezultātā tiek bojāti I un P kadri, kur bojājumu skaits ir savstarpēji saistīts ar apgrieztu proporcionālu sakarību – jo lielāks P kadru bojājumu skaits, jo mazāks I kadru bojājumu skaits, un otrādi, ko arī apliecina negatīva korelācija ($r = -0.72$). MOS ir tikai daļēji atkarīgs no I un P kadru bojājumu skaita, drīzāk daudz vairāk atkarīgs no bojājuma apjoma katrā konkrētā I un P kadrā, kā arī no bojāto I un P kadru attēlošanas vietas skatītājam ekrānā. Savukārt bojājumu atrašanās vieta televīzijas ekrānā ir atkarīga no video sižeta un tā kodēšanas struktūras GOP (I, P, B kadri). Kustības vektoru vai kustību izmaiņu attēlošana video sižetā ir atkarīga tieši no P kadriem. Pakešu zuduma rezultātā radītie P kadru bojājumi skatītājam ekrānā tiek attēloti kā vizuāli redzami artefakti tieši tajās video sižeta vietās, kurās notiek kustība, līdz ar to skatītājs tam pievērš pastiprinātu uzmanību. Savukārt video sižeta apgabalos ar statiskām ainām I un P kadra bojājumus ir grūtāk pamanīt, jo skatītājs tiem pievērš mazāku uzmanību.

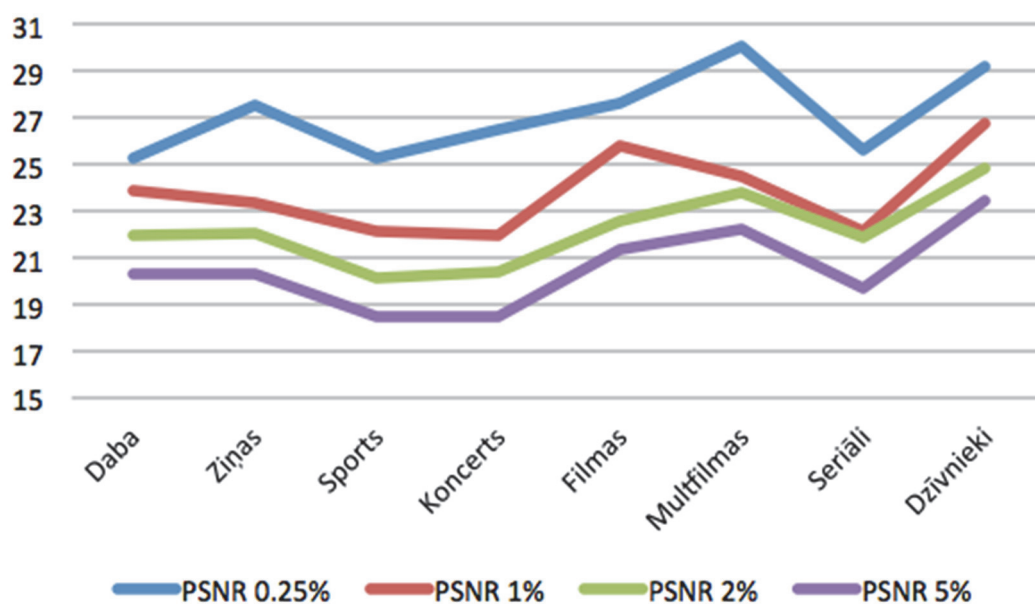
Pētījumā [107] par pakešu zuduma ietekmi uz MOS ir konstatēta visai vāja saistība ar $PSNR$ ($r = 0.28 - 0.60$), skatīt 4.6. tabulā. Testēšanā izmanto video sižetu ekrānšāviņus – skatīt 16. pielikumā.

4.6. tabula

MOS (0.25% un 1% pakešu zudumam) salīdzinot ar *MSE* un *PSNR*

Sīžeti	<i>MSE</i>		<i>PSNR (dB)</i>		<i>MOS</i>	
	0.25%	1%	0.25%	1%	0.25%	1%
Daba	222.5	261.6	25.28	23.88	2.64	1.88
Ziņas	133.5	263.8	27.55	23.39	1.83	1.61
Sports	205.4	447.5	25.28	22.12	2.23	1.43
Koncerts	161.7	464.4	26.52	21.96	2.63	1.93
Filmas	130.8	188.4	27.68	25.81	2.44	1.68
Multifilmas	94.9	223.8	30.05	24.50	2.48	1.98
Seriāli	177.5	496.1	25.60	22.17	1.94	1.63
Dzīvnieki	72.9	141.2	29.22	26.80	2.75	2.23

Kaut arī *PSNR* visai vāji korelē ar *MOS* (0.25 % $r = 0.28$ un 1 % $r = 0.60$ pakešu zudumam), tomēr tas var kalpot kā vispārējs bojājuma apjoma novērtēšanas rādītājs. *PSNR* aprēķinus 0.25 %, 1 %, 2 % un 5 % pakešu zudumam atbilstoši 4.8. attēlam.

4.8. att. *PSNR* atkarībā no video sīžeta

TA un *SA* aprēķinus skatīt

4.7. tabulā. Standarta televīzijas pārraižu video izmantoti šajā [107] pētījumā.

4.7. tabula

Standarta video sižetu *SA* un *TA* vērtības

Video	<i>SA</i>	<i>TA</i>	<i>T (s)</i>
Daba	43.71	7.09	45
Ziņas	40.59	7.28	13
Sports	42.21	16.82	35
Koncerts	41.13	15.24	25
Filmas	36.09	9.88	34
Multfilmas	37.09	7.25	35
Seriāli	34.55	9.15	23
Dzīvnieki	41.59	8.16	46

4.7. tabulas pirmajā kolonnā ir standarta video fragmentu nosaukumi (Daba, Ziņas, Sports, Koncerts, ...), *TA* ir (*Temporal Activity*) aprēķinātā vērtība, *SA* ir (*Spatial Activity*) aprēķinātā vērtība un *T (s)* ir video fragmenta ilgums sekundēs. Standarta video sižetu ekrānšāviņus skatīt 16. pielikumā.

Eksperimenta galvenie rezultāti:

1. Emulējot pakešu zudumus ar *Puasona*, *Gausa* vai *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu, video kvalitātes novērtējumiem *MOS* atšķirības nav statistiski nozīmīgas.
2. Video straumēšanā pakešu zudumi nedrīkst pārsniegt 0.25 %, jo tas atbilst video kvalitātes vērtējuma $MOS = 2.4$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par kvalitātes akceptēšanas robežvērtību.

4.4. Kopsavilkums un secinājumi

Ceturtnā nodaļa ir veltīta darba eksperimentu aprakstam. Pirmā apakšnodaļa veltīta dažādu video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu pielietojuma novērtēšanas eksperimenta aprakstam. Otrā apakšnodaļa veltīta dažādu video kompresijas un interfeisu ietekmes kvalitātes novērtēšanas eksperimenta aprakstam. Trešā apakšnodaļa veltīta video pārraides pakešu zuduma ietekmes kvalitātes novērtēšanas eksperimenta aprakstam.

Darba nodaļas rezultāti un secinājumi:

- Ir veikts video kvalitātes novērtēšanas metožu salīdzinājums, analīze un eksperimenti, kā rezultātā izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem;
 - Video kvalitātes novērtēšanā viena ekrāna un divu ekrānu metodes dod statistiski līdzvērtīgus rezultātus ($r = 0.78$), bet, dodot izvēles iespēju, 70 % vērtētāju priekšroku dod divu ekrānu metodei;
 - Ir konstatēts, ka no 1265 respondentu aptaujas 5 ballu skalu 399 respondenti uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu, 9 ballu skalu – 97, 11 ballu skalu – 117, 100 ballu skalu – 280, bet 372 respondenti ir atzinuši jebkuru skalu par vienlīdz saprotamu un pieņemamu.
- Ir veikti dažādu video signālu un interfeisu video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti un statistisko datu apstrāde:
 - Starp augstas izšķirtspējas komponento ciparu video (*YCbCr 1080i*) un komponento analogo video (*YPbPr 720p*) ir statistiski nebūtiskas atšķirības ($r = 0.91$), bet kompozītā analogā video (*YIQ 576p*) rezultāti būtiski atšķiras (par 1 līdz 2.5 MOS ballēm zemāks salīdzinājumā ar *YCbCr* un *YPbPr*);
 - Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telpaika (*TA*) parametru vērtības ($r = -0.85$);
 - Starp 576p un 1080i kodējuma video, kur abos gadījumos uz diviem neatkarīgiem ekrāniem tika izmantots viens un tas pats video interfeiss, ir novērotas statistiski nenoīmīgas atšķirības ($r = 0.89$).
- Ir veikti pakešu zuduma ietekmes video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti un statistisko datu apstrāde;
 - Emulējot pakešu zudumus ar *Puasona*, *Gausa* vai *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu, video kvalitātes novērtējumiem *MOS* atšķirības nav statistiski noīmīgas;
 - Video straumēšanā pakešu zudumi nedrīkst pārsniegt 0.25 %, jo tas atbilst video kvalitātes vērtējuma $MOS = 2.4$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par kvalitātes akceptēšanas robežvērtību;
 - Kaut arī *PSNR* vāji korelē ar *MOS* (0.25 % $r = 0.28$ un 1 % $r = 0.60$ pakešu zudumam), tomēr tas var kalpot kā vispārējs bojājuma apjoma novērtēšanas rādītājs.
 - Nav atrasta vērā ņemama saistība starp *PSNR* un *I*, *P* kadru bojājumiem, kā arī nav atrasta saistība starp *MOS* un *I*, *P* kadru bojājumiem;

- Kaut arī *PSNR* visai vāji korelē ar *MOS*, tomēr tas var kalpot kā kompresijas un pakešu zuduma līmeņa vispārējs bojājuma apjoma novērtēšanas rādītājs.
- Ir veikta video sižetu, kuri izmantoti darba eksperimentos atlase un novērtēšana;
 - Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telpaika aktivitāte (*TA*), jo lielāka *TA* vērtība, jo zemāks video sižeta kvalitātes vērtējums *MOS*;
 - Jo lielāka video sižeta *TA* un augstākas kvalitātes video tiek izmantots (1080i pret 576p), jo lielāka varbūtība ir novērot vizuāli redzamus bojājumus (artefaktus);
 - Sintētiskiem video sižetiem ar lielu telpisko aktivitāti (*SA*) video kvalitātes vērtējums 1080i video gadījumā bija augstāks nekā 576p video;
 - Jo lielāks pakešu zudums, jo zemāka *PSNR* vērtība. Jo augstāka kompresijas pakāpe, jo zemāka *PSNR* vērtība;
 - Video kvalitātes vērtējums ir atkarīgs no video sižeta, jo pakešu zuduma vai pārmērīgas kompresijas rezultātā radītie bojājumi ekrānā tiek attēloti, kā vizuāli redzami artefakti, tieši tajās video sižeta vietās, kurās notiek kustība, līdz ar to skatītājs tam pievērš pastiprinātu uzmanību. Savukārt video sižeta apgabalos ar statiskām ainām bojājumi ir mazāk pamanāmi, jo skatītājs tiem pievērš mazāku uzmanību.

Pamatojoties uz eksperimentālajiem testiem, var secināt, ka starp 720p un 1080i kodējuma video ir statistiski nenozīmīgas kvalitātes atšķirības. 720p video pārraidei un uzglabāšanai nepieciešams par 10 – 15 % zemāks pārraides ātrums un apjoms, salīdzinot ar 1080i video. Resursu taupības nolūkos ieteicams izvēlēties 720p video. Nav novērotas arī būtiskas kvalitātes atšķirības starp anlogo (*YPbPr 720p*) un ciparu (*YCbCr 1080i*) komponento video, bet ir novērotas būtiskas kvalitātes atšķirības, salīdzinot ar analogo kompozīto (*YIQ 576p*) video. Ieteicams izvēlēties analogo vai ciparu komponento video.

Pakešu zuduma, aiztures un trīces statistikai izmanto dažādus sadalījuma procesus. Maza pakešu zuduma ($\leq 1\%$) gadījumos, ko var uzskatīt par retu notikumu bez atmiņas, jo pakešu zudums nav atkarīgs no iepriekš zaudētās paketes, izmanto *Puasona* sadalījumu. Ja varam pieņemt, ka pakešu zudumu ietekmē daudzi neatkarīgi procesi, tad pakešu zuduma statistikai var izmantot normālo vai *Gausa* sadalījumu. Savukārt diskrēts *vienmērīgais* sadalījums ir tipisks izlases gadījumskaitļa ģenerators, kuru arī mēdz lietot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku.

Konstatēts, ka interneta un *VBR* video datu plūsmai ir pašlīdzīgs raksturs neatkarīgi no video materiāla satura (video konference, video zvans, filma, multfilma, sporta pārraides, u.tml.).

Minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, kāpēc darba eksperimentos ir izmantota tieši *VBR* video datu plūsma, nevis *CBR*.

Lai arī *Puasona*, *normālo* un *vienmērīgo* sadalījuma procesu ir paredzēts izmantot pie dažādiem nosacījumiem, tomēr jebkuru no viņiem var izmantot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku, jo nav novērotas būtiskas atšķirības starp šiem sadalījuma procesiem.

Pakešu zudums ($\geq 0.25\%$), iespējams, ir izmantojams video straumēšanā. IP pakešu 0.25% zudums atbilst vidējam kvalitātes vērtējumam $MOS = 2.37$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par pakalpojuma līmeņa akceptēšanas (*acceptance* vai *acceptability*) robežvērtību. $MOS = 2.5$ tiek uzskatīta kā viendimensionāla vispārējās kvalitātes novērtējuma robežvērtība, kuru gan nevar uzskatīt par vienīgo un patieso mērījumu pakalpojuma līmeņa akceptēšanas robežvērtības noteikšanai.

Kaut arī video kvalitātes vērtējums (MOS) vāji korelē ar objektīvo video kvalitātes vērtējumu ($PSNR$ un $lgMSE$) pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai ($r = 0.28 - 0.60$), tomēr liela pakešu zuduma ($\geq 1\%$) gadījumos $PSNR$ un $lgMSE$ var izmantot MOS prognozēšanā.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir konstatētas vairākas video attēla kvalitātes subjektīvo un objektīvo parametru sakarības, izstrādāta un aprobēta video kvalitātes novērtēšanas metodika, izstrādātas rekomendācijas video kvalitātes metožu uzlabošanai, kā arī izveidota testgultne video kodēšanas un video pārraides sistēmas elementu kvalitātes, traucējumnoturības un veiktspējas testēšanai un pētīšanai. Metodika un testgultne bija svarīgākais priekšnosacījums darba eksperimentālo pētījumu izpildei.

Darba mērķis ir sasniegts un uzdevumi izpildīti, ko arī apliecina sasniegtie rezultāti:

- Ir veikts literatūras pārskats par cilvēka vizuālās uztveres galvenajiem elementiem un to parametriem – ir noskaidroti svarīgākie cilvēka vizuālās uztveres parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;
 - Cilvēka vizuālās uztveres jūtība pret gaismu, kontrastu un krāsām;
 - Cilvēka vizuālās uztveres testi – *Ishihara*, *Snellen* un *Pelli-Robson*.

Cilvēka redze ir jūtīgāka pret spilgtuma un kontrasta izmaiņām, un mazāk jūtīga pret krāsu gradācijām, tāpēc viens no svarīgākajiem faktoriem ir eksperimentos lietoto monitoru kalibrēšana, spilgtuma līmeņa *AWB* (*Automatic White Balance*) un krāsu temperatūras mērījumi un noskaņošana.

Lai vienkāršotā veidā varētu objektīvi pārbaudīt respondentu vizuālās uztveres atbilstību vispārpieņemtām normām, tika izmantoti trīs speciāli cilvēka vizuālās uztveres pārbaudes testi – redzes asuma pārbaudēm izmantoja *Snellen* metodi, krāsu redzes pārbaudēm izmantoja *Ishihara* metodi, bet kontrasta jūtības pārbaudei izmantoja *Pelli-Robson* metodi.

- Ir veikts literatūras pārskats par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri ietekmē video kvalitātes novērtējumu. Noskaidroti svarīgākie video signāla interfeisa un pārraides parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu;
 - Video interfeisi (analogie, ciparu, *YIQ*, *YPbPr*, *YCbCr*), video signāla kodētāju parametru konvertācijas;
 - Video pārraides parametri: pakešu zudums, aizture un trīce.
- Ir veikts literatūras pārskats par video signālu pārraides un kompresijas tehnoloģiju darbības principiem, galvenajiem elementiem un to parametriem, kuri var ietekmēt video kvalitātes novērtējumu. Noskaidroti svarīgākie video signāla kompresijas parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu:

- Video signāla kompresijas parametri: 576p un 1080i video signāla kodētāju parametru konvertācijas;
- Video signāla kompresijas parametri: 720p un 1080i video signāla kodētāju parametru konvertācijas.

Augstāk minētais arī motivēja veikt eksperimentus par video kodēšanas, t.sk. video interfeisu un video signālu kompresijas parametru ietekmi uz kvalitāti, un video pārraides, t.sk. video pārraides zudumu ietekmi uz kvalitāti.

Pārraides sistēmās rodas pakešu aizture un trīce, kuru līdz zināmai robežai var kompensēt ar buferatmiņu. Savukārt sakaru kanāla pārrāvumi, kā arī buferatmiņas pārpildes un neaizpildes radīs pakešu zudumu. Trīce un aizture, kuru nevar kompensēt ar buferatmiņu, radīs pakešu zudumu. Iepriekš minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, ka darba eksperimentos ir veikti tieši pakešu zudumu, nevis pakešu aiztures un trīces ietekmes pārbaudes testi.

Puasona, normālo un vienmērīgo sadalījuma procesu ir paredzēts izmantot pie dažādiem nosacījumiem, tomēr jebkuru no viņiem var izmantot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku, Minētais arī motivēja darba eksperimentos pārbaudīti visus sadalījuma procesus, kuri bija izmantoti emulējot pakešu zuduma statistiku.

Video signālu kompresijas mērķis ir pie nemainīga video kvalitātes novērtējuma nodrošināt pēc iespējas efektīvāku kompresiju, piemēram, *H264 AVC P10*, salīdzinot ar *MPEG – 2 P2*, nodrošina līdz pat 50 % efektīvāku kompresiju. Līdzīga sakarība ir atrodama, *H265 HEVC* salīdzinot ar *H264 AVC P10*. Jo augstākas pakāpes kompresija, jo sarežģītāki dekodēšanas algoritmi un lielāka skaitļošanas jauda ir nepieciešama. Video kodētāju kompresijas efektivitāti var palielināt, ņemot vērā cilvēka vizuālās uztveres īpatnības un video sižeta uzbūves principus. Tāpēc video kvalitātes novērtējums vai *MOS* ir atkarīgs no video sižeta, izvēlēta kodētāja un kodēšanas parametriem. Jo augstāka kompresijas pakāpe, jo lielāka varbūtība novērot video bojājumus vai artefaktus, sevišķi pamanāmi tajos video sižeta apgabalos, kuros notiek kustība. Līdzīgu sakarību varēja novērot pakešu zuduma gadījumā, tomēr bojājumu vai vizuāli redzamu artefaktu forma bija būtiski atšķirīga. Pārraides tīkla pārslodzes un maršruta izmaiņas rada pakešu trīci, kuru var kompensēt ar bufera atmiņu. Savukārt sakaru kanāla pārrāvumi vai bufera atmiņas pārpildes radīs pakešu zudumu. Pakešu zudums ietekmē jebkuru tīkla trafiku, bet pakešu trīce var būtiski ietekmēt reālā laika datu plūsmu pakalpojumus, piemēram, *VoD (Video on Demand)* unirades video piegādes pakalpojumus, kuros tiek izmantotas *PVR (Personal Video Recorder)* tipa vadības komandas (ierakstīt, dzēst, atskaņot, pauze, paātrināta atskaņošana uz priekšu un atpakaļ), jo katru komandu izpilda lietotājs un gaida uz to nekavējošu reakciju. Liela pakešu aiztures vidējā vērtība un liela trīce tiešā veidā video attēla kvalitāti

neietekmē, kamēr tās ir iespējams kompensēt ar bufera atmiņu. Savukārt reālā laika interaktīviem pakalpojumiem pakešu aiztures vidējā vērtība un liela trīce var būtiski ietekmēt kopējo pakalpojuma kvalitātes novērtējumu, kaut arī tiešā veidā tas neietekmē un nav saistīts ar video attēla kvalitāti. Pakešu zuduma rezultātā var parādīties būtiskas video kvalitātes novērtēšanas atšķirības starp dažādiem inkapsulācijas paņēmieniem un straumēšanas protokoliem, kā arī *MPEG* kodētāja *I*, *P* un *B* kadru datu sadalījumu starp šīm paketēm. Vienas *IP MPEG* paketes zudums ir vienāds ar septiņu *DVB MPEG* pakešu zudumu. Teorētiski, zaudējot *I* vai *P* kadrus, rezultātā jābūt lielākam video kvalitātes kritumam, nekā zaudējot *B* kadrus, bet reālās pārraides sistēmās pilns *I* vai *P* kadru zudums ir liels retums, jo katrs no šiem kadriem ir sadalīts daudzās neatkarīgās *IP* paketēs. Pārraides laikā tiek zaudētas paketes, kas ir daļa no viena vai vairākiem *I* un *P* kadriem. Tāpēc *MOS* ir tikai daļēji atkarīgs no *I* un *P* kadru bojājumu skaita, drīzāk daudz vairāk ir atkarīgs no bojājuma apjoma katrā konkrētā *I* un *P* kadrā, kā arī no bojāto *I* un *P* kadru attēlošanas vietas televīzijā ekrānā. Savukārt bojājumu atrašanās vieta uz televīzijā ekrāna ir atkarīga no video sižeta un tā kodēšanas struktūras *GOP* (*I*, *P*, *B* kadri). Kustības vektoru vai kustību izmaiņu attēlošana video sižetā ir atkarīga tieši no *P* kadriem. Pakešu zuduma rezultātā radītie *P* kadru bojājumi televīzijā ekrānā tiek attēloti skatītājam kā vizuāli redzami artefakti tieši tajās video sižeta vietās, kurās notiek kustība, līdz ar to skatītājs tam pievērš pastiprinātu uzmanību. Savukārt video sižeta apgabalos ar statiskām ainām *I* un *P* kadra bojājumus ir grūtāk pamanīt, jo skatītājs tiem pievērš mazāku uzmanību.

- Ir veikts literatūras pārskats par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem:
 - Ir izstrādātas rekomendācijas video kvalitātes novērtēšanas metožu izvēlei. Rekomendējamie metodes izvēles kritēriji: kas jānovērtē – kodēšanas vai pārraides procesu ietekme uz kvalitāti –, kā jānovērtē – vispārējā kvalitāte vai bojājumu ietekmes kvalitāte –, kura no metodēm respondentiem ir vieglāk uztverama un saprotama, kā arī kura no metodēm ir ātrāka, kura precīzāka.
 - Ir izstrādātas vadlīnijas video kvalitātes metožu uzlabošanai, kur vienlaicīgi tiek izmantota gan marķēta, gan nemarķēta kvalitātes novērtēšanas skala, tādējādi iegūstot datus par novērtējamā video fragmenta vispārējo un akceptēšanas kvalitāti. Izstrādātā metode dod iespēju iegūt divdimensionāla *MOS* kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.

- Konstatēts, ka *ITU – T* [33] rekomendācijā ir neskaidri un vispārināti definētas dažādu video parametru un ar tiem saistīto koeficientu robežvērtības, piemēram, pakešu zudumam ir jābūt mazākam par 10 %. Turpretī autora eksperimentālo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka pakešu zudums virs 1 % ir nepieņemami liels $MOS = 1.4 - 2.2$.
- Konstatēts, ka *ITU – T* [33] un [32] rekomendācijās, lai novērtētu kvalitāti, ir radīti ļoti daudz kvalitātes novērtēšanas parametri un ar tiem saistīti koeficienti. Praktiski realizēt šādu kvalitātes novērtējuma modeli ir ļoti sarežģīti un laikietilpīgi, varētu pat teikt, ka praksē ieviest praktiski neiespējami. Parametru skaits ir būtiski jāsamazina, un koeficientu robežvērtībām ir jābūt precīzi definētām, kuras eksperimentāli ir aprobētas ar video kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem.

Primāri video kvalitātes novērtēšanas metodes izvēlē ir jāvadās pēc tā, kas ir jānovērtē – kompresijas vai pārraides procesu ietekme uz kvalitāti –, kā jānovērtē – vispārējā kvalitāte vai bojājumu (degradācijas) ietekmes kvalitāte. Sekundāri, bet ne mazsvarīgi, ir jāņem vērā, kura no metodēm respondentiem ir vieglāk uztverama un saprotama, kura ātrāka, kura precīzāka.

ACR un *ACR – HR* var uzskatīt par populārākām vispārējās kvalitātes novērtēšanas metodēm, kuru parasti izmanto video signālu pārraides ietekmes novērtēšanai. *ACR* un *ACR – HR* ir ieteicams izmantot pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai. Savukārt *DCR* ir zināma kā ienesto bojājumu vai degradācijas apmēra novērtēšanas metode, kuru var izmantot gan kompresijas, gan pārraides ietekmes novērtēšanai. Savukārt *PC* un *SCJAC* ir vispārējās kvalitātes novērtēšanas metodes, kuras ieteicams izmantot video kompresijas ietekmes novērtēšanai. Dažādu kompresijas parametru noskaņošanai, kur nepieciešama ļoti augsta precizitāte, ir ieteicams izmantot *PC* vai *SCJAC* metodes.

Praksē ir pieejami dažādi paņēmieni video attēla kvalitātes novērtēšanai, piemēram, *FR* (*Full Reference*), *RR* (*Reduced Reference*), *NR* vai *ZR* (*No Reference* vai *Zero Reference*). *FR* ir populārs un nosacīti vienkāršs paņemiens subjektīvās un objektīvās video attēla kvalitātes novērtēšanai. Savukārt salīdzinoši niecīgas pētniecības aktivitātes ir veltītas *RR* un *NR/ZR* paņēmieniem, ko arī apliecina šajā pētījumā [233] veiktais pārskats. Šī promocijas darba eksperimentos ir izmantotas *FR* subjektīvās un objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodes.

Cilvēka īstermiņa atmiņas ilgums svārstās no 15 sekundēm līdz 30 sekundēm, bet atmiņas apjoms ir ierobežots ar 7 ± 2 elementiem. Tāpēc attēla kvalitātes testēšanā izmantotā video fragmenta ilgumam nevajadzētu būt garākam par 30 sekundēm, kā arī sižetā redzamo bojājumu skaitam nevajadzētu būt lielākam par 9.

Par vispārējās video kvalitātes vai ienesto bojājumu novērtējuma rādītāju parasti izmanto *MOS*, kuru mēdz dēvēt par viendimensiju kvalitātes novērtējumu, jo tas neietver visas cilvēka vizuālās uztveres īpatnības. Tomēr *MOS* jau vairāk kā desmit gadus var dēvēt par (*de-facto*) mēru video kvalitātes novērtēšanā. *MOS* datu ieguvei un aprēķinam izmanto dažādas video kvalitātes novērtēšanas skalas. Lai arī teorētiski 9, 11 un 100 baļļu skalām ir jābūt mazākai standarta novirzei salīdzinot ar 5 baļļu skalu, tomēr praksē šīs atšķirības ir statistiski nenoīmīgas. Tāpēc par vienu no galvenajiem kvalitātes novērtēšanas skalas izvēles kritērijiem var būt respondentu izvēlēta skala, kura ir atzīta par vieglāk uztveramu un saprotamu. Pareiza respondentu izvēle un atlase ir būtiska. Vispirms respondentus izvēlas pēc dzimuma, vecuma, izglītības, kā arī citiem sociāli ekonomiskiem rādītājiem. Otrkārt, visiem atlasītajiem respondentiem, izmantojot specializētus testus, tiek novērtēts vispārējās redzes asums (*Snellen*) un krāsu redze (*Ishihara*), atsevišķos eksperimentos tika izmantots kontrasta jūtības novērtēšanas tests (*Pelli-Robson*). Lai video kvalitātes novērtēšanas testa rezultātus varētu uzskatīt par ticamiem, respondentu skaitam ir jābūt lielākam par 15, kaut gan dažādos literatūras avotos, t.sk. *ITU* rekomendācijās un pētījumos, šis skaits svārstās no 6 līdz 40.

- Ir izveidota testgultne video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai:
 - Ir izveidota testgultnes telpa ar tehniskiem parametriem atbilstoši (BT.500, 2012), (P.910, 2008) un [128], t.sk. telpas apgaismojums, apgaismojuma krāsas un mikroklimata mēraparatūra, skatīt 2. Pielikumā;
 - Ir izveidots testgultnes video kodēšanas un pārraides tīkla aprīkojums, t.sk. *LCD* displeji, video serveris (*HE*), video klientu (*STB*) un pārraides tīkla (*Ethernet*, *IP*, *MPEG*) emulāciju aparatūra un programmatūra, skatīt 2. pielikumā.
- Ir izveidota metodika video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai, ar kuras palīdzību var modelēt video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus:
 - Ir izveidotas pakešu atmešanas emulācijas, lai var modelēt dažādus pakešu zuduma scenārijus (aizture, trīces un pakešu zudums) *IP* tīklos, t.sk. dažādus pakešu atmešanas varbūtību sadalījumus (*Puasona*, *Gausa* un *vienmērīgais*);
 - Ir izveidotas video kodēšanas un pakešu zuduma rezultātā radīto bojājumu emulācijas, lai varētu modelēt vizuāli redzamus artefaktus skatītājam ekrānā (attēla bloku un šķēles bojājumi, izplūduši attēla elementi, u.tml.);
 - Ir izveidoti respondentu redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) pārbaudes.

Video kompresijas un pārraides tehniskie parametri var būtiski ietekmēt video kvalitātes novērtējumu, tāpēc, lai nodrošinātu ticamus eksperimentu rezultātus, tika izveidota atbilstoša testgultne un metodika. Pirmkārt, tika izveidota eksperimentu veikšanas testgultne, kura nodrošināja visiem respondentiem identiskus testa apstākļus, kā arī kontrolējamus un nemainīgus tehniskos parametrus. Otrkārt, tika izstrādāta metodika, kura apraksta specifiskus testgultnes parametrus, to kalibrāciju un mērījumus, eksperimentos izmantojamo kvalitātes novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas, kā arī iegūto datu apstrādes un analīzes procedūru.

Darba eksperimentos kā pirmais solis, atlasot un klasificējot respondentus, tika veikts redzes skrīnings (redzes kvalitātes novērtējums). Redzes skrīningā tika novērtēti respondentu redzes asums, izmantojot *Snellen* metodi, krāsu redzes pārbaudēm tika izmantota *Ishihara* metode, bet kontrasta jūtības novērtēšanai – izmantota *Pelli-Robson* metode. Redzes skrīnings kalpoja kā papildus kritērijs, veicot datu atlasī, atdalot ticamus no šaubīgiem rezultātiem.

Video kvalitātes testēšanā izvēlētais video materiāls atstāj būtisku ietekmi uz video kvalitātes vērtējumu vai *MOS*, tāpēc, atlasot video materiālu, bija jāņem vērā vairāki būtiski priekšnosacījumi. Vispirms video fragmentus atlasa pēc satura (daba, sports, dzīvnieki, u.tml.), tad izslēdz aizskarošus, strīdīgus vai kaitinošus video sižetus (vardarbību, šausmu filmas, politiku, reliģiju, pornogrāfiju, u.tml.), kuri var būtiski traucēt respondentam koncentrēties uzdevuma izpildei, kā rezultātā samazinās *MOS* un palielinās ticamības intervāla robežas, tāpēc ieteicams izvēlēties pēc iespējas neitrālākas tēmas. Otrkārt, video sižeti ir jāatlasa pēc tehniskiem parametriem, jāaprēķina katra individuāla video sižeta telpiskās *SA* un laika *TA* vērtības. Jo vairāk smalku elementu attēlā, jo lielāka *SA* vērtība, jo vairāk kustību video sižetā, jo lielāka *TA* vērtība. Tāpēc video kvalitātes novērtēšanas testos jāizmanto plaša spektra video sižeti ar dažādām *SA* un *TA* vērtībām. Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telpa laika aktivitāte – *TA* (*Temporal Activity*) – jo lielāka *TA* vērtība, jo zemāks video sižeta kvalitātes vērtējums *MOS*. Savukārt telpas aktivitātes *SA* (*Spatial Activity*) vērtība neietekmē sintētiskā video sižeta vērtējumu – nav novērotas kvalitātes vērtējuma atšķirības ne lielu, ne arī mazu *SA* vērtību gadījumos.

Ja testēšanā tiek izmantoti dažādu tehnisko parametru *HRC* video, tad šo dažādo *HRC* video fragmentus savstarpējai salīdzināšanai un salīdzināšanai ar *SRC* oriģināla video var izmantot *PSNR*. Kaut arī *PSNR* visai vāji korelē ar *MOS*, tomēr tā ir visiem labi zināma un vienkārša metode, kuru var izmantot kā vispārēju kvantitatīvu kompresijas pakāpes un bojājuma apjoma novērtēšanas rādītāju.

Respondenti tika atlasīti pēc dzimuma, vecuma, izglītības līmeņa, profesijas vai nodarbošanās sfēras. Pētījumā konstatēts, ka kvalitātes novērtējumu ietekmē visas respondentu pazīmes, bet par statistiski nozīmīgām var uzskatīt tikai divas pazīmes – respondenta vecums un profesionalitāte vai zināšanas un pieredze darbā ar ciparu video tehnoloģijām (eksperti). Svarīgi pieminēt, ka kompresijas algoritmu uzlabošanai un izstrādei tiek izmantoti nespeciālistu, nevis ekspertu kvalitātes novērtējuma testi, tāpēc visos darba eksperimentos bija pieaicināti respondenti, kuri nav eksperti.

- Ir veikts video kvalitātes novērtēšanas metožu salīdzinājums, analīze un eksperimenti, kā rezultātā izvēlētas atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem;
 - Video kvalitātes novērtēšanā viena ekrāna un divu ekrānu metodes dod statistiski līdzvērtīgus rezultātus ($r = 0.78$), bet, dodot izvēles iespēju, 70 % vērtētāju priekšroku dod divu ekrānu metodei;
 - Ir konstatēts, ka no 1265 respondentu aptaujas 5 baļļu skalu 399 respondenti uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu, 9 baļļu skalu – 97, 11 baļļu skalu – 117, 100 baļļu skalu – 280, bet 372 respondenti ir atzinuši jebkuru skalu par vienlīdz saprotamu un pieņemamu.
- Ir veikti dažādu video signālu un interfeisu video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti un statistisko datu apstrāde:
 - Starp augstas izšķirtspējas komponento ciparu video (*YCbCr 1080i*) un komponento analogo video (*YPbPr 720p*) ir statistiski nebūtiskas atšķirības ($r = 0.91$), bet kompozītā analogā video (*YIQ 576p*) rezultāti būtiski atšķiras (par 1 līdz 2.5 *MOS* ballēm zemāks salīdzinājumā ar *YCbCr* un *YPbPr*);
 - Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telpaika (*TA*) parametru vērtības ($r = -0.85$);
 - Starp 576p un 1080i kodējuma video, kur abos gadījumos uz diviem neatkarīgiem ekrāniem tika izmantots viens un tas pats video interfeiss, ir novērotas statistiski nenožīmīgas atšķirības ($r = 0.89$).
- Ir veikti pakešu zuduma ietekmes video kvalitātes novērtēšanas eksperimenti un statistisko datu apstrāde;
 - Emulējot pakešu zudumus ar *Puasona*, *Gausa* vai *vienmērīgo* varbūtību sadalījumu, video kvalitātes novērtējumiem *MOS* atšķirības nav statistiski nozīmīgas;

- Video straumēšanā pakešu zudumi nedrīkst pārsniegt 0.25 %, jo tas atbilst video kvalitātes vērtējuma $MOS = 2.4$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par kvalitātes akceptēšanas robežvērtību;
- Kaut arī $PSNR$ vāji korelē ar MOS (0.25 % $r = 0.28$ un 1 % $r = 0.60$ pakešu zudumam), tomēr tas var kalpot kā vispārējs bojājuma apjoma novērtēšanas rādītājs.
- Nav atrasta vērā ņemama saistība starp $PSNR$ un I, P kadru bojājumiem, kā arī nav atrasta saistība starp MOS un I, P kadru bojājumiem;
- Kaut arī $PSNR$ visai vāji korelē ar MOS , tomēr tas var kalpot kā kompresijas un pakešu zuduma līmeņa vispārējs bojājuma apjoma novērtēšanas rādītājs.
- Ir veikta video sižetu, kuri izmantoti darba eksperimentos atlase un novērtēšana;
 - Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telpaika aktivitāte (TA), jo lielāka TA vērtība, jo zemāks video sižeta kvalitātes vērtējums MOS ;
 - Jo lielāka video sižeta TA un augstākas kvalitātes video tiek izmantots (1080i pret 576p), jo lielāka varbūtība ir novērot vizuāli redzamus bojājumus (artefaktus);
 - Sintētiskiem video sižetiem ar lielu telpisko aktivitāti (SA) video kvalitātes vērtējums 1080i video gadījumā bija augstāks nekā 576p video;
 - Jo lielāks pakešu zudums, jo zemāka $PSNR$ vērtība. Jo augstāka kompresijas pakāpe, jo zemāka $PSNR$ vērtība;

Video kvalitātes vērtējums ir atkarīgs no video sižeta, jo pakešu zuduma vai pārmērīgas kompresijas rezultātā radītie bojājumi ekrānā tiek attēloti, kā vizuāli redzami artefakti, tieši tajās video sižeta vietās, kurās notiek kustība, līdz ar to skatītājs tam pievērš pastiprinātu uzmanību. Savukārt video sižeta apgabalos ar statiskām ainām bojājumi ir mazāk pamanāmi, jo skatītājs tiem pievērš mazāku uzmanību.

Pamatojoties uz eksperimentālajiem testiem, var secināt, ka starp 720p un 1080i kodējuma video ir statistiski nenoīmīgas kvalitātes atšķirības. 720p video pārraidei un uzglabāšanai nepieciešams par 10 – 15 % zemāks pārraides ātrums un apjoms, salīdzinot ar 1080i video. Resursu taupības nolūkos ieteicams izvēlēties 720p video. Nav novērotas arī būtiskas kvalitātes atšķirības starp anlogo ($YPbPr$ 720p) un ciparu ($YCbCr$ 1080i) komponento video, bet ir novērotas būtiskas kvalitātes atšķirības, salīdzinot ar analogo kompozīto (YIQ 576p) video. Ieteicams izvēlēties analogo vai ciparu komponento video.

Pakešu zuduma, aiztures un trīces statistikai izmanto dažādus sadalījuma procesus. Maza pakešu zuduma ($\leq 1\%$) gadījumos, ko var uzskatīt par retu notikumu bez atmiņas, jo pakešu zudums nav atkarīgs no iepriekš zaudētās paketes, izmanto *Puasona* sadalījumu. Ja varam pieņemt, ka pakešu zudumu ietekmē daudzi neatkarīgi procesi, tad pakešu zuduma statistikai var izmantot normālo vai *Gausa* sadalījumu. Savukārt diskrēts *vienmērīgais* sadalījums ir tipisks izlases gadījumskaitļa ģenerators, kuru arī mēdz lietot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku.

Konstatēts, ka interneta un *VBR* video datu plūsmai ir pašlīdzīgs raksturs neatkarīgi no video materiāla satura (video konference, video zvans, filma, multfilma, sporta pārraides, u.tml.). Minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, kāpēc darba eksperimentos ir izmantota tieši *VBR* video datu plūsma, nevis *CBR*.

Lai arī *Puasona*, *normālo* un *vienmērīgo* sadalījuma procesu ir paredzēts izmantot pie dažādiem nosacījumiem, tomēr jebkuru no viņiem var izmantot, lai aprakstītu pakešu zuduma statistiku, jo nav novērotas būtiskas atšķirības starp šiem sadalījuma procesiem.

Pakešu zudums ($\geq 0.25\%$), iespējams, ir izmantojams video straumēšanā. *IP* pakešu 0.25% zudums atbilst vidējam kvalitātes vērtējumam $MOS = 2.37$, kas ir ļoti tuvs $MOS = 2.5$, kuru mēdz dēvēt par pakalpojuma līmeņa akceptēšanas (*acceptance* vai *acceptability*) robežvērtību. $MOS = 2.5$ tiek uzskatīta kā viendimensionāla vispārējās kvalitātes novērtējuma robežvērtība, kuru gan nevar uzskatīt par vienīgo un patieso mērījumu pakalpojuma līmeņa akceptēšanas robežvērtības noteikšanai.

Kaut arī video kvalitātes vērtējums (MOS) vāji korelē ar objektīvo video kvalitātes vērtējumu ($PSNR$ un $lgMSE$) pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai ($r = 0.28 - 0.60$), tomēr liela pakešu zuduma ($\geq 1\%$) gadījumos $PSNR$ un $lgMSE$ var izmantot MOS prognozēšanā.

Darba ietvaros radītā metodika un testgultne ir izmantojama gan zinātniskiem, gan komerciāliem darbiem.

Iespējamie turpmākie pētījumi:

- Veikt pakešu zuduma ietekmes video kvalitātes novērtēšanas eksperimentus, kur pakešu zuduma apjoms ir mazāks par 0.25% . Uzdevums ir atrast pakešu zuduma robežvērtības, kuras var saistīt ar minimāli pieņemamo video kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu, izmantojot divdimensionālā MOS metodi;

- Papildināt testgultni ar trīsdimensiju (*3DTV*) video monitoriem un citiem sakaru sistēmas pārraides kanāliem, piemēram, *WiFi*, *3G/4G* un *DVB*;
- Papildināt metodiku ar *3DTV* piemērotām subjektīvās un objektīvās video kvalitātes novērtēšanas metodēm.

Pētnieciskais darbs pie cilvēka uztveres īpašību sasaistes ar objektīviem parametriem turpināsies līdz brīdim, kad, ar video kvalitātes novērtēšanas eksperimentiem un *QoE* metrikām, varēs iegūt identiskus rezultātus.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] LZA Terminoloģijas komisija, «termini.lza.lv,» 12 Februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://termini.lza.lv/term.php>. [Piekļūts 12 Februārī 2015].
- [2] TNS Latvia, «TNS Latvia,» 21 Novembris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.tns.lv/?lang=lv&category=showproduct&id=tvm>. [Piekļūts 21 Novembrī 2013].
- [3] Cisco VNI, «Cisco Systems inc.,» 29 Maijs 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns827/networking_solutions_solution_category.html. [Piekļūts 14 Novembrī 2013].
- [4] Cisco GCI, «Cisco Systems inc.,» 1 Oktobris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns1175/networking_solutions_solution_category.html. [Piekļūts 14 Novembrī 2013].
- [5] dvb.org, 4 Marts 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.dvb.org/>. [Piekļūts 4 Martā 2015].
- [6] atis.org, 5 Marts 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.atis.org/>. [Piekļūts 5 Martā 2015].
- [7] E.800, «Definitions of terms related to quality of service,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2008.
- [8] Bonastre, O. M. Montpetit, M.-J. Cesar, P., «Advances in IPTV technologies,» *Signal Processing: Image Communication*, sēj. 26, nr. 7, pp. 325-326, August 2011.
- [9] Stockhammer T., «Dynamic adaptive streaming over HTTP - Standards and design principles,» *MMSys'11 - Proceedings of the 2011 ACM Multimedia Systems Conference*, 2011.
- [10] Gozdecki, J. Jajszczyk, A. Stankiewicz, R., «Quality of service terminology in IP networks,» sēj. 41, nr. 3, pp. 153-159, 2003.
- [11] Duan, Z. Zhang, Z.L. Hou, Y.T., «Service Overlay Networks: SLAs, QoS, and Bandwidth Provisioning,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, sēj. 11, nr. 6, pp. 870-883, December 2003.
- [12] Schatz, R. Hoßfeld, T. Janowski, L. Egger, S., *From packets to people: Quality of experience as a new measurement challenge*, sēj. 7754, 2013, pp. 219-263.
- [13] Brooks, P. Hestnes, B., «User measures of quality of experience: Why being objective and quantitative is important,» *IEEE Network*, sēj. 24, nr. 2, pp. 8-13, March 2010.
- [14] Reichl, P., «From Charging for Quality-of-Service to Charging for Quality-of-Experience,» *Annals of Telecommunications, special issue on "Quality of Experience and Socio-Economic Issues of Network-Based Services"*, pp. 189-199, 2010.
- [15] ATIS-0800008, «QoS Metrics for Linear (Broadcast) IPTV,» 2011.
- [16] Hands, D. Wilkins, M., «A Study of the Impact of Network Loss and Burst Size on Video Streaming Quality and Acceptability,» in *Michel Diaz; Philippe Owezarski & Patrick Sénac, ed., 'IDMS', Springer*, pp. 45-57, 1999.
- [17] Reichl, P. Tuffin, B. Schatz, R., «Logarithmic laws in service quality perception: where microeconomics meets psychophysics and quality of experience,» *Telecommunication Systems*, pp. 1-14, 2011.
- [18] Jumisko-Pyykkö S., Häkkinen J., Nyman G., «Experienced quality factors - Qualitative evaluation approach to audiovisual quality» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, San Jose, CA; United States, 2007.
- [19] QUALINET, 12 Februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.qualinet.eu>. [Piekļūts 12 Februārī 2015].
- [20] Le Callet, P. Möller, S. Perkis, A., «Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience. European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services (COST Action IC 1003),» QoMEX, Lausanne, Switzerland, 2013.
- [21] Jumisko-Pyykkö, S. Häkkinen, J., «Profiles of the evaluators - Impact of psychographic variables on the consumer-oriented quality assessment of mobile television,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, San Jose, CA; United States, 2008.
- [22] BT.500, «Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures,» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [23] P.910, «Subjective video quality assessment methods for multimedia applications,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2008.

- [24] De Moor, K. Ketyko, I. Joseph, W. Deryckere, T. De Marez, L. Martens, L. Verleye, G., «Proposed framework for evaluating quality of experience in a mobile, testbed-oriented living lab setting,» *Mobile Networks and Applications*, sēj. 15, nr. 3, pp. 378-391, 2010.
- [25] Catellier A., Pinson M., Ingram W., Webster A., «Impact of mobile devices and usage location on perceived multimedia quality,» *2012 4th International Workshop on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2012*, Melbourne, VIC; Australia, 2012.
- [26] Chen K.-T., Wu C.-C., Chang Y.-C., Lei C.-L., «A crowdsorceable QoE evaluation framework for multimedia content,» *MM'09 - Proceedings of the 2009 ACM Multimedia Conference, with Co-located Workshops and Symposiums*, Beijing; China, 2009.
- [27] Chen K.-T., Chang C.-J., Wu C.-C., Chang Y.-C., Lei C.-L., «Quadrant of euphoria: A crowdsourcing platform for QoE assessment,» *IEEE Network*, sēj. 24, nr. 2, pp. 28-35, March 2010.
- [28] Hossfeld T., Keimel C., Hirth M., Gardlo B., Habigt J., Diepold K., Tran-Gia P., «Best practices for qoe crowdtesting: Qoe assessment with crowdsourcing,» *IEEE Transactions on Multimedia*, sēj. 16, nr. 2, pp. 541-558, February 2014.
- [29] Streijl R.C., Winkler S., Hands D.S., «Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives,» *Multimedia Systems*, pp. 2-16, 2014.
- [30] Xu J., Xing L., Perkis A., Jiang Y., «On the properties of mean opinion scores for quality of experience management,» *Proceedings - 2011 IEEE International Symposium on Multimedia, ISM 2011*, Dana Point, CA, US, 2011.
- [31] P.10/G.100, «Vocabulary and effects of transmission parameters on customer opinion of transmission quality,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2006.
- [32] G.107, «The E-model: a computational model for use in transmission planning,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2015.
- [33] G.1070, «Opinion model for video-telephony applications,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [34] Moller, S., *Quality Engineering: Qualitat Kommunikationstechnischer Systeme*, Springer, 2010, p. 212.
- [35] Young, R.A., «Oh say, can you see? The physiology of vision,» *SPIE Human Vision, Visual Processing and Digital Display II*, sēj. 1453, pp. 92-123, 1 February 1991.
- [36] Glassner, A.S., *Principles of Digital Image Synthesis*, Sēj. no I-II, The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, 1995, p. 1400.
- [37] Winkler, S., *Digital Video Quality Vision Models and Metrics*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England : John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [38] Wandell, B.A., *Foundations of Vision*, Sinauer Associates Inc., 1995, p. 476.
- [39] kybervision.com, «kybervision.com,» 13 June 2010. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.kybervision.com/Blog/files/AppleRetinaDisplay.html>. [Piekļūts 24 November 2014].
- [40] Russ, John C., «The upper limit (finest detail) visible with the human eye is about 50 cycles per degree,...,» *The Image Processing Handbook*, CRC Press, 2007, p. 94.
- [41] ISO 12233:2014, «Photography -- Electronic still picture imaging -- Resolution and spatial frequency responses,» ISO/IEC, 2014.
- [42] Guyton A.C., Hall J.E., *Textbook of medical physiology* 11th ed., Philadelphia: Elsevier Saunders, 2006, p. 1116.
- [43] Hood D. C., Finkelstein M. A., «Sensitivity to light,» *Handbook of Perception and Human Performance*, John Wiley, 1986.
- [44] Michelson, A. A., «Studies in Optics,» University of Chicago Press, 1927.
- [45] Campbell F. W. Robson J. G., «Application of Fourier analysis to the visibility of gratings,» *Journal of Physiology*, pp. 551-566, 1968.
- [46] Schanda, J., *Colorimetry: Understanding the CIE System*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007, p. 390.
- [47] CIE std., «cie.co.at,» 6 Decembris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.cie.co.at/>. [Piekļūts 6 Decembrī 2014].
- [48] Wyszecki G., Stiles W. S., *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 2000, p. 968.
- [49] Brainard Lab, «color.psych.upenn.edu,» 6 Decembris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://color.psych.upenn.edu/publications>. [Piekļūts 6 Decembrī 2014].
- [50] Brainard, H. D., *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques, and Design*, 2nd ed, McGraw-Hill, 1995.

- [51] Grassmann, H.G., «Zur Theorie der Farbenmischung,» *Annalen der Physik und Chemie*, pp. 69-84, 1853.
- [52] Hering, E., «Zur Lehre vom Lichtsinne,» *Vienna: Carl Gerolds Sohn*, 1878.
- [53] B. M., «michaelbach.de/ot/,» 12 Februāris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://michaelbach.de/ot/>. [Piekļūts 27 Februārī 2014].
- [54] Adelson E.H. Johnson M.K., «Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape,» *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Miami, 2009.
- [55] Ostermann J. Bormans J. List P. Marpe D. Narroschke M. Pereira F. Stockhammer T. Wedi T., «Video coding with H.264/AVC: Tools, performance, and complexity,» *IEEE Circuits and Systems Magazine*, sēj. 4, nr. 1, pp. 7-28, March 2004.
- [56] Sullivan G.J. Ohm J.-R. Han W.-J. Wiegand T., «Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 22, nr. 12, pp. 1649-1668, 2012.
- [57] Bossen F. Bross B. Suhring K. Flynn D., «HEVC complexity and implementation analysis,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 22, nr. 12, pp. 1685-1696, 2012.
- [58] VCEG ITU-T SG16: Multimedia, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2013-2016/16/Pages/default.aspx>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [59] MPEG, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://mpeg.chiariglione.org>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [60] MPEG ISO/IEC JTC 1/SC 29, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=45316. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [61] SMPTE, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.smpte.org>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [62] x264, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.videolan.org/developers/x264.html>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [63] x265, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://x265.org/index.html>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [64] WebM, 1 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.webmproject.org>. [Piekļūts 1 Aprīlī 2014].
- [65] AVS Audio and Video Coding Standard Workgroup, 1 April 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.avs.org.cn/english/>. [Piekļūts 1 April 2014].
- [66] Fischer, W., *Digital Video and Audio Broadcasting Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [67] BT.601, «Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios,» Geneva, Switzerland, 2011.
- [68] BT.709, «Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange,» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2002.
- [69] BT.2020, «Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange,» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [70] H.265, «H.265 : High efficiency video coding,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2013.
- [71] Digital Cinema Initiatives, LLC, «dcimovies.com,» 28 Marts 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.dcimovies.com>. [Piekļūts 28 Martā 2014].
- [72] Digital Cinema System Specification v1.2, «Digital Cinema Initiatives, LLC,» Digital Cinema Initiatives, LLC, Hollywood, CA, 2012.
- [73] A. Compressor 3, «Compressor 3 user manual,» 12 Februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://documentation.apple.com/en/compressor/usermanual/index.html#chapter=18%26section=5%26tasks=true>. [Piekļūts 12 Februārī 2015].
- [74] Reimers, U.H., «DVB - The family of international standards for digital video broadcasting,» *Proceedings of the IEEE*, sēj. 94, nr. 1, pp. 173-182, January 2006.
- [75] Skinnemoen H. Leirvik R. Hetland J. Fanebust H. Paxal V., «Interactive IP-Network Via Satellite DVB-RCS,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, sēj. 22, nr. 3, pp. 508-517, 2004.
- [76] Wu D. Hou Y.T. Zhu W. Zhang Y.-Q. Peha J.M., «Streaming video over the internet: Approaches and directions,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 11, nr. 3, pp. 282-300, March 2001.
- [77] EN301192, «DVB specification for data broadcasting,» ETSI, France, 2004.

- [78] RFC4326, «Unidirectional Lightweight Encapsulation (ULE) for Transmission of IP Datagrams over an MPEG-2 Transport Stream (TS),» IETF, 2005.
- [79] RFC-3550, «RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications,» IETF, 2003.
- [80] RFC-2326, «Real Time Streaming Protocol (RTSP),» IETF, 1998.
- [81] RFC-3711, «The Secure Real-time Transport Protocol (SRTP),» IETF, 2004.
- [82] H.222.0, «Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [83] Apple HTTP Live Streaming, 16 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://developer.apple.com/streaming/>. [Piekļūts 16 Aprīlī 2014].
- [84] MPEG-DASH, «Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH), ISO/IEC 23009-1:2012,» ISO/IEC, 2012.
- [85] Adobe Flash HTTP Dynamic Streaming, 16 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.adobe.com/devnet/hds.html>. [Piekļūts 16 Aprīlī 2014].
- [86] Adobe Flash RTMP, 16 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.adobe.com/devnet/rtmp.html>. [Piekļūts 16 Aprīlī 2014].
- [87] Windows Media HTTP Streaming Protocol, 16 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc251059.aspx>. [Piekļūts 16 Aprīlī 2014].
- [88] TR-126, «Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements,» Technical Report, 2006.
- [89] Schneps-Schneppe, M. Pauliks, R., «On the Role of Subjective Assessments in IPTV Quality Configuration,» *Automatic Control and Computer Sciences*, sēj. 48, nr. 1, pp. 25-36, January 2014.
- [90] ATIS-0800004, «A Framework for QoS Metrics and Measurements supporting IPTV Services,» 2006.
- [91] TR101290, «Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems,» ETSI, Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2001.
- [92] Greengrass J. Evans J. Begen A.C., «Not all packets are equal, Part 2: The impact of network packet loss on video quality,» *IEEE Internet Computing*, 2009.
- [93] Park S.-J. Jeon G. Jeong J., «Computation-aware algorithm selection approach for interlaced-to-progressive conversion,» *Optical Engineering*, sēj. 49, nr. 5, May 2010.
- [94] Leland W.E. Murad T.S. Walter W. Daniel W.V., «On the self-similar nature of Ethernet traffic,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, sēj. 2, nr. 1, pp. 1-15, February 1994.
- [95] Willinger W. Taqqu M.S. Sherman R. Wilson D.V., «Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, sēj. 5, nr. 1, pp. 71-86, 1997.
- [96] Ilnickis S. Petersons E. Jerjomins R., «Server Non-Stationary Behaviour Research at near to Self-Similar Query Stream Influence,» *Electronics and Electrical Engineering*, pp. 46-51, 2005.
- [97] Jerjomins R. Petersons E., «Server Relaxation Time at near to Self-Similar Query Stream Influence,» *Queues. Flows, Systems, Networks: Mathematical Methods of Optimisation of Telecommunication Networks*, 2007.
- [98] Kulikovs M. Petersons E., «Remarks on Packet Loss Probability for the Network Traffic with Self-Similar Behaviour,» *Proceedings of Wireless Applications and Computing 2008 and Telecommunications, Networks and Systems 2008*, 2008.
- [99] Petersons E. Kulikovs M., «Remarks Regarding Queuing Model and Packet Loss Probability for the Traffic with Self-Similar Characteristics,» *Proceedings of World World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008.
- [100] Dai M. Zhang Y. Loguinov D., «A unified traffic model for MPEG-4 and H.264 video traces,» *IEEE Transactions on Multimedia*, sēj. 11, nr. 5, pp. 1010-1023, August 2009.
- [101] Beran J. Sherman R. Taqqu M.S. Willinger W., «Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic,» *IEEE Transactions on Communications*, sēj. 43, nr. 2, pp. 1566-1579, February 1995.
- [102] Heyman D.P. Lakshman T.V., «What are the Implications of Long Range Dependence for VBR-Video Traffic Engineering?,» *IEEE Trans. Networking*, sēj. 4, nr. 3, pp. 301-317, June 1996.
- [103] Lakshman T.V. Ortega A. Reibman A.R., «VBR Video: Tradeoffs and Potentials,» *Proceedings of the IEEE*, sēj. 85, nr. 5, pp. 952-972, 1998.
- [104] Vetro A. Christopoulos C. Sun H., «Video transcoding architectures and techniques: An overview,» *IEEE Signal Processing Magazine*, sēj. 20, nr. 2, pp. 18-29, March 2003.

- [105] Gonick L. Smith W., *The Cartoon Guide to Statistics*, New York: HarperPerennial A Division of HarperCollinsPublishers, 1993.
- [106] Spiegel M. Stephens L., *Schaums Outline of Statistics*, Fourth Edition (Schaum's Outline Series), McGraw-Hill; 4 edition, 2011, p. 600.
- [107] Pauliks, R. Slaidins, I. Krauze. A. Tretjaks, K., «Assessment of IP packet loss influence on perceptual quality of streaming video,» 2015.
- [108] Lin, C-H. Tainan, Ke, C-H. Shieh, C-K. Naeen C., «The Packet Loss Effect on MPEG Video Transmission in Wireless Networks,» *Advanced Information Networking and Applications, AINA*, Vienna, 2006.
- [109] Joskowicz J. Sotelo R., «A Model for Video Quality Assessment Considering Packet Loss for Broadcast Digital Television Coded in H.264,» *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, p. 11, 2014.
- [110] Shihab, E. Fengdan Wan. Lin Cai. Gulliver, A. Tin, N., «Performance Analysis of IPTV Traffic in Home Networks,» *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07*, Washington, DC, 2007.
- [111] Zhang Y. Duffield N. Paxson V. Shenker S., «On the Constancy of Internet Path Properties,» *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop*, 2001.
- [112] Win M.Z. Pinto P.C. Shepp L.A., «A mathematical theory of network interference and its applications,» *Proceedings IEEE*, 2009.
- [113] Cidon I. Khamisy A. Sidi M., «Analysis of packet loss processes in high-speed networks,» *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993.
- [114] Paxson, V., «End-to-end Internet packet dynamics,» *EEE/ACM Transactions on Networking*, 1999.
- [115] Yajnik M. Moon S. Kurose J. Towsley, D., «Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss,» *Proceedings IEEE INFOCOM*, 1999.
- [116] Beran J. Sherman R. Taqqu M.S. Willinger W., «Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic,» *IEEE Transactions on Communications*, sēj. 43, nr. 3, pp. 1566-1579, 1995.
- [117] Kanumuri S. Cosman P.C. Vaishampayan V.A. Reibman A.R., «Modeling Packet-Loss Visibility in MPEG-2 Video,» *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006.
- [118] Liang Y.J. Apostolopoulos J.G. Girod B., «Analysis of packet loss for compressed video: Effect of burst losses and correlation between error frames,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008.
- [119] Lakshman T.V. Madhow, U., «The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth-delay products and random loss,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1997.
- [120] Boyce J.M. Gaglianella R.D., «Packet loss effects on MPEG video sent over the public Internet,» *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Multimedia, MULTIMEDIA*, 1998.
- [121] Mathis M. Semke J. Mahdavi J. Ott T., «The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm,» *Computer Communication Review*, 1997.
- [122] Izquierdo M.R. Reeves D.S., «Survey of statistical source models for variable-bit-rate compressed video,» *Multimedia Systems*, 1999.
- [123] Sen P. Maglaris B. Rikli N.-E. Anastassiou D., «Models for packet switching of variable-bit-rate video sources,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989.
- [124] Khan A. Sun L. Ifeachor E., «Content-Based Video Quality Prediction for MPEG4 Video Streaming over Wireless Networks,» *Journal of Multimedia*, sēj. 4, nr. 4, pp. 228-239, August 2009.
- [125] Shmueli R. Hadar O. Huber R. Maltz M. Huber M., «Effects of an encoding scheme on perceived video quality transmitted over lossy internet protocol networks,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008.
- [126] Yamagishi K. Hayashi T., «Parametric Packet-Layer Model for Monitoring Video Quality of IPTV Services,» *IEEE International Conference on Communications 2008 (ICC 08)*, Beijing, 2008.
- [127] P.911, «Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 1998.
- [128] P.800, «Methods for subjective determination of transmission quality,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 1996.
- [129] Sommers J. Barford P. Duffield N. Ron A., «A geometric approach to improving active packet loss measurement,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, sēj. 16, nr. 2, pp. 307-320, 2008.
- [130] Liang Y.J. Apostolopoulos J.G. Girod B., «Analysis of packet loss for compressed video: Effect of burst losses and correlation between error frames,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 18, nr. 7, pp. 861-874, 2008.

- [131] RFC-4445, «A Proposed Media Delivery Index (MDI),» IETF, 2006.
- [132] Ma S. Gao W. Lu Y., «Rate-Distortion Analysis for H.264/AVC Video Coding and its Application to Rate Control,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 15, nr. 12, pp. 1533-1543, December 2005.
- [133] MSU Graphics & Media Lab (Video Group), «compression.ru,» 25 Augusts 2011. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.compression.ru/video/quality_measure/subjective_metrics_info_en.html. [Piekļūts 6 Novembrī 2013].
- [134] Kozamernik F. Steinmann V. Paola S. Wyckens E., «SAMVIQ—A New EBU Methodology for Video Quality Evaluations in Multimedia,» *SMPTE Motion Imaging Journal*, pp. 152-160, 2005.
- [135] Fenimore, C. Baroncini V. Oelbaum T. Keng Tan T., «Subjective testing methodology in MPEG video verification,» *SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing XXVII*, 2004.
- [136] BT.1788, «Methodology for the subjective assessment of video quality in multimedia applications,» ITU-R Rec., Geneva, Switzerland, 2007.
- [137] BS.1534, «Method for the subjective assessment of intermediate quality levels of coding systems,» ITU-R Rec., Geneva, Switzerland, 2014.
- [138] BT.1082, «Studies toward the unification of picture assessment methodology,» ITU-R Rec., Geneva, Switzerland, 1990.
- [139] P.912, «Subjective video quality assessment methods for recognition tasks,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2008.
- [140] BT.710, «Subjective assessment methods for image quality in high-definition television,» ITU-R Rec., Geneva, Switzerland, 1998.
- [141] J.140, «Subjective picture quality assessment for digital cable television systems,» Geneva. Switzerland, 1998.
- [142] P.1401, «Methods, metrics and procedures for statistical evaluation, qualification and comparison of objective quality prediction models,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [143] Jumisko-Pyykkö S. Malamal Vadakital V. K. Hannuksela M. M., «Acceptance Threshold: A Bidimensional Research Method for User-Oriented Quality Evaluation Studies,» *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, p. 20, 2008.
- [144] Ghinea G. Thomas J.P., «QoS Impact on User Perception and Understanding of Multimedia Video Clips,» *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Multimedia*, Bristol, UK, 1998.
- [145] Gulliver S.R. Serif T. Ghinea G., «Pervasive and standalone computing: the perceptual effects of variable multimedia quality,» *International Journal of Human Computer-Studies*, sēj. 60, nr. 5-6, pp. 640-665, 2004.
- [146] Watson A.B. Kreslake L., «Measurement of visual impairment scales for digital video,» *Proceedings of SPIE Human Vision and Electronic Imaging*, Los Altos, CA, 2001.
- [147] Jia Y. Lin W. Kassim A.A., «Estimating just-noticeable distortion for video,» *IEEE Transactions: Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 16, nr. 7, pp. 820-829, 2006.
- [148] Tektronix/Sarnoff PQR Picture Quality Metric, «Tektronix,» 21 Februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: www.tektronix.com/PQA500. [Piekļūts 21 Februārī 2015].
- [149] Ridder H. Majoor G.M., «Numerical category scaling: an efficient method for assessing digital image coding impairments,» *Proc. SPIE: Human Vision and Electronic Imaging: Models, Methods, and Applications*, B. E. Rogowitz and J. P. Allebach, Eds., Santa Clara, CA, 1990.
- [150] Dijk A.M. Martens J.B., «Perceptual image quality: concept and measurement,» *Philips Journal of Research*, sēj. 47, pp. 35-62, 1992.
- [151] Dijk A.M. Martens J.B., «Subjective quality assessment of compressed images,» *Signal Processing*, sēj. 58, p. 235-252, 1997.
- [152] Tominaga T. Hayashi T. Okamoto J. Takahashi A., «Performance comparisons of subjective quality assessment methods for mobile video,» *2010 2nd International Workshop on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2010*, Trondheim, Norway, 2010.
- [153] Rouse D.M., Pepion R., Le Callet P. Hemami S.S., «Tradeoffs in subjective testing methods for image and video quality assessment,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Nantes, France, 2010.
- [154] C. Lee. H. Choi. E. Lee. S. Lee. J. Choe., «Comparison of various subjective video quality assessment methods,» *Image Quality and System Performance III*, San Jose, CA, 2006.

- [155] Huynh-Thu Q. Ghanbari M., «A comparison of subjective video quality assessment methods for low-bit rate and low-resolution video,» *IASTED International Conference on Signal and Image Processing, SIP 2005*, Honolulu, United States, 2005.
- [156] Keelan, B., *Handbook of Image Quality: Characterization and Prediction*, CRC Press, 2002, p. 544.
- [157] Pinson M. Wolf S., «Comparing subjective video quality testing methodologies,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Lugano, Switzerland, 2003.
- [158] Atkinson R.C. Shiffrin R.M., «The control process of short term memory,» *Stanford University*, Stanford, California, US, 1971.
- [159] Peterson L.R. Peterson M.J., «Short-term retention of individual verbal items,» *Journal of Experimental Psychology*, sēj. 58, nr. 3, pp. 193-198, September 1959.
- [160] Miller, G. «The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information,» *Psychological Review*, sēj. 63, nr. 2, pp. 81-97, March 1956.
- [161] Staelens N. Moens S. Van Den Broeck W. Mariën I. Vermeulen B. Lambert P. Van De Walle R. Demeester P., «Assessing quality of experience of IPTV and video on demand services in real-life environments,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, sēj. 56, nr. 4, pp. 458-466, December 2010.
- [162] Winkler, S., «ON the properties of subjective ratings in video quality experiments,» *International Workshop on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2009*, San Diego, CA, US, 2009.
- [163] Quan, Huynh-Thu. Garcia, M.-N. Speranza, F. Corriveau, P. Raake, A., «Study of rating scales for subjective quality assessment of high-definition video,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, sēj. 57, nr. 1, pp. 1-14, 2011.
- [164] Rouse D.M. Pepion R. Le Callet P. Hemami S.S., «Tradeoffs in subjective testing methods for image and video quality assessment,» *Human Vision and Electronic Imaging XV*, San Jose, CA, 2010.
- [165] Strohmeier D. Jumisko-Pyykkö S. Kunze K., «Open Profiling of Quality: A Mixed Method Approach to Understanding Multimodal Quality Perception,» *Advances in Multimedia*, p. 28, 2010.
- [166] De Koning T.C.M. Veldhoven P. Knoche H. Kooij R.E., «Of MOS and men: bridging the gap between objective and subjective quality measurements in mobile TV,» *SPIE*, 2007.
- [167] J.247, «Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2008.
- [168] J.341, «Objective perceptual multimedia video quality measurement of HDTV for digital cable television in the presence of a full reference,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2011.
- [169] J.246, «Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2008.
- [170] J.149, «Method for specifying accuracy and cross-calibration of Video Quality Metrics (VQM),» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2004.
- [171] Shi Z. Liu H., «Network video quality assessment based on MDI,» *IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2013*, Budapest, 2013.
- [172] Sheikh H.R. Bovik A.C., «Image information and visual quality,» *IEEE Transactions on Image Processing*, sēj. 15, nr. 2, pp. 430- 444, February 2006.
- [173] Sheikh, H.R. Sabir, M.F. Bovik, A.C., «A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms,» *IEEE Transactions on Image Processing*, pp. 3440-3451, November 2006.
- [174] Natural Scene Statistics in Vision Science Center for Perceptual Systems University of Texas at Austin, 8 Janvāris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://www.cps.utexas.edu/natural_scenes/db.shtml. [Piekļūts 8 Janvārī 2014].
- [175] Srivastava A. Lee A. B. Simoncelli E. P. Zhu S-c., «On Advances in Statistical Modeling of Natural Images,» *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, sēj. 18, nr. 1, pp. 17-33, January 2003.
- [176] Girod, B., «What's wrong with mean-squared error?,» *Visual Factors of Electronic Image Communications*, Cambridge, 1993.
- [177] Brunet D. Vrsnay E.R. Wang Z., «On the mathematical properties of the structural similarity index,» *IEEE Transactions on Image Processing*, sēj. 21, nr. 4, pp. 1488-1499, April 2012.
- [178] Zhou Wang. Bovik, A.C., «Mean Squared Error: Love It or Leave It? A new look at signal fidelity measures,» *IEEE Signal Processing Magazine*, sēj. 26, nr. 1, pp. 98-117, January 2009.
- [179] Winkler, S. Mohandas, P., «The Evolution of Video Quality Measurement: From PSNR to Hybrid Metrics,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, pp. 660-668, 2008.

- [180] Zhou Wang. Bovik, A.C., «A universal image quality index,» *IEEE Signal Processing Lett.*, sēj. 9, nr. 3, pp. 81-84, March 2002.
- [181] Zhou Wang. Bovik, A.C. Sheikh, H.R. Simoncelli, E.P., «Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity,» *IEEE Transactions on Image Processing*, sēj. 13, nr. 4, pp. 600-612, April 2004.
- [182] Zhou Wang. Bovik, A.C. Modern Image Quality Assessment, San Rafael: CA: Morgan & Claypool, 2006.
- [183] Ming-Jun Chen. Alan C. Bovik., «Fast structural similarity index algorithm,» *J Real-Time Image Proc.*, pp. 281-287, 2010.
- [184] VQEG, «its.bldrdoc.gov,» 2 Janvāris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/vqeg-home.aspx>. [Piekļūts 2 Janvārī 2014].
- [185] ITS NTIA, «its.bldrdoc.gov,» 2 Janvāris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.its.bldrdoc.gov/resources/video-quality-research/software.aspx>. [Piekļūts 2 Janvārī 2014].
- [186] Pinson M.H. Wolf S., «A new standardized method for objectively measuring video quality,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, pp. 312-322, 2014.
- [187] J.144, «Objective perceptual video quality measurement techniques for digital cable television in the presence of a full reference,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2004.
- [188] BT.1683, «Objective perceptual video quality measurement techniques for standard definition digital broadcast television in the presence of a full reference,» ITU-R Rec., Geneva, Switzerland, 2004.
- [189] A. T1.801.03, «American National Standard for Telecommunications - Digital Transport of One-Way Video Signals - Parameters for Objective Performance Assessment,» ANSI, Boulder, Colorado, 2003.
- [190] Seshadrinathan, K. Soundararajan, R. Bovik, A.C. Cormack, L.K., «Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Video,» *IEEE Transactions on Image Processing*, pp. 1427 - 1441, 2010.
- [191] Seshadrinathan K., Soundararajan R., Bovik A.C., Cormack L.K., «A Subjective Study to Evaluate Video Quality Assessment Algorithms,» *SPIE Proceedings Human Vision and Electronic Imaging*, 2010.
- [192] Bovik A.C. K. Seshadrinathan, «Motion Tuned Spatio-temporal Quality Assessment of Natural Videos,» *IEEE Transactions on Image Processing*, pp. 335-350, 2010.
- [193] LIVE Video Quality Database, «Laboratory for Image and Video Engineering (LIVE),» 23 Janvāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://live.ece.utexas.edu/research/quality/live_video.html. [Piekļūts 23 Janvārī 2015].
- [194] Chikkerur S. Sundaram V. Reisslein M. Karam L.J., «Objective video quality assessment methods: A classification, review, and performance comparison,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, pp. 165-182, 2011.
- [195] Pauliks, R. Slaidins, I., «Impact of Video Content and Technical Specifications on Subjective Quality Assessment,» *Electronics and Electrical Engineering*, sēj. 122, nr. 6, pp. 91-96, 2012.
- [196] Pauliks, R. Slaidins, I., «Quality Evaluation of Synthetic Video in Simultaneous Double Stimulus Environment,» *IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 2013.
- [197] Zhu C. Xiong B., «Transform-exempted calculation of sum of absolute hadamard transformed differences,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, sēj. 19, nr. 8, pp. 1183-1188, August 2009.
- [198] Hekstra A.P. Beerends J.G. Ledermann D. De Caluwe F.E. Kohler S. Koenen R.H. Rihs S. Ehrsam M. Schlauss, D., «PVQM – A perceptual video quality measure,» *Signal Processing: Image Communication*, sēj. 10, nr. 10, pp. 781-798, November 2002.
- [199] OPTICOM's PEVQ, «PEVQ,» 7 Janvāris 2010. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.pevq.org>. [Piekļūts 7 Janvārī 2014].
- [200] Tektronix, Inc., «Tektronix, Inc.,» 7 Janvāris 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.tek.com>. [Piekļūts 7 Janvārī 2014].
- [201] BT.1866, «Objective perceptual video quality measurement techniques for broadcasting applications using low definition television in the presence of a full reference signal,» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2010.
- [202] BT.1867, «Objective perceptual visual quality measurement techniques for broadcasting applications using low definition television in the presence of a reduced bandwidth reference,» ITU-R Rec, Geneva, Switzerland, 2010.
- [203] J.342, «Objective multimedia video quality measurement of HDTV for digital cable television in the presence of a reduced reference signal,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2011.
- [204] J.143, «User requirements for objective perceptual video quality measurements in digital cable television,» Geneva, Switzerland, 2000.

- [205] J.147, «Objective picture quality measurement method by use of in-service test signals,» Geneva, Switzerland, 2002.
- [206] J.148, «Requirements for an objective perceptual multimedia quality model,» Geneva, Switzerland, 2003.
- [207] P.1201, «Parametric non-intrusive assessment of audiovisual media streaming quality,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [208] P.1202, «Parametric non-intrusive bitstream assessment of video media streaming quality,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [209] Wolf S. Pinson M.H., «Spatial-temporal distortion metrics for in-service quality monitoring of any digital video system,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Boston, MA, USA, 1999.
- [210] Seshadrinathan K. Bovik A.C., «Motion tuned spatio-temporal quality assessment of natural videos,» *IEEE Transactions on Image Processing*, sēj. 19, nr. 2, pp. 335-350, 2010.
- [211] Kortum P. Sullivan M., «The effect of content desirability on subjective video quality ratings,» sēj. 52, nr. 1, pp. 105-118, 2010.
- [212] P.862, «Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2001.
- [213] P.863, «Perceptual objective listening quality assessment,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2014.
- [214] Joskowicz, J. Sotelo, R. Lopez Arado, J.C., «Comparison of parametric models for video quality estimation: Towards a general model,» *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB*, Korea, 2012.
- [215] J.249, «Perceptual video quality measurement techniques for digital cable television in the presence of a reduced reference,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2010.
- [216] Yamagishi K. Hayashi T., «Opinion Model for Estimating Video Quality of Videophone Services,» *IEEE Global Telecommunications Conference*, San Francisco, CA, 2006.
- [217] Hayashi T. Yamagishi K. Tominaga T. Takahashi A., «Multimedia Quality Integration Function for Videophone Services,» *IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington, DC, 2007.
- [218] Ou Y-Fu. Zhang W. Xiao J., «Packet Loss Pattern and Parametric Video Quality Model for IPTV,» *IEEE/ACIS 2009 Eighth International Conference on Computer and Information Science*, Shanghai, 2009.
- [219] Raake, A. Garcia, M.N. Moller, S. Berger, J. Kling, F. List, P. Johann, J. Heidemann, C., «T-V-Model: Parameter-Based Prediction of IPTV Quality,» *IEEE ICASSP 2008*, Las Vegas, NV, 2008.
- [220] Garcia M.N. Raake A. List P., «Towards Content-Related Features for Parametric Video Quality Prediction of IPTV Services,» *Acoustics, Speech and Signal Processing*, Las Vegas, NV, 2008.
- [221] Garcia M.-N. Schleicher R. Raake A., «Towards a content-based parametric video quality model for IPTV,» *Proceedings of the 3rd International Workshop on Perceptual Quality of Systems (PQS '10)*, Berlin, 2010.
- [222] Argyropoulos S. Raake A. Garcia M.-N, List P., «No-Reference Bit Stream Model for Video Quality Assessment of H.264/AVC Video Based on Packet Loss Visibility,» *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011.
- [223] Koumaras H. Kourtis A. Martakos D. Lauterjung J., «Quantified PQoS assessment based on fast estimation of the spatial and temporal activity level,» *Multimedia Tools and Applications*, sēj. 34, nr. 3, pp. 355-374, March 2007.
- [224] Lauterjung, J., «Picture Quality Measurement,» *Proceedings of the International Broadcasting Convention (IBC)*, Amsterdam, 1998.
- [225] Joskowicz J. Ardao J.C.L., «A Parametric Model for Perceptual Video Quality Estimation,» *Telecommunication Systems, Springer Special Issue on the Quality of Experience issues in Multimedia Provision*, 2012.
- [226] Ries M. Crespi C. Nemethova O. Rupp M., «Content Based Video Quality Estimation for H.264/AVC Video Streaming,» *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007*, 2007.
- [227] Gustafsson J. Heikkilä G. Pettersson M., «Measuring Multimedia Quality in Mobile Networks With an Objective Parametric Model,» *International Conference On Image Processing (ICIP) 2008*, San Diego, CA, 2008.
- [228] Media Networks Laboratory (MNL), «ADAMANTIUM: ADaptative Management of mediA distribution based on saTisfaction oriented User Modelling,» D4.1 - Voice and Video Quality Perceptual Models, Information and Communication Technologies.

- [229] Huynh-Thu Q., Ghanbari M., «Temporal Aspect of Perceived Quality in Mobile Video Broadcasting,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008.
- [230] Ou Y-Fu, Liu T, Zhao Z, Ma Z, Wang Y., «Modeling the impact of frame rate on perceptual quality of video,» *15th IEEE International Conference on Image Processing, 2008, ICIP 2008*, 2008.
- [231] Yen-Fu Ou, Zhan Ma, Yao Wang, «A novel quality metric for compressed video considering both frame rate and quantization artifacts,» *Proc. of VPQM'09*, Scottsdale, AZ, USA, 2009.
- [232] Joskowicz J, Carlos Lopez Ardao J., «Combining the Effects of Frame Rate, Bit Rate, Display Size and Video Content in a Parametric Video Quality Model,» *LANC'11*, Quito, Ecuador, 2011.
- [233] Shahid M, Rossholm A, Löfström B, Zepernick H-J., «No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches,» *EURASIP Journal on Image and Video Processing 2014*, p. 32, 2014.
- [234] ILV: International lighting vocabulary, «CIE S 017/E:2011,» Commission Internationale de L'Eclairage, 2011.
- [235] Malacara, D., *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications* 2nd ed, Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2011, 2011, p. 175.
- [236] McCamy, C.S., «Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates,» *Color Research and Application*, sēj. 17, nr. 2, pp. 142-144, April 1992.
- [237] Deffner G, Yuasa M, McKeon M, Arndt D., «Evaluation of Display-Image Quality: Experts vs. Non-Experts,» *SID Digest*, pp. 475-478, 1994.
- [238] Heynderickx I.E, Soren B., «Image quality assessment by expert and non-expert viewers,» *Human Vision and Electronic Imaging VII*, 2002.
- [239] Eye charts, 10 Oktobris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.psych.nyu.edu/pelli/charts.html>. [Piekļūts 21 Maijā 2015].
- [240] Pelli D.G, Robson J.G, Wilkins A.J., «The design of new letter chart for measuring contrast sensitivity,» *Clin. Vision Sci.*, sēj. 2, nr. 3, pp. 187-199, 1987.
- [241] Thayaparan K, Crossland M.D, Rubin G.S., «Clinical assessment of two new contrast sensitivity charts,» *Br.J.Ophthalmol*, 2007.
- [242] Winkler, S., «Analysis of public image and video databases for quality assessment,» *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, sēj. 6, nr. 6, pp. 616-625, October 2012.
- [243] Winkler, S., «stefan.winkler.net,» 5 Jūnijs 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://stefan.winkler.net/resources.html#Video>. [Piekļūts 27 Decembrī 2013].
- [244] Pinson M.H, Sue Boyd K, Hooker J, Muntean K., «How To Choose Video Sequences For Video Quality Assessment,» *7th International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics*, Arizona, 2013.
- [245] Pinson M.H, Barkowsky M, Le Callet P., «Selecting scenes for 2D and 3D subjective video quality tests,» *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, pp. 2-12, 2013.
- [246] CDVL, «The Consumer Digital Video Library,» 13 Marts 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.cdvl.org>. [Piekļūts 13 Martā 2014].
- [247] equasys, «equasys GmbH,» 13 Marts 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://download.equasys.de/downloadvideo.html>. [Piekļūts 21 Janvārī 2012].
- [248] Stocker; A.A, Simoncelli, E.P., «Noise characteristics and prior expectations in human visual speed perception,» *Nature Neuroscience*, sēj. 9, nr. 4, pp. 578-585, April 2006.
- [249] Wang, Z, Li, Q., «Video quality assessment using a statistical model of human visual speed perception,» *The Journal of the Optical Society of America A (JOSA A)*, sēj. 24, nr. 12, pp. B61-B69, December 2007.
- [250] Pauliks, R, Belahs, K, Tretjaks, K., «A Survey on Some Measurement Methods for Subjective Video Quality Assessment,» *Journal of Multimedia Processing and Technologies (JMPT)*, sēj. 3, nr. 2, pp. 113-123, 2013.
- [251] Pauliks, R, Slaidins, I., «Impact of Video Content and Technical Specifications on Subjective Quality Assessment,» *Electronics and Electrical Engineering*, sēj. 122, nr. 6, pp. 91-96, 2012.
- [252] Pauliks, R, Slaidins, I., «Quality Evaluation of Synthetic Video in Simultaneous Double Stimulus Environment,» *IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 2013.
- [253] G.1050, «Network model for evaluating multimedia transmission performance over Internet Protocol,» ITU-T, Geneva, Switzerland, 2011.
- [254] G.8261, «Timing and synchronization aspects in packet networks,» ITU-T, Geneva, Switzerland, 2013.

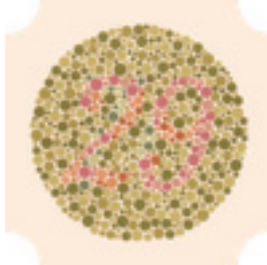
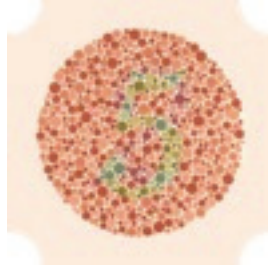
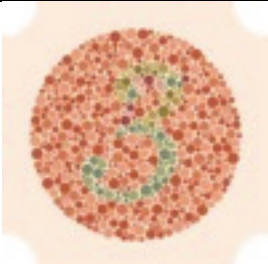
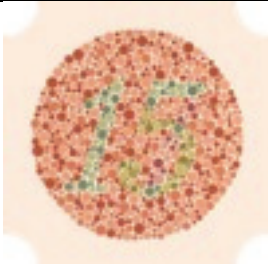
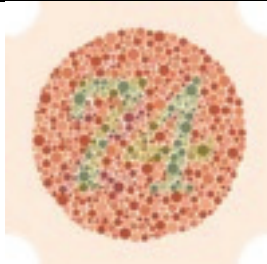
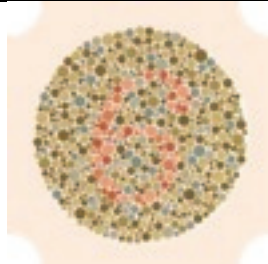
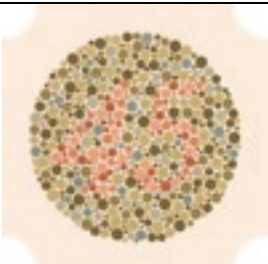
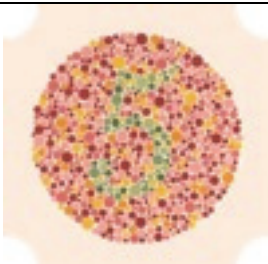
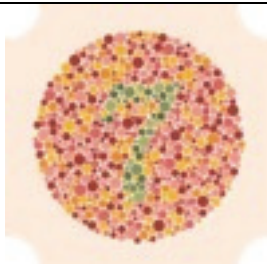
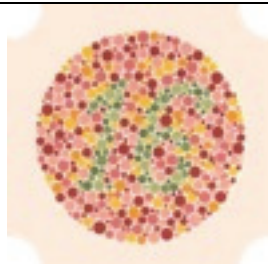
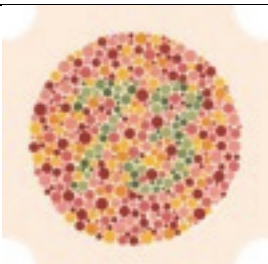
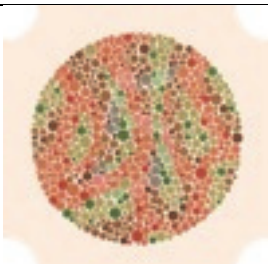
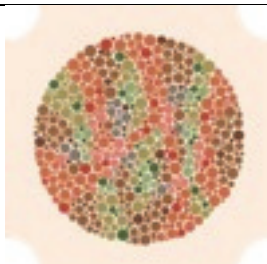
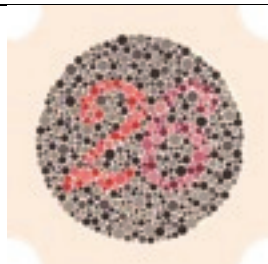
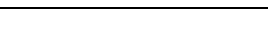
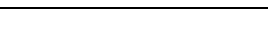
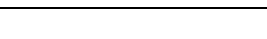
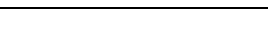
- [255] Reichl, P. Tuffin, B. Schatz, R., «Logarithmic laws in service quality perception: where microeconomics meets psychophysics and quality of experience,» *Telecommunication Systems*, pp. 1-14, 2011.
- [256] Gozdecki, J., Jajszczyk, A., Stankiewicz, R., «Quality of service terminology in IP networks,» *IEEE Communications Magazine*, sēj. 41, nr. 3, pp. 153-159, March 2003.
- [257] Jumisko-Pyykkö, S. Häkkinen J., «Profiles of the evaluators: impact of psychographic variables on the consumer-oriented quality assessment of mobile television,» *Multimedia on Mobile Devices 2008*, 2008.
- [258] Streaming, Apple HTTP Live, 16 Aprīlis 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://developer.apple.com/streaming/>. [Piek]ūts 16 Aprīlī 2014].
- [259] Ostaszewska A. Kłoda R., «Quantifying the amount of spatial and temporal information in video test sequences,» *7th International Symposium on Mechatronics*, Warsaw, 2007.
- [260] Staelens N., Van Wallendael G. Van De Walle R. De Turck F. Demeester P., «High definition H.264/AVC subjective video database for evaluating the influence of slice losses on quality perception,» *5th International Workshop on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2013*, Klagenfurt am Worthersee, 2013.
- [261] De Simone F. Tagliasacchi M. Naccari M. Tubaro S. Ebrahimi T., «A H.264/AVC video database for the evaluation of quality metrics,» *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2010*, Dallas, 2010.
- [262] De Simone F. Naccari M. Tagliasacchi M. Dufaux F. Tubaro S. Ebrahimi T., «Subjective assessment of H.264/AVC video sequences transmitted over a noisy channel,» *International Workshop on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2009*, San Diego, 2009.
- [263] Bouten N. Famaey J. Latre S. Huysegems R. De Vleeschauwer B. Van Leekwijck W. De Turck F., «QoE optimization through in-network quality adaptation for HTTP adaptive streaming,» *Proceedings of the 2012 8th International Conference on Network and Service Management, CNSM 2012*, 2012.

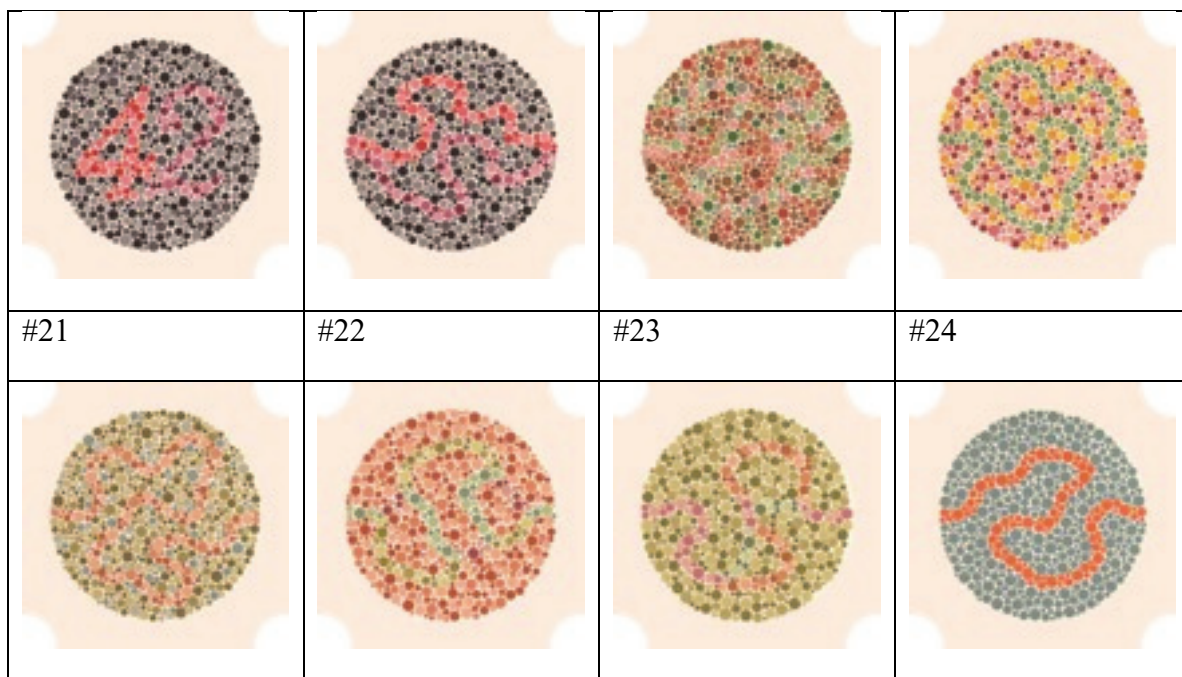
PIELIKUMI

1. pielikums

“Respondentu redzes un krāsu izšķirtspējas pārbaudes tests”

Ishihara krāsu izšķirtspējas pārbaudes tests (kartiņas)

#1	#2	#3	#4
			
#5	#6	#7	#8
			
#9	#10	#11	#12
			
#13	#14	#15	#16
			
#17	#18	#19	#20
			



Ishihara krāsu atšķirtspējas pārbaudes tests (anketa)

#N	Ko Jūs redzat? (skaitli, līnijas)	Normāla redze	Sarkanās, zaļās krāsas redzes trūkumi	Krāsu redzes aklums
#1		12	12	12
#2		8	3	-
#3		29	70	-
#4		5	2	-
#5		3	5	-
#6		15	17	-
#7		74	21	-
#8		6	-	-
#9		45	-	-
#10		5	-	-
#11		7	-	-
#12		16	-	-
#13		73	-	-
#14		-	5	-
#15		-	45	-
#16		26	2 vai 6 vai 26	-

#17		42	4 vai 2 vai 42	-
#18		Līnija	Līnija (citās krāsās)	-
#19		-	Līnija	-
#20		Līnija	- (citā vietā)	-
#21		Līnija	- (citā vietā)	-
#22		Līnija	Līnija (citās krāsās)	-
#23		Līnija	Līnija (citās krāsās)	-
#24		Līnija	Līnija	Līnija

#N	Piezīmes
#1	Cilvēki ar normālu krāsu redzi, kā arī cilvēki ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem var nolasīt skaitli 12.
#2	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 8. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 3, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#3	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 29. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 70, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#4	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 5. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 2, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#5	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 3. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 5, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#6	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 15. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 17, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#7	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 74. Cilvēkiem ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 21, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar nolasīt neko.
#8	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 6. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.
#9	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 45. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.
#10	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 5. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.
#11	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 7. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.

#12	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 16. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.
#13	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 73. Vairums cilvēku ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt vai arī nolasa nepareizu skaitli.
#14	Vairums cilvēku ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 5. Vairums cilvēku ar normālu krāsu redzi un cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar saskatīt neko.
#15	Vairums cilvēku ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem saskata 45. Vairums cilvēku ar normālu krāsu redzi un cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar saskatīt neko.
#16	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 26. Protanopijas un protanomālijas gadījumā var saskatīt tikai 6, bet vieglas formas protanomālijas gadījumā iespējams saskatīt divus ciparus, bet salīdzinājumā ar citiem cipariem 6 ir izteikti saskatāms. Deiteranopijas un spēcīgas deiteranomālijas gadījumā var saskatīt tikai 2, bet vieglas formas deiteranomālijas gadījumā iespējams saskatīt divus ciparus, bet salīdzinājumā ar citiem cipariem 2 ir izteikti saskatāms.
#17	Cilvēki ar normālu krāsu redzi nolasa 42. Protanopijas un protanomālijas gadījumā var saskatīt tikai 2, bet vieglas formas protanomālijas gadījumā iespējams saskatīt divus ciparus, bet salīdzinājumā ar citiem cipariem 2 ir izteikti saskatāms. Deiteranopijas un spēcīgas deiteranomālijas gadījumā var saskatīt tikai 4, bet vieglas formas deiteranomālijas gadījumā iespējams saskatīt divus ciparus, bet salīdzinājumā ar citiem cipariem 4 ir izteikti saskatāms.
#18	Cilvēki ar normālu krāsu redzi var izsekot violetai un sarkanai līkumotai līnija starp diviem atzīmētiem punktiem X. Protanopijas un protanomālijas gadījumā var izsekot tikai violetai līnijai, bet vieglas formas protanomālijas gadījumā iespējams izsekot abas līnijas, bet salīdzinājumā ar citām līnijām violetai līnijai ir vieglāk izsekot. Deiteranopijas un spēcīgas deiteranomālijas gadījumā var izsekot tikai sarkanai līnijai, bet vieglas formas deiteranomālijas gadījumā iespējams izsekot abas līnijas, bet salīdzinājumā ar citām līnijām sarkanai līnijai ir vieglāk izsekot.
#19	Cilvēki ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem var izsekot līkumotai līnija starp diviem atzīmētiem punktiem X. Vairums cilvēku ar normālu krāsu redzi un cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar saskatīt neko.

#20	Cilvēki ar normālu krāsu redzi var izsekot zilgani zaļai līnijai, bet vairums cilvēku ar krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt neko vai arī saskata līnijas tur, kur to nav.
#21	Cilvēki ar normālu krāsu redzi var izsekot oranžai līnijai, bet vairums cilvēku ar krāsu redzes trūkumiem nevar saskatīt neko vai arī saskata līnijas tur, kur to nav.
#22	Cilvēki ar normālu krāsu redzi var izsekot zilgani zaļai un dzeltenī zaļai līkumotai līnijai. Cilvēki ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem var izsekot zilgani zaļai un violetai līnijai, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar saskatīt neko.
#23	Cilvēki ar normālu krāsu redzi var izsekot violetai un oranžai līkumotai līnijai. Cilvēki ar sarkanās un zaļās krāsas redzes trūkumiem var izsekot violetai un zilgani zaļai līnijai, bet cilvēki ar krāsu redzes aklumu nevar saskatīt neko.
#24	Cilvēki ar normālu krāsu redzi, kā arī cilvēki ar jebkāda veida krāsu redzes trūkumiem var izsekot līkumotai līnijai starp diviem atzīmētiem punktiem X.

Snellen vispārējās redzes asuma pārbaudes tests (kartīņa un anketa)

Attēlā pa kreisi ir attēlota vispārējās redzes asuma pārbaudes kartīņa, bet attēlā pa labi respondentu anketa ar tukšiem laukiem, kuri jāaizpilda 30-45 sekunžu laikā.

E	1	E	1
F P	2	F P	2
T O Z	3	T O Z	3
L P E D	4	L P E D	4
P E C F D	5	P E C F D	5
E D F C Z P	6		6
F E L O P Z D	7		7
D E F P O T E C	8		8
L E F O D P C T	9		9
F D P L T C E O	10	F D P L T C E O	10
P E Z O L C F T D	11	P E Z O L C F T D	11

Pelli-Robson kontrasta jūtības pārbaudes tests (kartiņa un anketa)

Attēlā pa kreisi ir attēlota kontrasta jūtības pārbaudes kartiņa, bet attēlā pa labi respondentu anketa ar tukšiem laukiem, kuri jāaizpilda 60 sekunžu laikā.

PELLI-ROBSON CONTRAST SENSITIVITY CHART ————— 18/24 ————— V R S K D R N H C S O K S C N O Z V C N H Z O K N O D V H R C D N Z S V K C H O D K R S Z H V R	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																

2. pielikums

“Testgultnes aprīkojuma tehniskās specifikācijas”

LCD displejs

LCD monitors Ikegami	
Ekrāns 32 collu (a-SiTFT RGB matrica)	10 bitu krāsas, 4:2:2, 1920(H) x 1080(V)
Ekrāna izšķirtspēja, proporcija, skata leņķis	pikselis-pikselī 1920x1080, 16:9, 178 grādi
Ekrāna krāsas, kontrasts, spilgtums	1.07miljards (RGB 10biti), 1300:1, 500cd/m2
Iebūvēts vektroskops, viļņu formas monitors, IRE, testa signāli, kalibrēšana	AWB atbilstoši krāsu temperatūrai xyY, kā arī krāsu temperatūras (xy) un spilgtuma (L) mērījumi. Testa signāli kalibrēšanai, u.c.
Video formāti	1080, 720, 576, 480, xVGA, i/p, fps 60, 50, 30, 25, 24, u.c. Ļoti milzīgs video un audio formātu skaits, katram interfeisam specifiski
Iebūvēti video un audio interfeisi	2x HD/SD-SDI In 2x CVBS/CCVS In 1x DVI-D (HDMI) Single Link 24p In 1x audio L/R RCA In, skaļruņi, austiņas
Video un Audio interfeisa plates	1x YPbPr/RGB BNC In 1x PC/VGA DE-15 In 2x 3G-HD-SDI 2x CVBS/CCVS In Dažādu kombināciju 2,4-8 kanālu BNC analogais un ciparu audio XLR un AES/EBU
Specializēti interfeisi un vadības pogas	Specializēti interfeisi sinhronizācijai, testēšanai, attālinātai vadībai (sync BNC, RS-485, DB-9/RS-232/test/remote), u.tml. Priekšējā paneļa vadības pogas, kļūdu diagnostikas lampiņas un USB kalibrēšanai
Distances vadība	IrDA pults un virknes porta kontrolieris

LCD statīvs	Pielāgojams ekrāna augstums, horizontāli, vertikāli grozāms, viegli pārvietojams
-------------	--

Video servera (*HE*) un klientu (*STB*) simulācijas aparatūra un programmatūra

Video interfeisa kartes: AJA Kona 3G	
Video un Audio interfeisi	2x 3G/SD/HD SDI video In 2x 3G/SD/HD SDI video Out Single un Dual Link 4:2:2, 4:4:4 HDMI, YPbPr, RGB, Y/C, CVBS/CCVS Video un audio izvadi (6 porti), paplašināts ar 19' collu izvada komutatoru (31 ports) Dažādu kombināciju 2,8-16 kanālu BNC analogais un ciparu audio AES/EBU
Video un Audio formāti	PAL, NTSC, SDTV, HDTV, xVGA 1080, 720, 576, 480, xVGA, i/p, fps 60, 50, 30, 25, 24, u.c. Ļoti milzīgs video un audio formātu skaits, katram interfeisam specifiski Analogais un ciparu audio AES/EBU
Aparatūriskā video konvertācija	10bitu up/down/cross konvertācija, ekrāna proporciju konvertācija, piemēram, 1080i uz 720p, 720p uz 1080i, u.tml.
Video proporciju konvertācija	Parasti mainot attēla ekrāna <i>H</i> vai <i>V</i> proporcijas pievienot melnas apmales, piemēram, <i>Letterbox</i> , <i>H Crop</i> , <i>V Crop</i> , <i>Pillarbox</i> , u.tml.
Specializēti interfeisi	Specializēti interfeisi sinhronizācijai, testēšanai, attālinātai vadībai (<i>sync BNC</i> , <i>DB-9/RS-422/test/remote</i>)
Serveris: MacPro, OSX	CPU Xeon 12 kodoli, RAM 16GB, HDD 512GB SSD, Ethernet 1Gbps
Datu centrs: JMR 10xSAS RAID	PCI Express x16 pieslēgums pie <i>MacPro</i> , datu apjoms 20TB, pārraides ātrums 8Gbps

Klients: MacBook Pro, OSX	<i>CPU i7 4 kodoli, RAM 8GB RAM, HDD 256GB SSD</i>
----------------------------------	--

Pārraidē tīkla (Ethernet, IP, MPEG) emulācijas aparātūra un programmatūra

Pārraidē tīkla emulācijas aprīkojums	
Pieslēgums Ethernet/IP	1Gbps in un 1Gbps out
Tīkla protokolu atbalsts	<i>Ethernet, IP, UDP, TCP, RTP, MPEG-TS, VLAN, MPLS</i>
Pārraidē tīkla caurlaides spējas simulācijas	Caurlaides spējas ierobežojumi <i>Tx</i> un <i>Rx</i> , Burst (min,avg,max vai konkrēts skaits)
Pārraidē kļūdu simulācijas	<i>Ethernet FCS error, TCP, UDP</i> un <i>IP</i> checksum error, packet- delay, jitter, drop, duplicate, reorder, modify (corruption, injection)
MPEG līmeņa kļūdu simulācijas	TS packet modify (corruption, injection), I,P,B frame drop, corrupt
IP tīkla simulācijas atbilstoši [253] (TIA-921)	Aizture un trīce kombinācijas. Base (serialization) delay, Load dependent jitter, Random Jitter
IP tīkla sinhronizācijas simulācijas atbilstoši [254] (Y.1361)	<i>IP-TDM</i> tīkla jitter, wander un sinhronizācijas tolerances simulācijas
Pārraidē tīkla emulācijas scenāriji	Pakešu zudumu, aizture, tīces lielumam var norādīt konkrētu vērtību (skaits, sekundes, min,avg,max), vai arī piemērot kādu no sadalījumiem: periodic, uniform, poisson, gaussian, Internet/self-similar.

Aparātūra un programmatūra apgaismojuma un krāsas mērījumiem

Apgaismojuma (Illuminance) mērīšana	Kimo LX200 luksometrs (<i>Lux</i>), telpas apgaismojuma mērīšana, diapazons 0.1-200.000 Lux, precizitāte 5% robežās
Spilgtuma (Luminance) mērīšana	Konica Minolta LS-100 spilgtuma (<i>cd/m2</i>) mērītājs, punktveida gaismas

	avota virsmas spilgtuma mērīšana, minimālais mērīšanas attālums 15mm, redzes leņķis 9°, diapazons 0.001-0.999 <i>cd/m2</i> , precizitāte 2% robežās
Krāsu (Color Meter) mērīšana	Konica Minolta CL-200A apgaismojuma un krāsu mērītājs, telpas apgaismojuma krāsu mērīšana (<i>CIE</i> standartam trihromātisko <i>XYZ</i> mērīšana ar precizitāti 6% robežās), diapazons 0.01-99.990 lx (krāsu mērījumi sākot ar 5 lx), precizitāte 3% robežās
Lāzera stara attāluma mērītājs	Lāzera mērītājs attālumam līdz 50m
Telpas mikroklimata mērīšana Trokšņa līmeņa, temperatūras, mitruma, CO ₂ un caurvēja datu mērīšana un reģistrēšana	Trokšņa līmeņa (dB, 0-130dB, 10Hz-20KHz), temperatūras (C°, -10 līdz +60), mitruma (5-95%), CO ₂ (0-2000ppm), caurvēja (0-10m/s) monitoringam
[22], [127] un [128] prasībām atbilstoša eksperimentu veikšanas telpa	Testēšanas telpa 25m ² telpa, aptuveni 5m x 5m

Aparatūra un programmatūra

<i>IP</i> un <i>DVB</i> apraides un straumēšanas aprīkojums no <i>Tektronix</i> . <i>MPEG-TS</i> video (<i>MPEG-2</i> , <i>H.264 AAC</i>), audio un datu plūsmu multipleksēšanai, analīzei (bitu, baitu plūsmu un pakešu analīze): <i>MPEG-TS</i> , <i>PES</i> , <i>ES</i> , <i>Buffer analyzer</i> . Sagatavot video apraidei <i>DVB</i> un straumēšanai <i>Ethernet/IP/UDP/RTP</i> . Interfeisi: <i>Ethernet 1Gbps</i> , <i>ASI in</i> un <i>Out</i> , <i>DVB SPI In</i> un <i>Out</i> , <i>COM/RS232</i> , <i>VGA</i> , u.c.
<i>Ethernet/IP</i> maršrutēšanas un komutācijas emulēšanas aprīkojums no <i>Agilent/ixia</i> . <i>Ethernet/IP</i> veikspējas mērījumi, <i>MDI</i> mērījumi, <i>IGMP</i> (joint, leave) ziņojumu emulācijas aprīkojums. 1x <i>Ethernet In</i> un 1x <i>Etehernet Out 1Gbps</i> .
<i>DVB</i> apraides aprīkojums no <i>DekTec</i> . <i>DTU-215 DVB</i> modulators (modulācijas metodes <i>QAM</i> un <i>OFDM</i> , frekvence no 47MHz līdz 1GHz). <i>DTU-205 ASI</i> un <i>SDI</i> video signālu ģenerators un uztvērējs 2x <i>ASI</i> un <i>SDI In</i> un <i>Out</i> , kā arī dažādu ražotāju dekoderi, antenas, kabeļi, savienotāji, dalītāji, vājinātāji, u.tml.

<i>Ethernet</i> un IP tīkla aprīkojums: Cisco <i>IOS</i> komutatori, maršrutētāji, kā arī atsevišķiem darbiem dažādas tīkla iekārtas (maršrutētāji, komutatori, konvertori) no D-Link, Linksys, u.c.
Operētājsistēmas: <i>Mac OSX</i> (v10.5-10.9) , <i>Windows XP</i> un 7; atsevišķiem darbiem: <i>Mac OS X Server</i> (v10.5-10.9), <i>Windows Server 2008 R2</i>, <i>Unix</i>, <i>Linux</i> dažādas versijas, kā arī dažādi citi emulatori, piemēram, virtuālās mašīnas <i>Vmware</i>, u.c.
Apple: <i>Final Cut Pro X</i>, <i>QuickTime Pro</i>, <i>Compressor</i>, <i>iTunes</i>, <i>QuickTime Streaming Server (QTSS)</i>, <i>Darwin Streaming Server</i>, <i>QuickTime Broadcaster</i>. Straumēšanas programmatūra: Apple HTTP Live Streaming (<i>HLS</i>), Adobe HTTP Dynamic Streaming (<i>HDS</i>), <i>Adobe Flash Media Server RTMP</i> streaming, <i>Microsoft Multimedia Streaming</i>, <i>Smooth Streaming</i>, kā arī <i>RealNetworks Helix Universal Server</i> un <i>Wowza Media Systems Server</i>. Atvērtā koda un komerciāla video rediģēšanas, straumēšanas, kodēšanas un mērīšanas programmatūra: <i>VLC</i>, <i>x264</i>, <i>FFmpeg</i>, <i>4T2 Content Analyzer</i>, <i>K-lite Codec Pack</i>, <i>MediaInfo</i>, <i>Avidemux</i>, <i>tsMuxer</i>, <i>TSReader</i>, <i>Sunray Image YUV Player</i>, <i>converter</i>, <i>analyzer</i>, <i>Elecard Converter Studio Pro</i>, <i>Wireshark</i>, kā arī ļoti daudz citu rīku atsevišķu specifisku uzdevumu izpildei.
Aprēķiniem, analīzei un simulācijām: <i>JMP Pro</i> (statistical analysis software from SAS), <i>Weka</i> (data mining software), <i>StatPlus:mac</i>, <i>MS Excel Analysis Toolpak</i>, <i>Matlab&Simulink</i> (video and image processing, DVB-T, DVB-C, DVB-S2 simulation).

3. pielikums

“Datoru un TV ekrānu proporcijas un izšķirtspējas”

Ekrāna HxV izmērs	Ekrāna proporcija	Pielietojums*	Apzīmējums
176 x 144	4:3	TV	<i>QCIF</i>
352 x 288	4:3	TV	<i>CIF</i>
720 x 480	4:3 un 16:9	TV	<i>NTSC (DV)</i>
720 x 486	4:3 un 16:9	TV	<i>NTSC (DI)</i>
720 x 540	4:3	TV	<i>NTSC (4:3)</i>
864 x 486	16:9	TV	<i>NTSC widescreen</i>
720 x 576	4:3 un 16:9	TV	<i>PAL (DI/DV)</i>
768 x 576	4:3	TV	<i>PAL (4:3)</i>
1024 x 576	16:9	TV	<i>PAL widescreen</i>
960 x 720	16:9	TV	<i>DVCPRO HD 720</i>
1280 x 720	16:9	TV	<i>HDTV 720</i>
1366 x 768			
1280 x 1080	16:9	TV	<i>DVCPRO HD 1080</i>
1440 x 1080	16:9	TV	<i>HDV</i>
1440 x 1080	16:9	TV	<i>AVCHD</i>
1920 x 1080	16:9	TV	<i>HDTV 1080</i>
3840 x 2160	16:9	TV	<i>4K</i>
7680 x 4320	16:9	TV	<i>8K</i>
2048 x 1080		DCI	<i>2K DCI</i>
1998 x 1080			
4096 x 2160		DCI	<i>4K DCI</i>
4096 x 1716			
3996 x 2160			
320 x 200	16:10	PC	<i>CGA</i>
320 x 240	4:3	PC	<i>QVGA</i>
640 x 480	4:3	PC	<i>VGA</i>
800 x 600	4:3	PC	<i>SVGA</i>
854 x 480	16:9	PC	<i>WVGA</i>
1024 x 768	4:3	PC	<i>XGA</i>
1152 x 768	3:2	PC	<i>XGA+</i>
1280 x 800	16:10	PC	<i>WXGA</i>
1280 x 854	3:2		
1280 x 960	4:3		
1440 x 900	16:10		
1440 x 960	3:2		
1280 x 1024	5:4		<i>SXGA</i>
1400 x 1050	4:3		<i>SXGA+</i>
1440 x 900	16:10	PC	<i>WXGA</i>
1440 x 960	3:2		
1600 x 1200	4:3	PC	<i>UXGA</i>

1680 x 1050	16:10	PC	<i>WSXGA+</i>
1920 x 1200	16:10	PC	<i>WUXGA</i>
2048 x 1536	4:3	PC	<i>QXGA</i>
2560 x 1600	16:10	PC	<i>WQXGA</i>
2560 x 2048	5:4	PC	<i>QSXGA</i>
3200 x 2048	16:10	PC	<i>WQSXGA</i>
3200 x 2400	4:3	PC	<i>QUXGA</i>
3840 x 2400	16:10	PC	<i>WQUXGA</i>
4096 x 3072	4:3	VC	<i>HXGA</i>
5120 x 3200	16:10	VC	<i>WHXGA</i>
5120 x 4096	5:4	VC	<i>HSXGA</i>
6400 x 4096	25:16	VC	<i>WHSXGA</i>
6400 x 4800	4:3	VC	<i>HUXGA</i>
6400 x 4800	8:5	VC	<i>WHUXGA</i>

*TV- televīzijas un video aprīkojums, *PC*- datora monitori, *VC*- video kameras, *DCI*- Digital Cinema Initiatives organizācijas apstiprinātie

4. pielikums

“RGB-CIE (xyz) korelācijas matricu aprēķins”

Ļoti svarīgi ir izvēlēties mērījuma apstākļiem atbilstošus trīs gaismas avotu vērtības. Korelācijas matricai tika izvēlēts sekojoši gaismas avoti: viens no augšējā diapazona (luminiscences 6500K), otrs no vidus (luminiscences 4500K), trešais no apakšējā diapazona (60W kvēlspuldze 3000K).

Korelācijas matricu (C) iegūst trihromātisko matricu (T) reizinot ar inversu sensoru matricu pēc $C=T*S^{-1}$.

C	$=$	X_{60W}	X_{3000}	X_{6500}	$*$	R_{60W}	R_{3000}	R_{6500}	-1
		Y_{60W}	Y_{3000}	Y_{6500}		G_{60W}	G_{3000}	G_{6500}	
		Z_{60W}	Z_{3000}	Z_{6500}		B_{60W}	B_{3000}	B_{6500}	

C	$=$	26.9	274.7	321.8	$*$	67.5	226.5	226.5	-1
		22.9	262.2	360.5		43.0	256.5	415.0	
		4.9	96.5	335.5		31.5	94.5	302.0	

C	$=$	26.9	274.7	321.8	$*$	0.02261	-0.02779	0.02122	
		22.9	262.2	360.5		0.00005	0.00783	-0.01080	
		4.9	96.5	335.5		-0.00237	0.00045	0.00448	

C	$=$	-0.14282	1.54924	-0.95641	
		-0.32466	1.57837	-0.73191	
		-0.68202	0.77073	0.56332	

Līdzko korelācijas matrica (C) ir iegūta, tad var veikt RGB sensoru matricas datu pārveidošanu uz trihromātiskajām XYZ ekvivalentu vērtībām pēc $T=C*S$. Iegūtā matrica izmantota 3.3. tabulas matricas aprēķinam.

X	$=$	-0.14282	1.54924	-0.95641	$*$	R
Y		-0.32466	1.57837	-0.73191		G
Z		-0.68202	0.77073	0.56332		B

Turpmāk tekstā CCT aprēķina piemērs standarta fluorescentam apgaismojuma avotam (dienas gaismas spuldze 3000K). Apgaismojuma avotam iegūti sekojoši RGB sensora mērījumi: R=231, G=260 un B=95. Nākamajā solī iegūtās vērtības ievieto 3.3. tabulas matricas aprēķinam.

X		(-0.14282) (231)		(1.54924) (260)		(-0.95641) (95)		279.0
Y	=	(-0.32466) (231)	+	(1.57837) (260)	+	(-0.73191) (95)	=	265.8*
Z		(-0.68202) (231)		(0.77073) (260)		(0.56332) (95)		96.4

* Spilgtums = (-0.32466) (231) + (1.57837) (260) + (-0.73191) (95) = 265.8 Lux

Nākamajā solī ir veic aprēķinu atbilstoši (3.3). formulai.

$$x = (279.0) / (279.0+265.8+96.4) = 0.4351$$

$$y = (265.8) / (279.0+265.8+96.4) = 0.4146$$

Pēdējā solī veic aprēķinu atbilstoši (3.2). formulai.

$$n = (0.4351-0.3320) / (0.1858-0.4146) = -0.4504$$

$$CCT = (449.0) * (-0.4504)^3 + (3525.0) * (-0.4504)^2 + (6823.3) * (-0.4504) + 5520.33 = 3121K.$$

5. pielikums

“CIE krāsu telpu pārveidojumi”

Konvertācijai no CIE 1931 XYZ trihromātiskajām vērtībām uz CIE L*a*b* (CIELAB) un CIE L*u*v* (CIELUV) izmanto sekojošu funkciju [48]:

$$g(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}}, & \text{ja } x > 0.008856 \\ 7.787x + \frac{16}{116}, & \text{citos gadījumos} \end{cases}$$

CIE L*a*b* un CIE L*u*v* izmanto kopēju spilgtuma komponenti L*:

$$L^* = 116g\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16$$

Nultais indekss nozīmē, ka atskaites punktam tiek izmantota baltā krāsa, kur L*=100, u*=0, v*=0 un a*=0, b*=0.

Krāsu telpas CIE L*u*v* divu krāsu atšķirību koordinātes u* un v* aprēķina:

$$u^* = 13L^*(u' - u'_0), u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_0), v' = \frac{9X}{X + 15Y + 3Z}$$

un CIE L*u*v* krāsu atšķirību iegūst pēc formulas:

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

Krāsu telpas CIE L*a*b* divu krāsu atšķirību koordinātes a* un b* aprēķina:

$$a^* = 500 \left[g\left(\frac{X}{X_0}\right) - g\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[g\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - g\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right]$$

un CIE L*a*b* krāsu atšķirību iegūst pēc formulas:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

6. pielikums

“Video konteineri un kodētāji”

Izstrādātājs	Konteineris	Kodētājs
MPEG, ISO/IEC, ITU	MPEG-TS- Transport Stream (MPEG-2 P1, H.222.0); ts, tsv, tsa, m2ts, mts, m2t, tod, mod, ...	H.263, MPEG-4 P2, H.264 AVC P10, H.265/MPEG-H P2, kā arī jebkādu citu video, audio kodētāju, statisku attēlu, subtitri, metadati, u.tml., piemēram, JPEG2000, AVCHD, x264...
	MPEG-4 P14 mp4, m4v, m4a, 3gp, 3gp2...	
Apple Inc.	QTFF- QuickTime File Format; mov, qt, m4v, m4a, m4b...	Apple Video; QuickTime Graphics; ProRes422, 444, kā arī jebkādu citu
Microsoft	ASF- Advanced Systems Format un AVI- Audio Video Interleaved; asf, avi...	VC-1/ SMPTE 421M; wmv, kā arī jebkādu citu
Adobe Inc.	Flash Video; flv, f4v, f4a, f4b...	SWF, kā arī jebkādu citu
Atvērtie formāti	mkv	x264, x265, OpenH264, kā arī jebkādu citu
	Ogg	Theora, Xvid, kā arī jebkādu citu
	WebM	VP8, VP9, kā arī jebkādu citu
	AVS	AVS, kā arī jebkādu citu

Komerציālā *MPEG* video kodētāju alternatīvas no brīvpieejas un bezmaksas atvērtā koda iniciatīvām, tā saucamiem bez autoratlīdzības (*royalty-free*) kodētājiem.

	On2	Google	Microsoft	BBC RD	Ķīna	Xiph	Xvid	x264	x265	Cisco
MPEG-1 P2			VC-1							
MPEG-2/ H.262 P2			VC-1	Dirac						
MPEG-4/ H.264 P2	VP3		VC-1	Dirac		Theora	Xvid			
AVC/ H.264 P10		VP8	VC-1	Dirac Pro/VC-2	AVS			x264		Open H264
HEVEC/ H.265		VP9				Daala			x265	

Komerčiālā MPEG konteineru alternatīvas no brīvpieejas un bezmaksas atvērtā koda iniciatīvām, tā saucamiem bez autoratlīdzības (royalty-free) konteineriem.

	Google	Ķīna	Xiph	Matroska
MPEG-1 Part 1 un MPEG-TS, MPEG-2 Part 1, H.222.0, TS				MKV
MPEG-4 Part 12 un MPEG-4 Part 14 MOV, MP4, 3GP, Motion JPEG	WebM	AVS	Ogg	MKV

7. pielikums

“Video attēla un pikseļu malu attiecība”

Video attēla malu attiecība (*frame aspect ratio*)

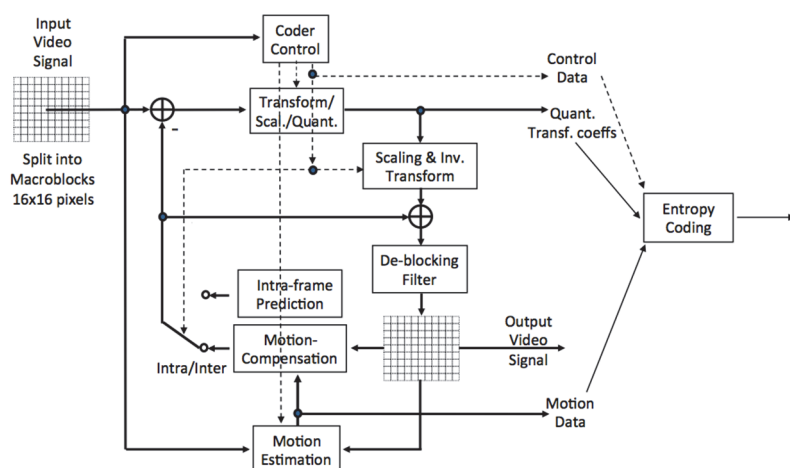
Attēla malu attiecība		Pielietojums
1:1	(1:1)	Specifiska pielietojuma foto kamerām
3:2	(1.5:1)	Vairums ciparu (<i>DSLR- Digital Single-Lens Reflex camera</i>) foto kamerām 36x24mm un 35mm foto un video kamerām
4:3	(1.33:1)	Standarta izšķirtspēja TV (<i>PAL, NTSC</i>) un datora displejiem (<i>VGA, XGA, UXGA, QXGA</i>), kā arī vairums ciparu foto kamerām
5:4	(1.25:1)	Datora displeja (<i>SVGA</i>) izšķirtspēja
16:9	(1.77:1)	Platekrāna standarta izšķirtspējas TV (<i>SDTV</i>) un augstas izšķirtspējas TV (<i>HDTV</i>)
16:10	(1.6:1)	Platekrāna datora displeju (<i>WXGA, WUXGA, WQXGA</i>) izšķirtspēja

Pikseļu malu attiecība (*pixel aspect ratios*)

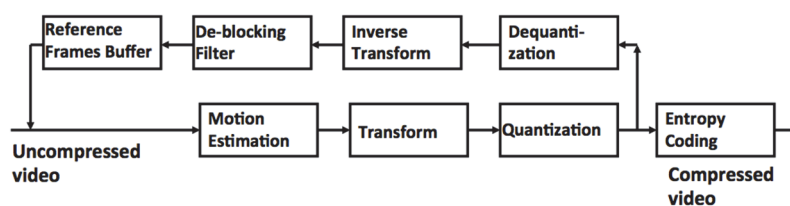
Pikseļa malu attiecība	Pielietojums
1.00	Standarta izšķirtspēja ar pikseļa malu attiecību 1:1
0.90	<i>NTSC</i> signāla kadra izmēra 720x480 (<i>DV</i>) vai 720x486 (<i>D1</i>) attēlošana uz 720x540 (4:3 ekrānam)
1.07	<i>PAL</i> signāla kadra izmēra 720x576 (<i>DI/DV</i>) attēlošana uz 768x576 (4:3 ekrānam)
1.20	<i>NTSC</i> platekrāna kadra izmēra 720x480 (<i>DV</i>) vai 720x486 (<i>D1</i>) attēlošana uz 864x486 (16:9 ekrānam)
1.42	<i>PAL</i> platekrāna kadra izmēra 720x576 (<i>DI/DV</i>) attēlošana uz 1024x576 (16:9 ekrānam)

8. pielikums

“H.264 AVC P10 kodētājs”



H.264 kodētāja blokshēma (Encoder Block Diagram)



H.264 kodētāja bloku maskēšanas filtra blokshēma (In-Loop De-blocking Filter)

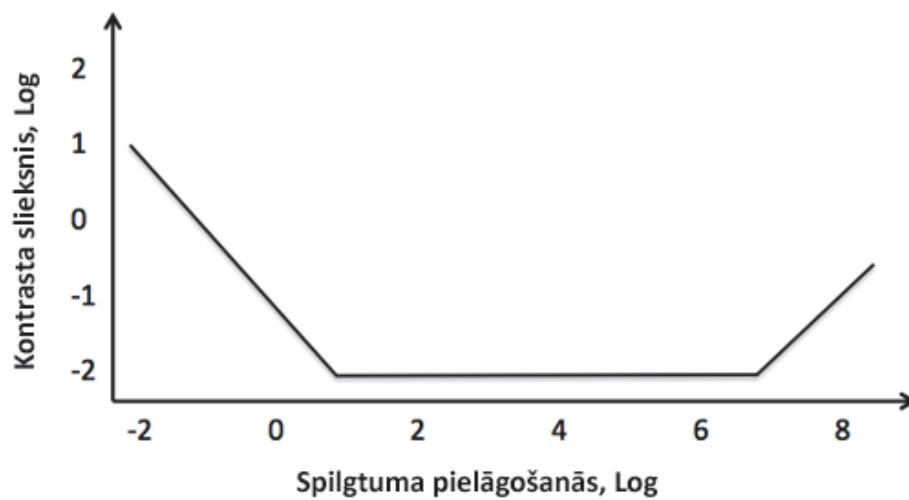
Level number	Picture size	Max. FPS picture size	Max. compressed bit rate	Max. number of reference frames for typ. pict. size
1	QCIF	15	64 kbps	4
1.1	320x240 QCIF	10 30	192 kbps	3 9
1.2	CIF	15	384 kbps	6
1.3	CIF	30	768 kbps	6
2	CIF	30	2 Mbps	6
2.1	HR	30/25	4 Mbps	6
2.2	SD	15	4 Mbps	5
3	SD	30/25	10 Mbps	5
3.1	1280x720p	30	14 Mbps	5
3.2	1280x720p	60	20 Mbps	4
4	HD 720p, 1080i	60p/30i	20 Mbps	4
4.1	HD 720p, 1080i	60p/30i	50 Mbps	4
4.2	1920x1080p	60p	50 Mbps	4
5	2k x 1k	72	135 Mbps	5
5.1	2k x 1k 4k x 2k	120 30	240 Mbps	5

H.264 kodētāja profili un līmeņi (MPEG-4 Part 10 AVC: Basic Levels)

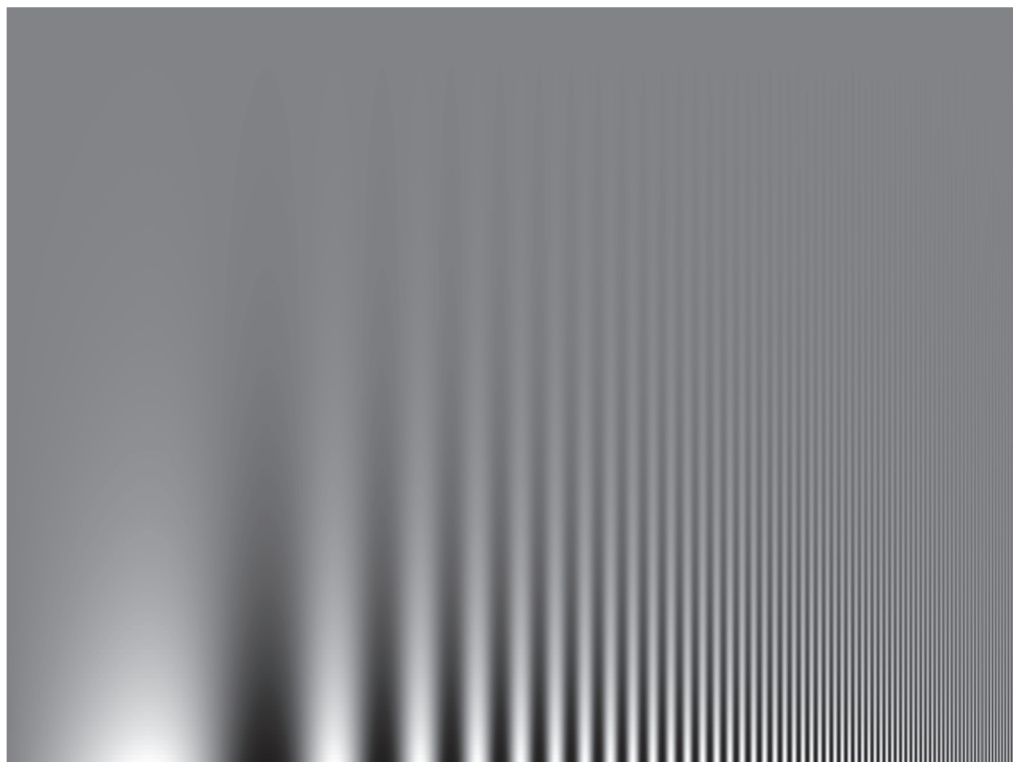
9. pielikums

“Kontrasta jūtība”

Weber–Fechner kontrasta likums

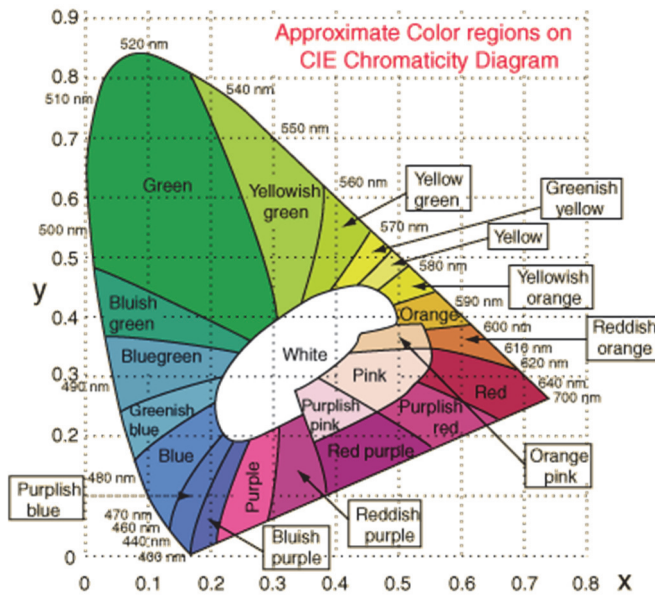


Campbell–Robson kontrasta jūtības diagramma



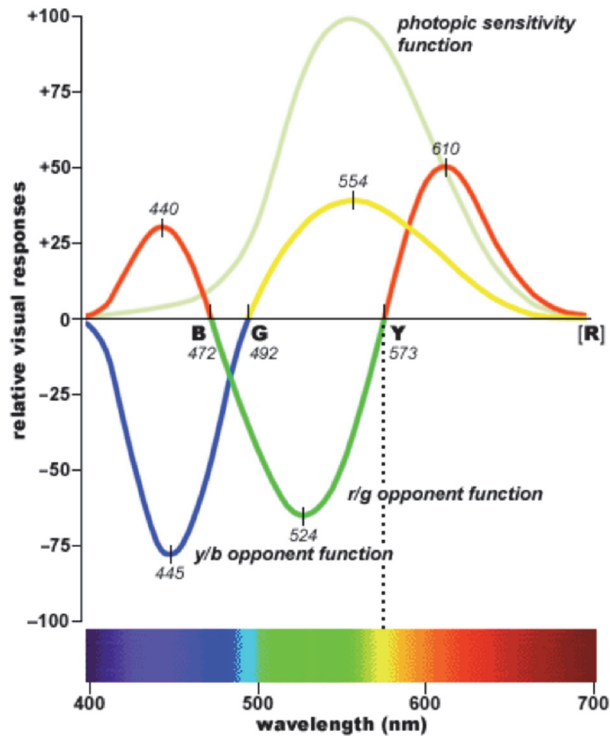
10. pielikums

“CIE 1931 krāsu diagramma”



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/cie.html>

Oponenta krāsas

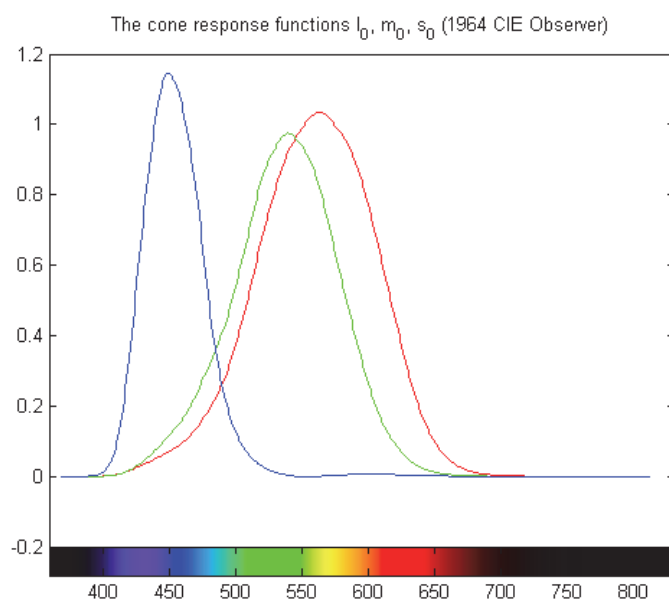


<http://www.handprint.com/HP/WCL/color2.html>

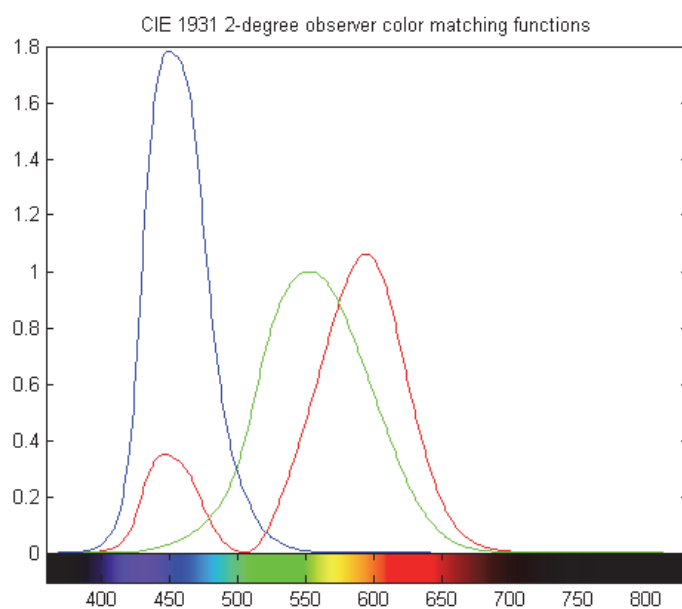
11. pielikums

“CIE krāsu telpas”

CIE 1931 (S, L, M vāļišu absobcijas līknes, 10 grādi, CIE 1964)



CIE 1931 (S, L, M vāļišu absorbcijas līknes, 2 grādi, CIE 1931)



<http://blogs.mathworks.com/steve/2006/12/26/colorful-anniversaries/>

12. pielikums

“Subjektīvās un objektīvas kvalitātes novērtēšanas metodes.”

Subjektīvās metode	Objektīvās metodes	Pielietojums
ITU-R BT.500 (2012) ITU-R BT.1663 (2003) ITU-R BT.1788 (2007) ITU-R BT.2021 (2012) ITU-T J.140 (1998) ITU-T J.245 (2008) ITU-T P.910 (2008) ITU-T P.913 (2014)	ITU-R BT.1683 (2004) ITU-R BT.1866 (2010) ITU-R BT.1867 (2010) ITU-R BT.1885 (2011) ITU-R BT.1907 (2012) ITU-R BT.1908 (2012) ITU-T J.144 (2004) ITU-T J.246 (2008) ITU-T J.247 (2008) ITU-T J.249 (2010) ITU-T J.341 (2011) ITU-T J.342 (2011) ITU-T P.1202 (2012)	Video
ITU-T P.911 (1998) ITU-T P.913 (2014) ITU-T P.920 (2000) ITU-T P.1301 (2012) ITU-T P.1302 (2014) ITU-T G.1091 (2014)	ITU-T P.1201 (2012) ITU-T G.1070 (2012)	Audiovizuālā
ITU-R BS.1116 (2014) ITU-R BS.1284 (2003) ITU-R BS.1534 (2014) ITU-R BS.1679 (2004) ITU-T P.830 (1996) ITU-T P.913 (2014)	ITU-R BS.1387 (2001)	Audio
ITU-T P.806 (2014) ITU-T P.830 (1996) ITU-T P.835 (2003) ITU-T P.800 (2008) ITU-T P.805 (2007) ITU-T P.1302 (2014)	ITU-T P.563 (2004) ITU-T P.564 (2007) ITU-T P.862 (2001) ITU-T P.863 (2014) ITU-T G.107 (2014) ITU-T P.561 (2002) ITU-T P.562 (2004)	Runa

13. pielikums

“*TA* un *SA* vērtību aprēķins- *Matlab* kods”

SA formula:

$SA_n = std(Sobel(F_n))$, kur

F_n – video kadra spilgtuma komponente

Sobel() – video kadra malu noteikšana izmantojot Sobel filtru

std – standarta novirze

TA formula:

$TA_n = std(F_n - F_{(n-1)})$, kur

F_n – video kadra spilgtuma komponente

std – standarta novirze

Matlab komandrindā izpildīt *SA-TA.m* datni: *TA-SA*({'video.mp4'});

Rezultātā tiks iegūta *CSV* datne: *TA-SA.csv* (kadra kārtas numurs, *SA* un *TA* vērtība)

SA un *TA* (*RGB-YCbCr* video)

```
function TA_SA(videoFragments)
%Video Temporal Activity and Spatial Activity counter

tic
%For each video
for i = 1 : 1 : numel(videoFragments)

    %Create video object, get number of frames, video height and video
    %width
    videoObj = VideoReader(videoFragments{i});
    nFrames = videoObj.NumberOfFrames;
    vidHeight = videoObj.Height;
    vidWidth = videoObj.Width;

    %Create matrix that will store all video frames in RGB, and
    preallocate
    %it with 0.
    %mov(1:nFrames) = struct('cdata', zeros(vidHeight, vidWidth, 3,
    'uint8'), 'colormap', []);

    %Preallocate empty matrix for TA and SA
    TA = zeros(1, nFrames, 'double');
    SA = zeros(1, nFrames, 'double');

    %mov(1).cdata
    temp = read(videoObj, 1);
    currentVideoFrame = rgb2ycbcr(temp);

    for k = 2: 1 : nFrames-1
```

```

        %mov(k).cdata
        temp = read(videoObj, k);
        nextVideoFrame = rgb2ycbcr(temp);
        currentMinusNext = cast(currentVideoFrame(:,:,1), 'double') -
cast (nextVideoFrame(:,:,1), 'double');

        %Standart deviation of luminance plane
        TA(k-1) = std2(currentMinusNext);
        %Apply sobel filter to luminance plane
        currentVideoFrameSobel = edge(currentVideoFrame(:,:,1));
        %Standart deviation of luminance plane, after edge detection
        SA(k) = std2(currentVideoFrameSobel*255);

        currentVideoFrame = nextVideoFrame;
        clc;
        str = sprintf('Progress: %d/%d', k, nFrames);
        disp(str)

    end

    %Last frame
    SA(nFrames) = std2(currentVideoFrameSobel*255);

    %Create new folder
    resultPath = strcat('results/',videoFragments{i});
    mkdir(resultPath);
    %Save TA, SA as matlab variables
    filename = strcat(resultPath,'/TA.mat');
    save(filename, 'TA');
    filename = strcat(resultPath,'/SA.mat');
    save(filename, 'SA');

    %Save TA, SA as csv
    filename = strcat(resultPath,'/TA_SA.csv');
    fileID = fopen(filename, 'w');
    fprintf(fileID,'Frame Nr,TA,SA\n');
    for k = 1: 1 : nFrames-1
        temp = [k TA(k) SA(k)];
        fprintf(fileID,'%8.6d,%8.6f,%8.6f\n',temp);
    end
    fclose(fileID);

end
toc
end

```

14. pielikums

“Paraugs- video kvalitātes novērtēšanas anketa”

Vārds, Uzvārds	
Dzimums	
Vecums	
Brilles, lēcas	
Nodarbošanās, profesija, izglītība	

Video kvalitātes novērtēšanas testi:

1. Krāsu redzes un kopredzes pārbaudes tests (4:30)

1.1. Krāsu redzes novērtēšana pēc Ishihara

1.2. Redzes asuma (kopredzes) novērtēšana pēc Snellen

2. Izmēģinājuma tests (3:30)

3. Video fragmentu (oriģinālo un bojāto) kvalitātes novērtēšana (37:00)

Kopējais laiks 45 minūtes

Rezultāti tiks publicēti tikai apkopotā veidā. Testēšanā iegūtie personas dati (vārds, uzvārds, vecums, dzimums, u.tml.) netiks publicēti.

1.1. Krāsu redzes novērtēšana pēc Ishihara

Apsēsties **3 metru** attālumā no ekrāna (LCD 32', h=40cm)

1. Testā tiks attēlotas krāsainas bildes, kurās būs redzami skaitļi vai līnijas
 - a. Ja redzat- atzīmējiet, ko redzat
 - b. Ja neredzat- atstājiet tukšu, vai ievēliet (-) vai (x)

Ishihara tests	Kartes attēla Nr.
Kartes attēls #1	12
Kartes attēls #2	1
Kartes attēls #3	
Kartes attēls #4	
Kartes attēls #5	
Kartes attēls #6	
Kartes attēls #7	
Kartes attēls #8	
Kartes attēls #9	
Kartes attēls #10	
Kartes attēls #11	
Kartes attēls #12	
Kartes attēls #13	
Kartes attēls #14	
Kartes attēls #15	
Kartes attēls #16	
Kartes attēls #17	
Kartes attēls #18	
Kartes attēls #19	
Kartes attēls #20	
Kartes attēls #21	
Kartes attēls #22	
Kartes attēls #23	
Kartes attēls #24	

Vai Jums ir problēmas ar krāsu uztveri?

- **Nē**
- **Jā**, bet nezinu tieši kādas
- **Jā**, man ir diagnosticēta krāsu redzes traucējuma forma: deiteranopija, protanopija, tritanopija, deiteranomālija, protanomālija, tritanomālija, cits:

1.2. Redzes asuma (kopredzes) novērtēšana pēc Snellen

Apsēsties **3 metru** attālumā no ekrāna (LCD 32', h=40cm)

1. Testā tiks attēloti dažāda izmēra burti
2. Aizpildiet tukšos burtu laukus (sākt ar zemāko rindu)

E	1								
F P	2								
T O Z	3								
L P E D	4								
P E C F D	5								
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> </tr> </table>							6		
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> </tr> </table>								7	
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> </tr> </table>									8
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> <td style="width: 40px; height: 40px;"></td> </tr> </table>									9
F D P L T C E O	10								
P E Z O L C F T D	11								

2. Izmēģinājuma tests

Apsēsties **2.5 metru** attālumā no ekrāna (LCD 32", h=40cm)

1. Jauktā secībā tiks attēloti oriģināli un bojāti video fragmenti
 - 1.1. Video fragmentu garums 10 sekundes
 - 1.2. Kopējais video fragmentu skaits 8 (secīgi vienu aiz otra jānovērtē 8 video fragmenti)
2. Noskatieties video fragmentu līdz galam un novērtējiet (1, 2, 3, 4, vai 5 balles)
3. Pēc katra video fragmenta tiek rādīts pelēks ekrāns (3-5 sekundes, atzīmējiet novērtējumu)
 - 3.1. Tukšajā ailē novērtējot ievēlciat krustiņu vai ķeksīti,
 - 3.2. Ja gadījusies kļūda, tad pareizo vērtējumu apvilkt ar apli

Video fragmenti no 01 līdz 08		01#08	02#08	03#08	04#08	05#08	06#08	07#08	08#08
Lieliska (Excellent)	5								
Laba (Good)	4								
Mērena, vidēja (Fair)	3								
Slikta / vāja (Poor)	2								
Ļoti slikta / vāja (Bad)	1								

3. Video fragmentu (oriģinālo un bojāto) kvalitātes novērtēšana

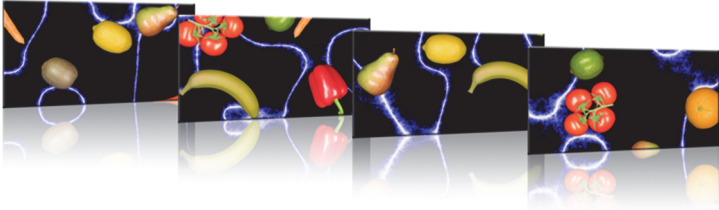
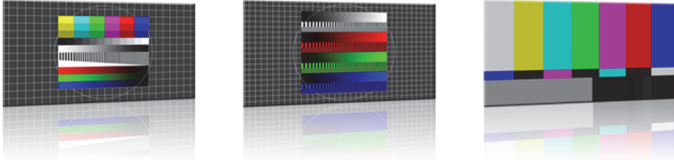
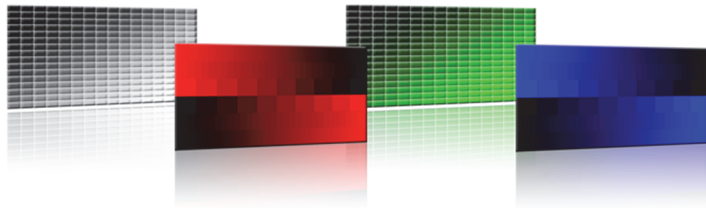
Apsēsties **2.5 metru** attālumā no ekrāna (LCD 32", h=40cm)

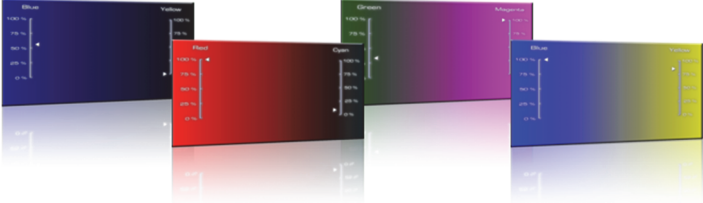
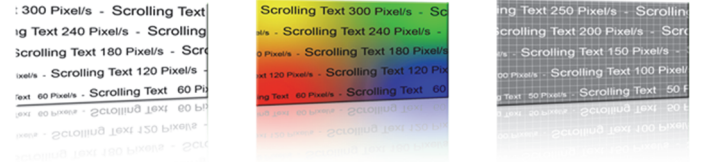
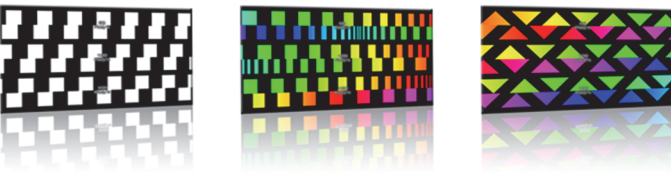
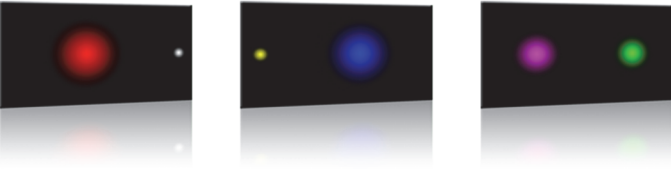
1. Jauktā secībā tiks attēloti oriģināli un bojāti video fragmenti
 - 1.1. Video fragmentu garums 15-45 sekundes (vidēji 30 sekundes)
 - 1.2. Kopējais video klipu skaits 56 (secīgi vienu aiz otra jānovērtē 56 video fragmenti)
2. Noskatieties video klipu līdz galam un novērtējiet (1, 2, 3, 4, vai 5 balles)
3. Pēc katra video klipa tiek rādīts pelēks ekrāns (3-5 sekundes, atzīmējiet novērtējumu)
 - 3.1. Tukšajā ailē novērtējot ievēlciat krustiņu vai ķeksīti,
 - 3.2. Ja gadījusies kļūda, tad pareizo vērtējumu apvilkt ar apli

Video fragmenti no 01 līdz 56		01#56	02#56	03#56	04#56	05#56	06#56	07#56	08#56
Lieliska (Excellent)	5								
Laba (Good)	4								
Mērena, vidēja (Fair)	3								
Slikta / vāja (Poor)	2								
Ļoti slikta / vāja (Bad)	1								

15. pielikums

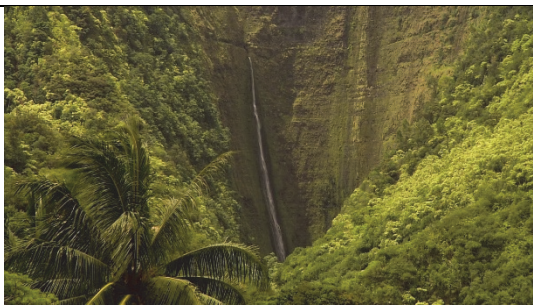
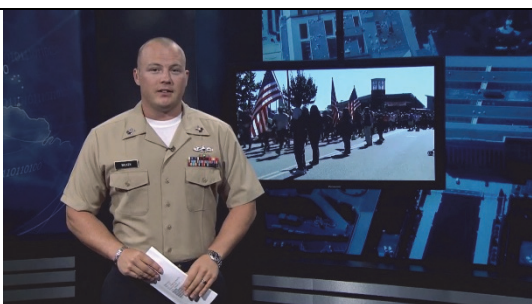
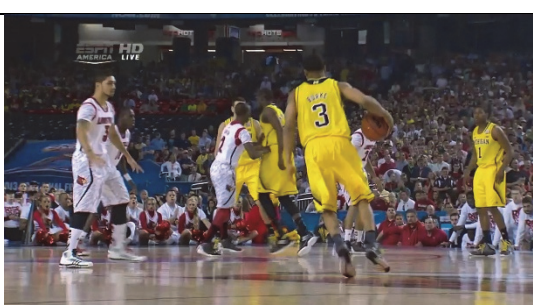
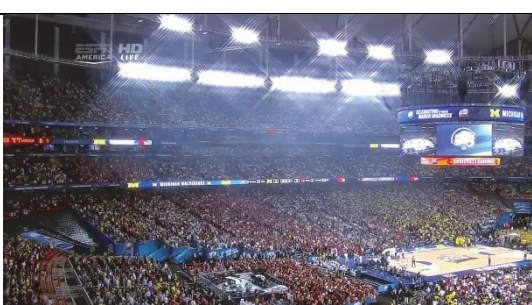
“Sintētiskie video sižeti (ekrānšāviņi)”

1	Moving Image Stripes (<i>MIS</i>)	
2	Solid Colors (<i>SC</i>)	
3	Flying Objects (<i>FO</i>)	
4	Radial Color Gradients (<i>RCG</i>)	
5	Classic Test Pattern (<i>CTP</i>)	
6	Frame Counter (<i>FC</i>)	
7	Color Pattern (<i>ColP</i>)	

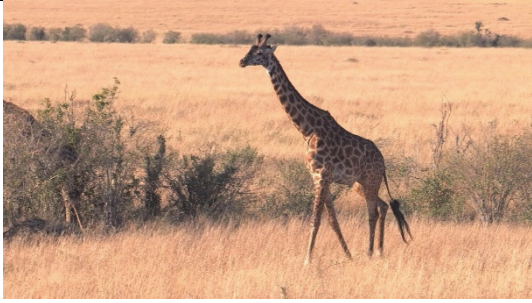
8	Convergence Pattern (<i>ConP</i>)	
9	Scrolling Text (<i>ST</i>)	
10	Scrolling Pattern (<i>SP</i>)	
11	Linear Color Gradients (<i>LCG</i>)	

16. pielikums

“Standarta video sižeti (ekrānšāviņi)”

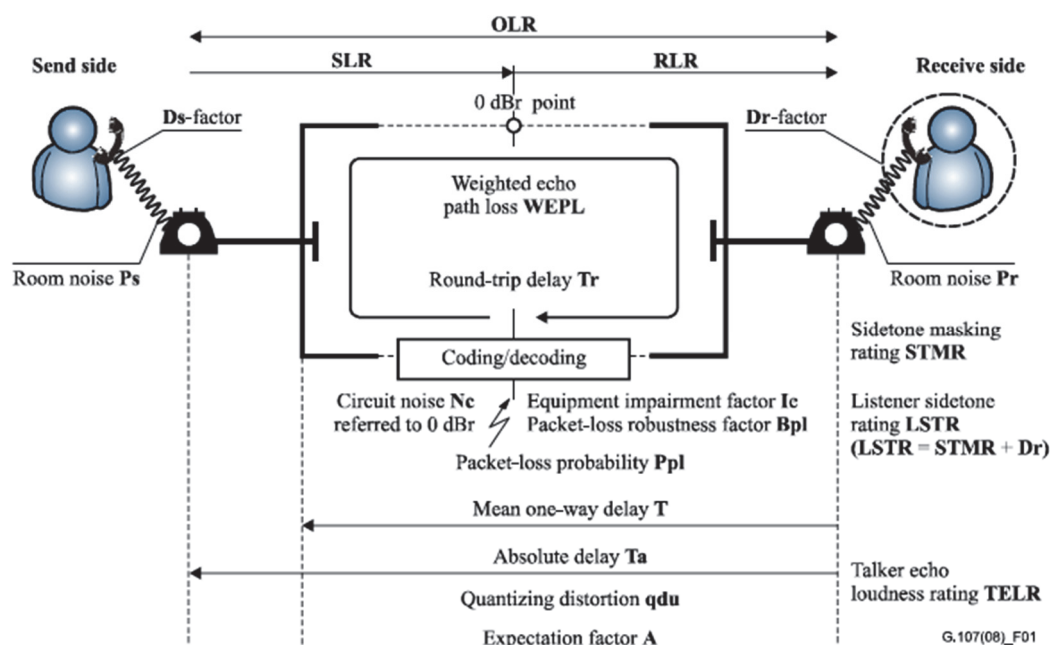
Daba		
		
Ziņas		
Sports		
		

Koncerts		
		
Filmas		
		
Multifilmas		

		
Seriāli		
		
Dzīvnieki		
		

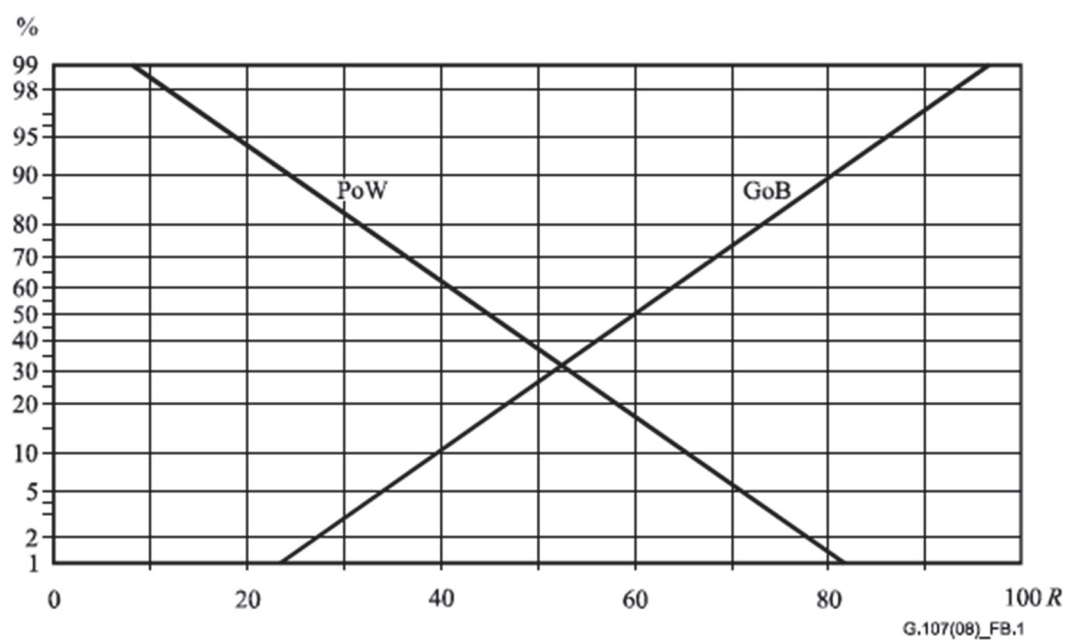
17. pielikums

“E-modeļa tehniskie parametri”

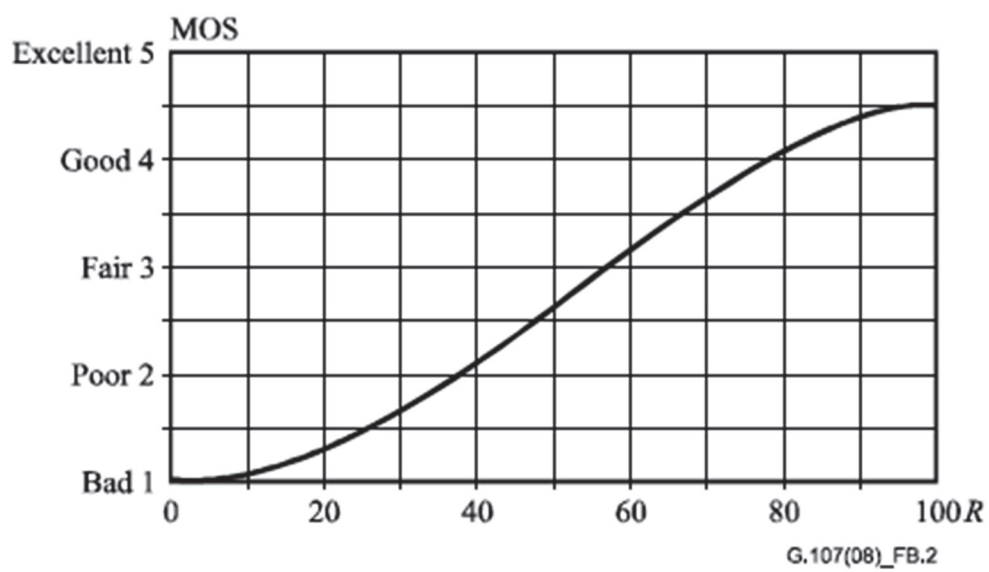


Parameter	Abbr.	Unit	Default value	Permitted range
Send loudness rating	SLR	dB	+8	0 ... +18
Receive loudness rating	RLR	dB	+2	-5 ... +14
Sidetone masking rating	STMR	dB	15	10 ... 20
Listener sidetone rating	LSTR	dB	18	13 ... 23
D-Value of telephone, send side	Ds	—	3	-3 ... +3
D-Value of telephone, receive side	Dr	—	3	-3 ... +3
Talker echo loudness rating	TELRL	dB	65	5 ... 65
Weighted echo path loss	WEPL	dB	110	5 ... 110
Mean one-way delay of the echo path	T	ms	0	0 ... 500
Round-trip delay in a 4-wire loop	Tr	ms	0	0 ... 1000
Absolute delay in echo-free connections	Ta	ms	0	0 ... 500
Number of quantization distortion units	qdu	—	1	1 ... 14
Equipment impairment factor	Ie	—	0	0 ... 40
Packet-loss robustness factor	Bpl	—	4.3	4.3 ... 40
Random packet-loss probability	Ppl	%	0	0 ... 20
Burst ratio	BurstR	—	1	1 ... 8
Circuit noise referred to 0 dBr-point	Nc	dBm0p	-70	-80 ... -40
Noise floor at the receive side	Nfor	dBmp	-64	—

“GoB un POW kā funkcijas no R-faktora novērtējuma”

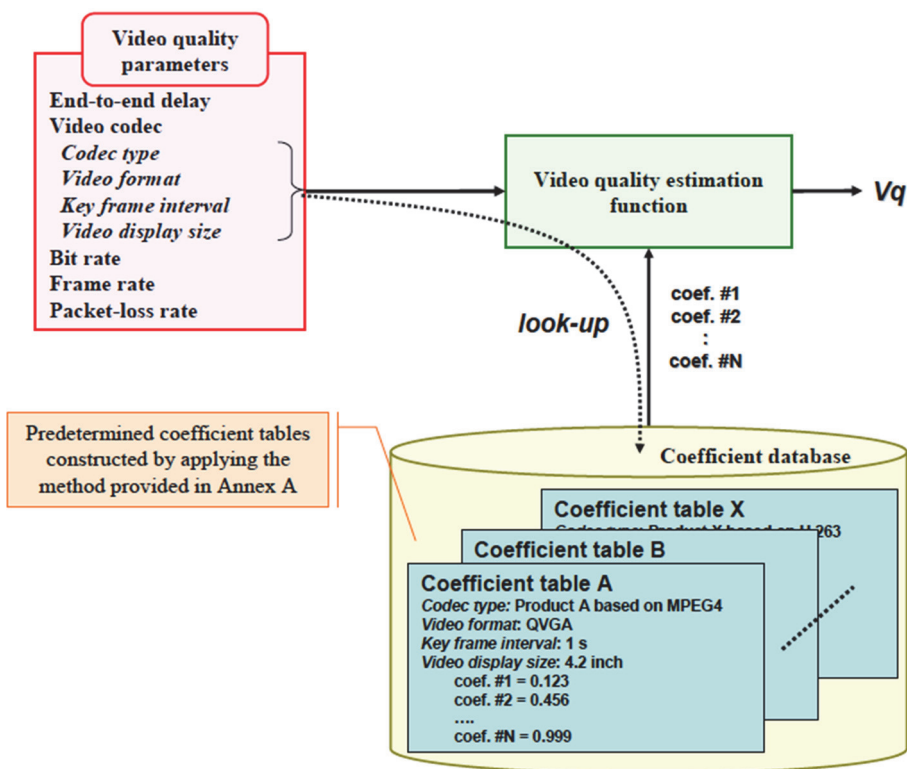
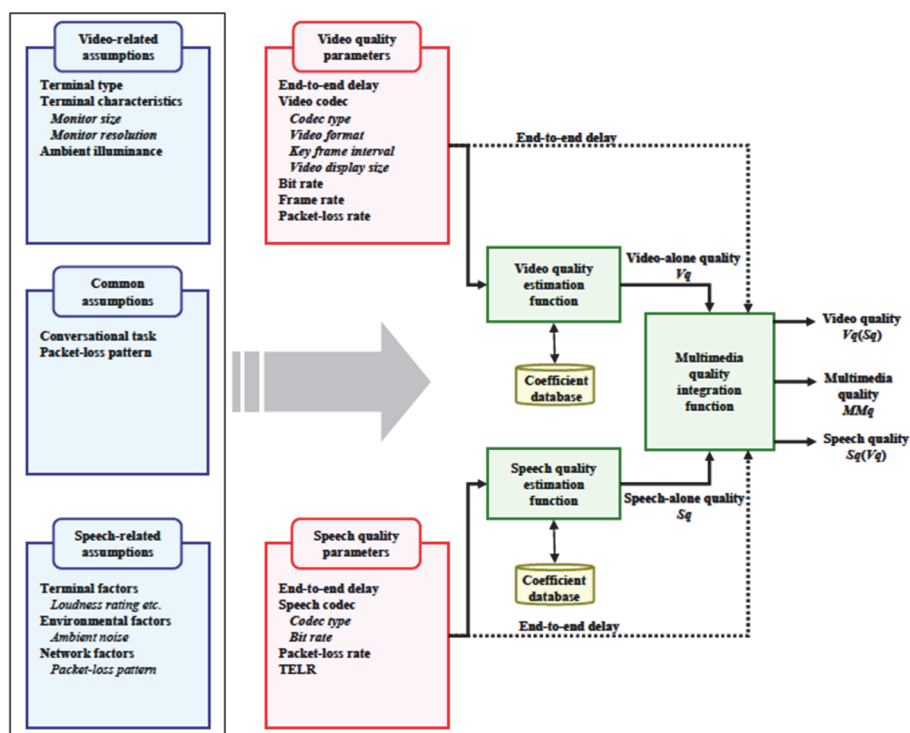


“MOS kā funkcija no *R*-faktora novērtējuma”



18. pielikums

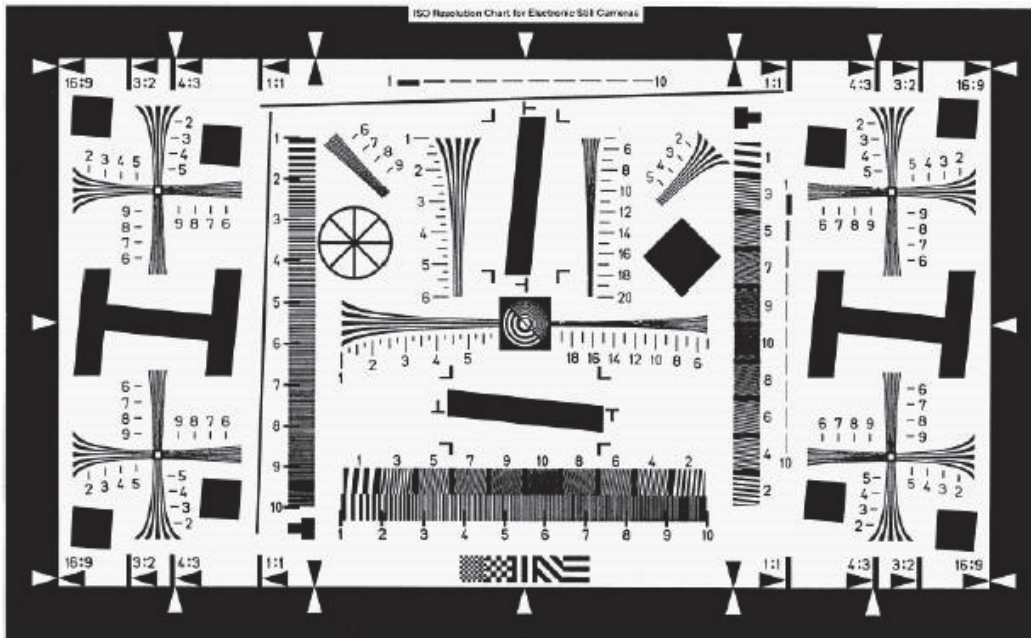
“Video telefonijas tehniskie parametri”



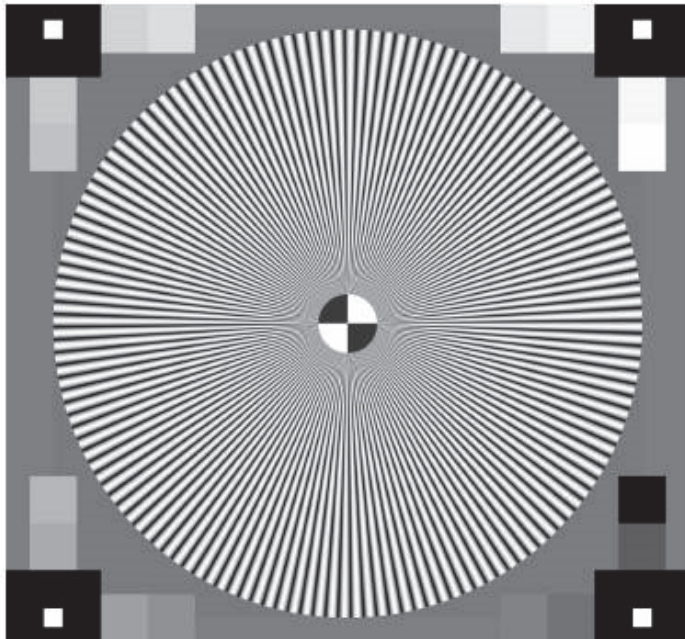
19. pielikums

“ISO 12233 testa kartītes”

“Video kameru izšķirtspēju testa kartīte ISO 12233:2000”

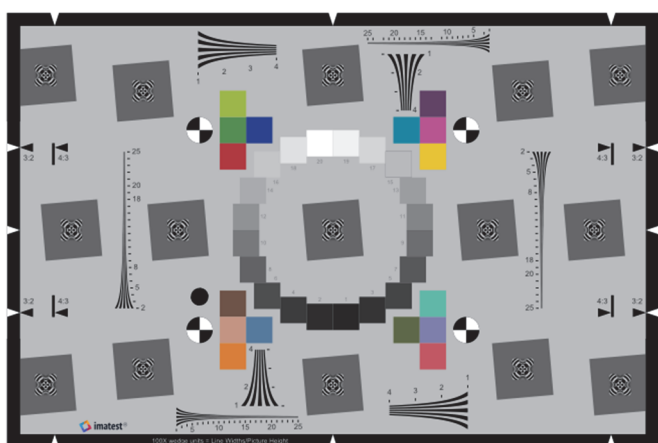
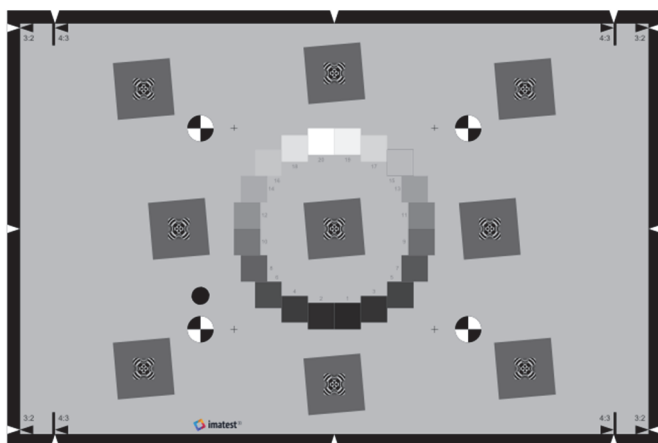
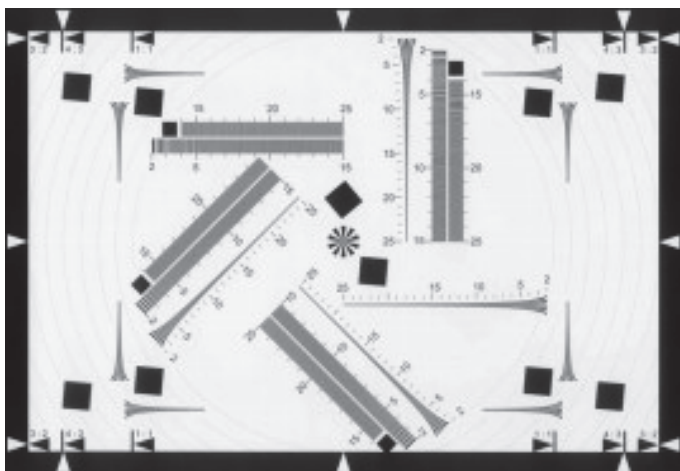


“Siemens *SFR* testa kartīte ISO 12233:2000”



http://www.imaging.org/ist/resources/standards/Digital_Camera_Resolution_Tools.cfm

“Jaunam standartam atbilstošās testa kartītes ISO 12233:2014”

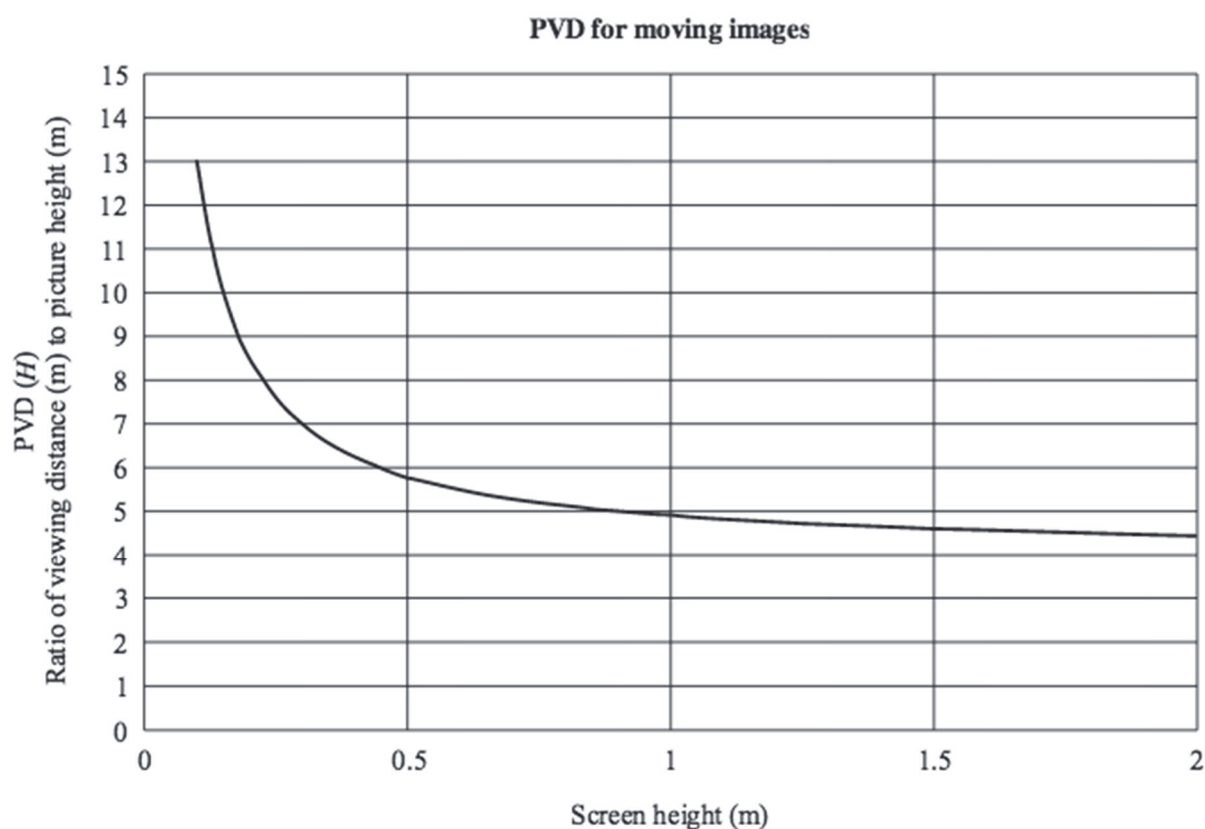


<http://www.imatest.com/2014/10/esfr-iso-analyze-iso-122332014-e-sfr-chart/>

20. pielikums

“Vēlamais skatīšanās attālums vai PVD (*Preferred Viewing Distance*)”

Screen diagonal (in)		Screen height (H)	PVD
4/3 ratio	16/9 ratio	(m)	(H)
12	15	0.18	9
15	18	0.23	8
20	24	0.30	7
29	36	0.45	6
60	73	0.91	5
> 100	> 120	> 1.53	3-4

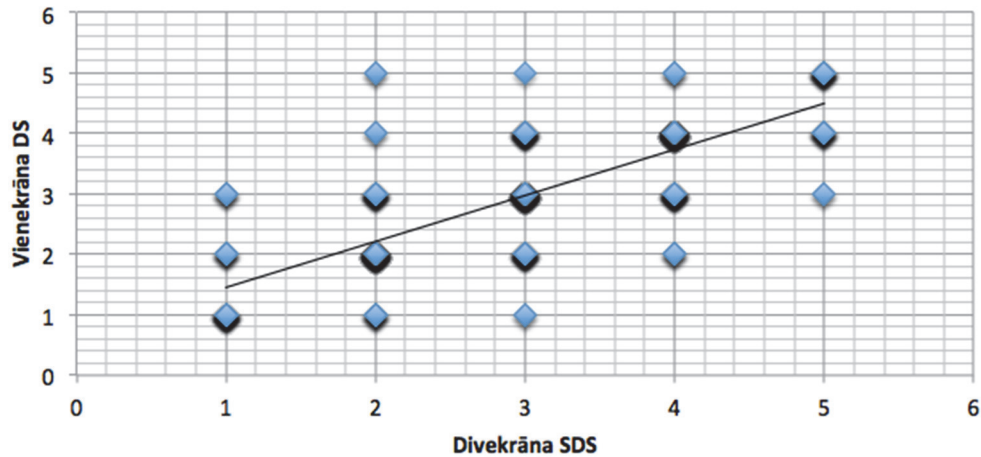


https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-E.pdf

21. pielikums

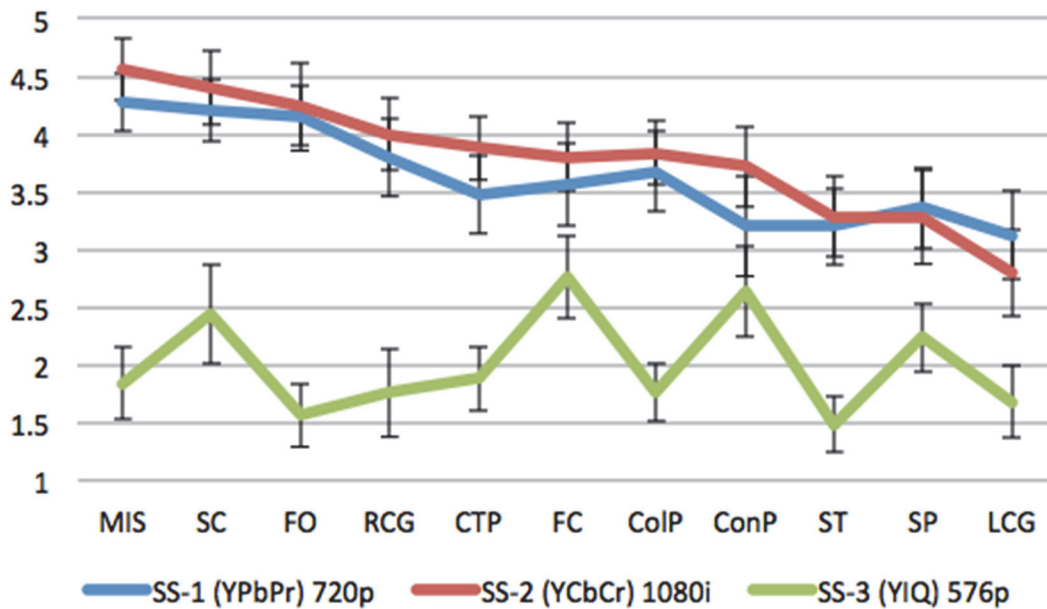
“Darba 4. nodaļas krāsainie grafiki”

4.1. Video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu pielietojuma novērtēšana

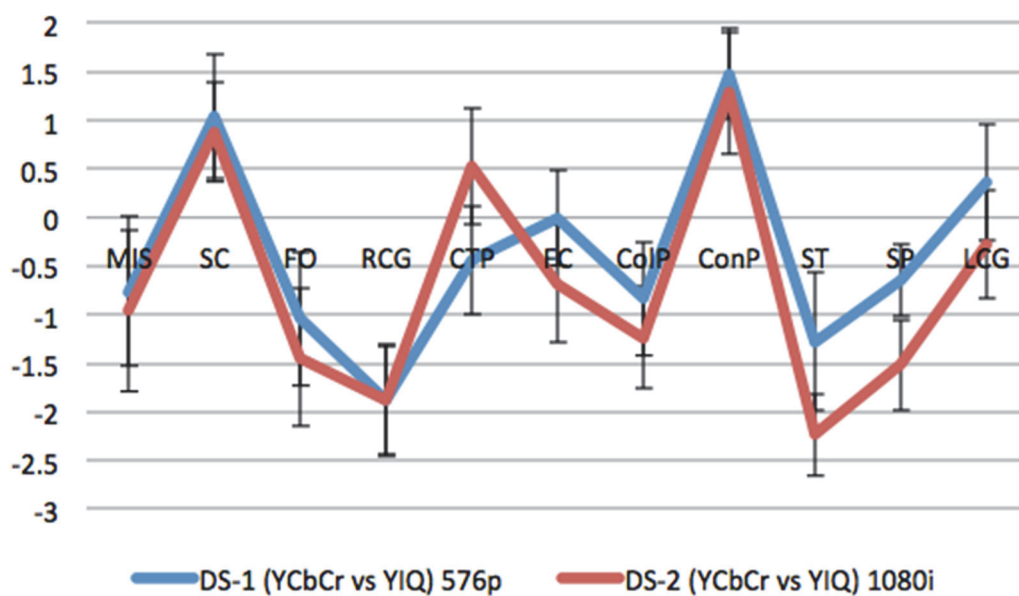


4-1. attēls. Viena ekrāna un divu ekrāna metožu izvēle

4.2. Sintētisko video sižetu kvalitātes vērtējums atkarībā no kompresijas parametriem un interfeisa

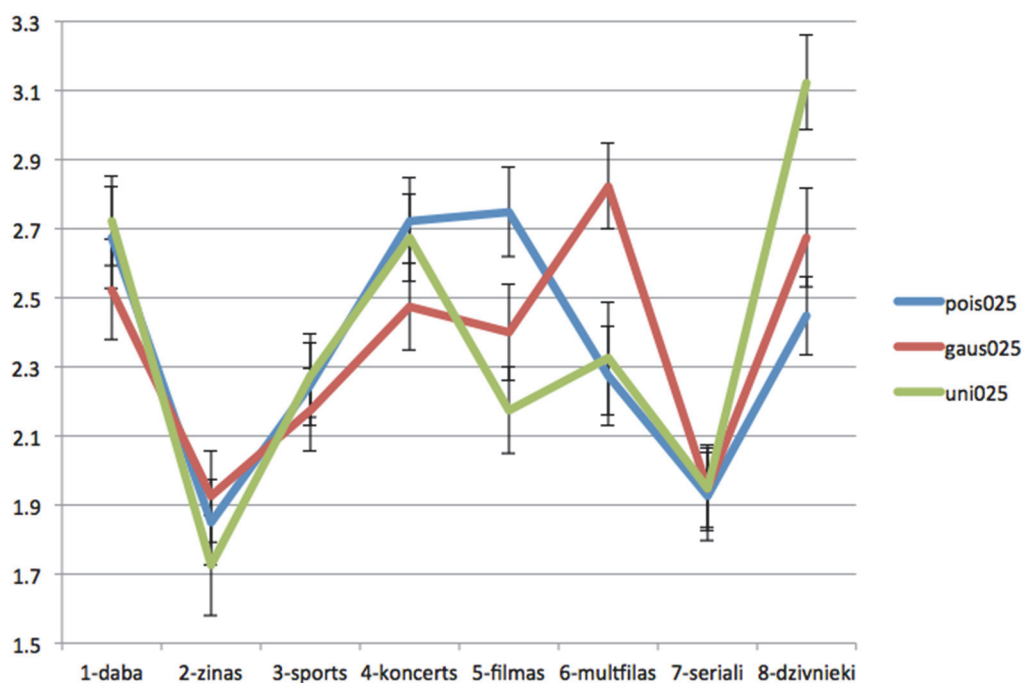


4-2. attēls. Vienekrāna MOS vērtības 720p, 1080i un 576p video signāliem

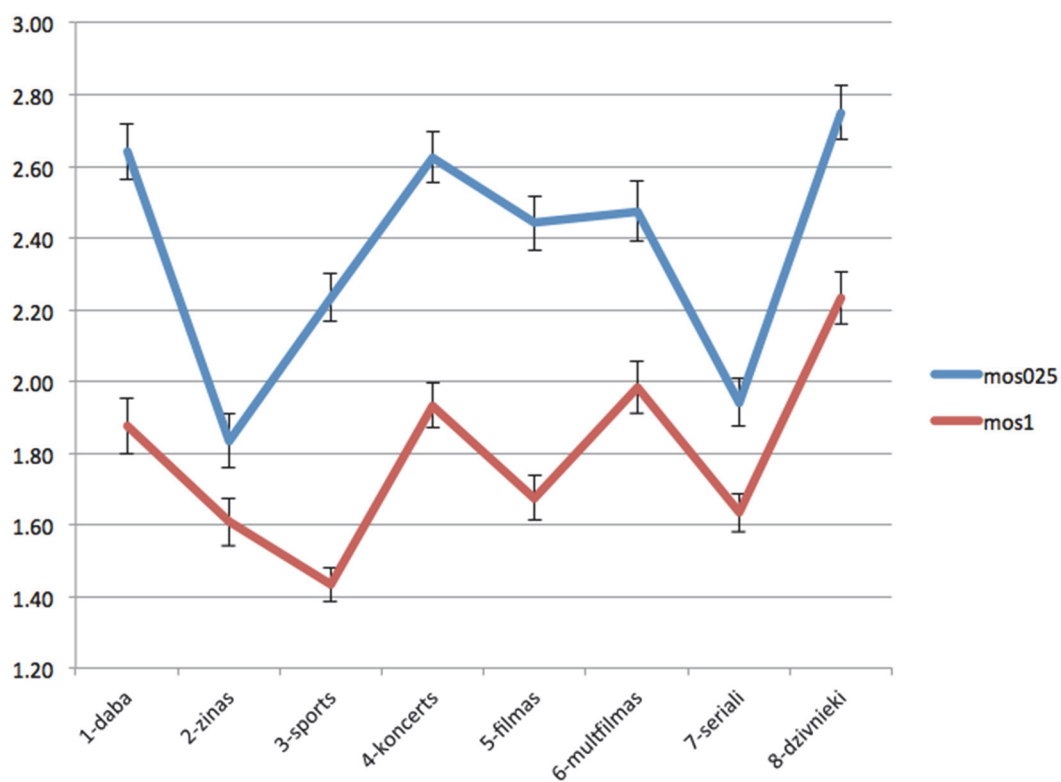


4-3. attēls. Divekrānu MOS vērtības 576p un 1080i video signāliem

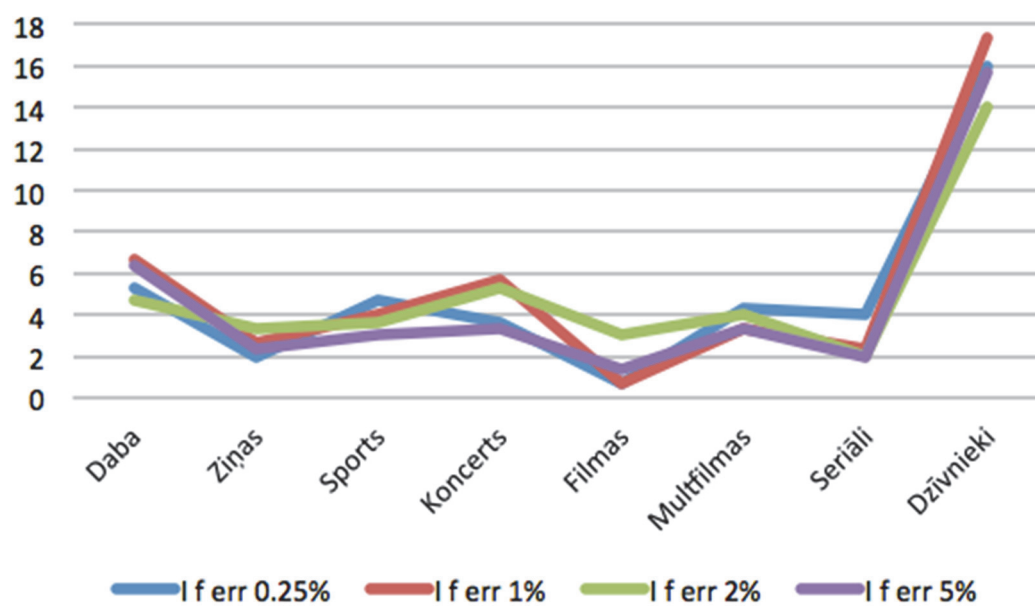
4.3. Pakešu zuduma ietekmes uz video pārraides kvalitāti pētīšana



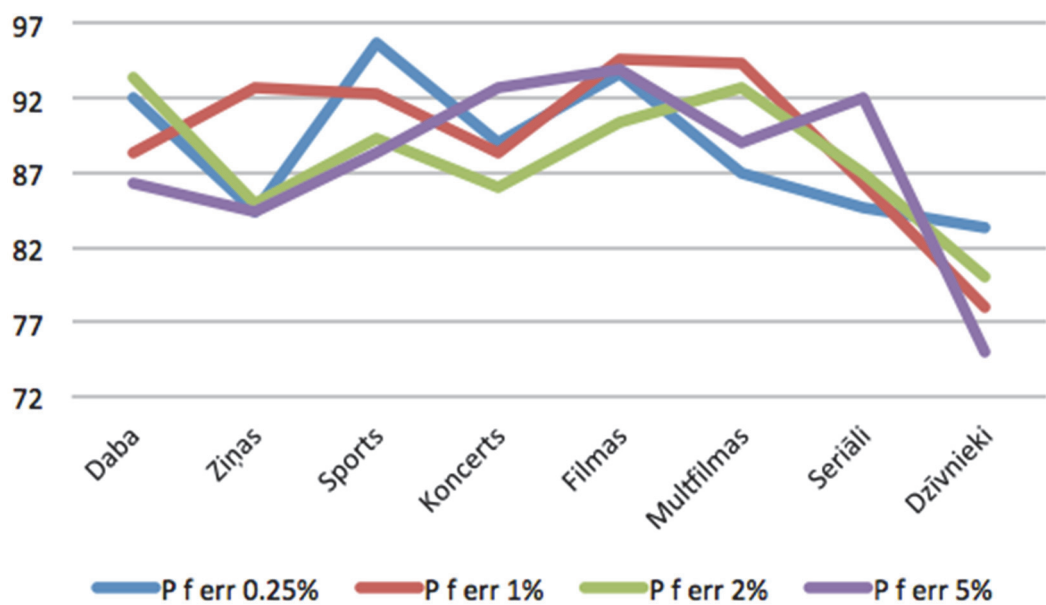
4-4. attēls. MOS vērtības Puasona, Gausa un vienmērīgam sadalījumam



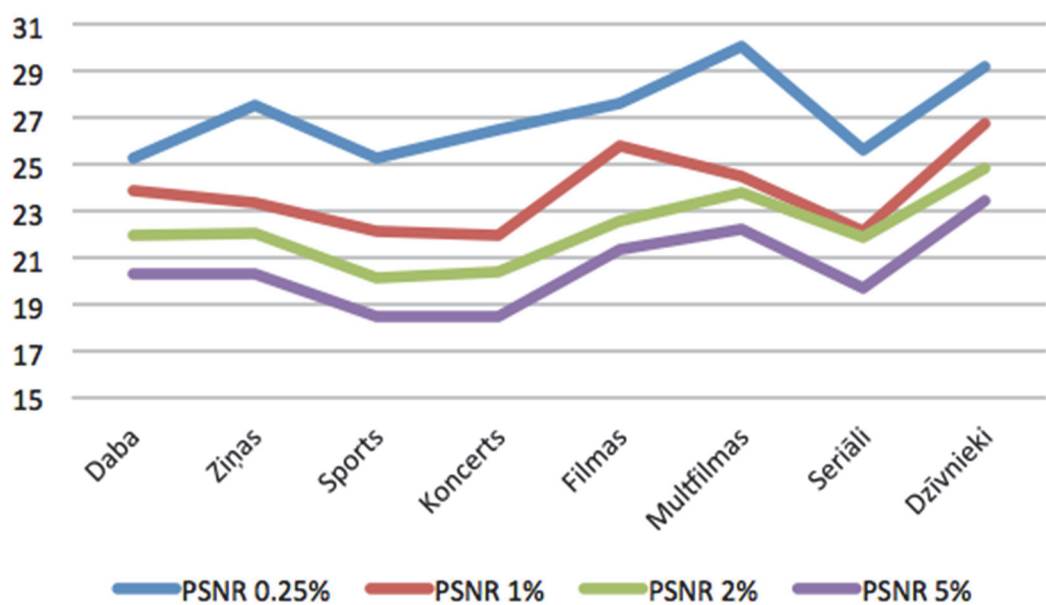
4-5. attēls. MOS vērtības 0.25% un 1% pakešu zudumam



4-6. attēls. I kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta



4-7. attēls. *P* kadru bojājumu skaits atkarībā no video sižeta



4-8. attēls. *PSNR* atkarībā no video sižeta