

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 darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. sc. ing.*
I. SLAIDIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Pauliks R. Video pārraides pakalpojumu kvalitātes pētījumi pakešu tīklos. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. –70 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes “RTU P-08” 2016. gada 17.marta lēmumu, protokols Nr. 33

ISBN 978-9934-10-818-1

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA
IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 30.jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 38. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr.habil.sc.ing.* Ernests Pētersons RTU promociju padome, Latvija

Profesors *Dr.sc.ing.* Aleksandrs Grakovskis, Transporta un sakaru institūts, Latvija

Profesors *Dr.habil.phys.* Eligijus Sakalauskas, Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Romass Pauliks (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 20 pielikumus, 40 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir 263 nosaukumi.

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

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* [1] 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 [2]. 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 [2], 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 [3], t.i., datu uzglabāšanas un skaitļošanas tehnoloģijas, kuras nodrošina lietotāja datu, t.sk. multivides datu plūsmas, izvietošanu interneta datu centros. Tirgus diktēta patērētāju vēlme izmantot augstākās kvalitātes video saturu būtiski pieaug, kā rezultātā ir jāņem vērā šādas 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 veiktspējas 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 veiktspējas 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 MHz, 7 MHz vai 8 MHz) pārraidīt vairākas televīzijas programmas. Pēdējā desmitgadē ierasto kabeļu, zemes, mobilās un satelīta televīzijas tehnoloģiju saimi *DVB (Digital Video Broadcasting)* [4] ir papildinājusi interneta protokola televīzija *IPTV (Internet Protocol Television)* [5], kur televīzijas kanālu pārraidei izmanto pakešu komutācijas kanālus ar *QoS (Quality of Service)* [6] garantijām, parasti viena operatora tīkla ietvaros. Savukārt pēdējos gados arvien lielāku popularitāti iegūst *OTT (Over-the-top* vai *Over-the-Internet)* video [7] 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 jāreķinās ar pakešu aizturēm (*delay*), trīci (*jitter*), uzliesmojumu (*burst*), kā arī tīkla mezglu buferu pārpildi 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 [8]. 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* [9] un *SLA (Service Level Agreement)* [10] uz lietotāju centrētu *QoE (Quality of Experience)*

kvalitātes novērtēšanu [11], [12]. Šajā gadījumā tehnoloģiski centrēta [13] kvalitātes novērtēšana vai *QoS* ir jāsaprot kā objektīvi izmērāmi tīkla un pakalpojuma veikspējas parametri [14], piemēram, aizture, trīce, pārraides ātrums, pakešu zudums u.c. Savukārt lietotāja centrētu kvalitātes novērtēšanu mēdz dēvēt par subjektīvo vai lietotāja uztveres kvalitāti [15], [16]. *QoE* ir lietotāja centrēts kvalitātes novērtēšanas kritērijs [17], kas ir radīts gan video attēla, 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 [18] ir veikusi daudz pētījumus par *QoE* [19].

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 nespeciālistus (*non-expert*) [20], 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 nespeciālistu video kvalitātes novērtēšanas testu rezultāti. Subjektīvās kvalitātes novērtēšanu parasti veic kontrolētos testgultnes apstākļos atbilstoši standartizētām procedūrām [21] un [22], kas prasa ievērojamas investīcijas. Kā alternatīva kontrolētiem testgultnes apstākļiem ir reālie sadzīves apstākļi (mājās uz dīvāna, darbā pie galda, kafejnīcā, parkā, autobusā u.tml.) [23] un [24], kur tehnisko parametru precīza fiksēšana nav iespējama un kvalitātes novērtēšanas eksperimentālos datus visbiežāk iegūst, izmantojot internetu (speciāli sagatavoti eksperimenti tīmeklī). Šo paņēmieni mēdz dēvēt par *crowdsourcing* [25], [26] un [27]. Par subjektīvās kvalitātes rādītāju vai raksturojošo parametru visbiežāk tiek izmantots *MOS* (*Mean Opinion Score*) [28], kuru var uzskatīt par *QoE de-facto* standartu, tomēr tas nav vienīgais statistikas parametrs [29]. *MOS* atspoguļo konkrētas kodēšanas vai pārraides sistēmas lietotāju vidējoto kvalitātes vērtējumu, piemēram, attēla kvalitātes vidējo vērtējumu [30]. Lai arī subjektīvais *QoE* novērtējums ir uzskatāms par vienīgo drošo paņēmieni, kā iegūt uzticamus rezultātus, tomēr tas ir ļoti laikietaupīgs, 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 daudzi 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 [31] vai video telefonijas pārraides plānošana atbilstoši [32]. 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, [32] 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 [32] modelis nav pilnvērtīgi izmantojams multimediju kvalitātes novērtēšanā, tam ir jānodēfīnē 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 subjektīvās kvalitātes 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 darbības neierastos apstākļos [33]. Tāpēc *QoE* metrikas ir jāizstrādā skaidri definētam lietojumam, 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. Izveidot metodiku video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai, ar kuras palīdzību var modelēt video kodēšanas un pārraides tehniskos parametrus.
 - 2.4. Izstrādāt vadlīnijas video kvalitātes metožu uzlabošanai, lai varētu iegūt divdimensionālu kvalitātes novērtējumu (*MOS*).
 - 2.5. Veikt respondentu redzes asuma (*Snellen*), krāsu redzes (*Ishihara*) un kontrasta jūtības (*Pelli-Robson*) pārbaudes.
3. Veikt literatūras pārskatu par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlēties atbilstošas metodes darba eksperimentālajiem testiem.
 - 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 telplaika (*TA*) mērījumiem.
 - 4.3. Veikt oriģinālā un bojāto (kodēšanas vai pārraides rezultātā radušos bojājumu) video sižetu salīdzinājumu pēc *MSE* un *PSNR* mērījumiem.
5. Veikt dažādu video signālu un interfeisu video kvalitātes salīdzināšanas eksperimentus un statistisko datu 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 aptase 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 atlasē 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 (robežās no $r = 0,5$ līdz $r = 0,7$).
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 nosakņošanai, 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 Experience 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, piemēram, 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. Ventspils: 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, pp. 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. – 560 p.

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

1. 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).
2. LATLIT projekts “Use of multimedia and interactive television to improve effectiveness of education and training (Interactive TV)”, Nr. LLIV-343, (2012, 2013, 2014).
3. 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 uz ekrāna. 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 pielietojumiem, 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 pielietojumiem, 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.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

1. Video kompresijas un pārraides tehnoloģijas

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. Ceturtais 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 uz ekrāna. 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.

Video kompresija

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 [34]. Līdzīga sakarība ir atrodamā, *H265 HEVC* salīdzinot ar *H264 AVC P10* [35]. Jo augstākas pakāpes kompresija, jo sarežģītāki dekodēšanas algoritmi un lielāka skaitļošanas jauda ir nepieciešama [36]. 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.

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, izvēlētajā 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 ir būtiski atšķirīga.

Ietilpīga eksperimentāla pētījuma ietvaros, kura rezultāti ir atspoguļoti [37] un [38] ir veikta gan video interfeisu, gan arī video kodētāju kvalitātes novērtēšana, skatīt 4. nodaļā.

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 formulas (1.1):

$$MSE = \frac{\sum_{M,N} [I_1(m,n) - I_2(m,n)]^2}{M \cdot N}, \quad (1.1)$$

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 formulas (1.2):

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{MSE} \right), \quad (1.2)$$

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

Lai novērtētu oriģinālā un pārkodētā video sižeta attēla krāsu izmaiņas, ieteicams izmantot salīdzinoši vienkāršu paņēmieni (*Delta*) atbilstoši formulai (1.3). Šo paņēmieni visbiežāk izmanto video kodēšanas un video filtru kvalitātes testēšanai.

$$Delta(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} (X_{i,j} - Y_{i,j})}{mn}, \quad (1.3)$$

kur $X_{i,j}$ oriģinālā un $Y_{i,j}$ pārkodētā 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 jutīgāka uz spilgtumu Y (*luminance*) un salīdzinoši mazāk uz krāsām *CbCr* (*chrominance*). Augstāk minēto apsvērumu dēļ *PSNR* bieži aprēķina tikai spilgtuma Y (*luminance*) komponentei.

Pētījumā [39] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* ir konstatēta visai vāja saistība ar *PSNR* (no $r = 0,28$ līdz $r = 0,60$), skatīt 4. nodaļā.

Video pārraide

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.

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 lietojuma – datora monitoriem vai televizoriem, kaut gan mūsdienu produktos sāk izzust šis striktais iedalījums pēc lietojuma, kā arī interfeisu tehniskās specifikācijas kļūst visai līdzvērtīgas. 1.1. 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.

Minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, kāpēc darba eksperimentos ir veikti populārāko video interfeisu kvalitātes novērtēšanas testi.

1.1. tabula

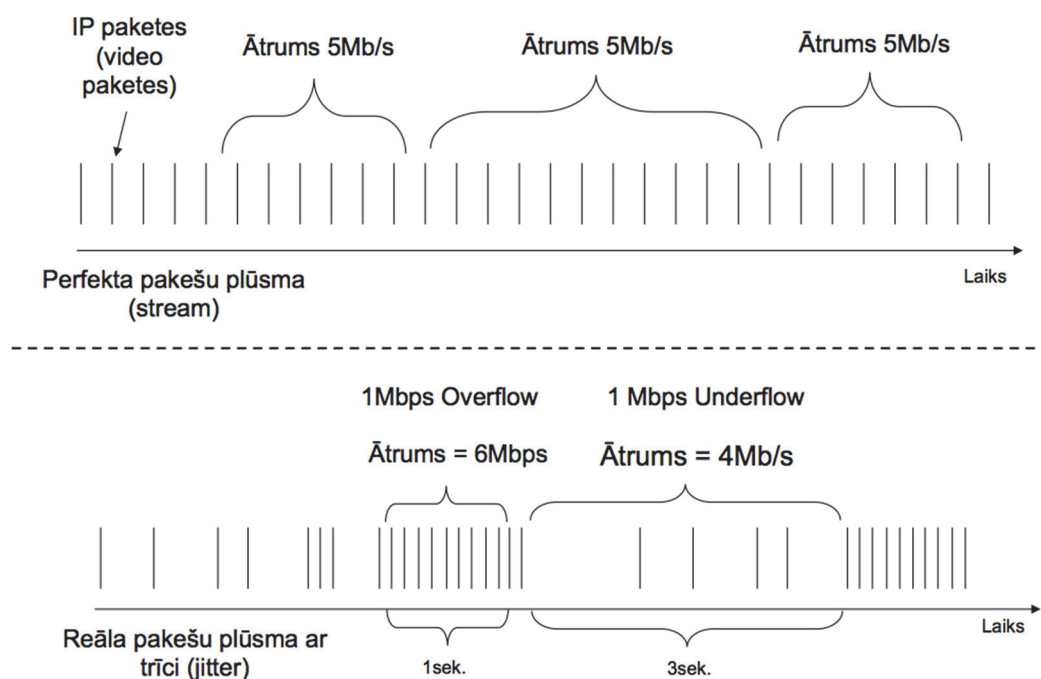
Video interfeisi (patērētāju un profesionālās klases)

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 jēldatau 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)		

Ietilpīga eksperimentāla pētījuma ietvaros, kura rezultāti ir atspoguļoti [37] un [38] ir veikta gan video interfeisu, gan arī video kodētāju kvalitātes novērtēšanas testi, skatīt 4. nodaļā.

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. Trīci un aizturi, kuru nevar kompensēt ar buferatmiņu, radīs pakešu zudumu. Minētais arī kalpoja kā pamatojums tam, ka darba eksperimentos ir veikti tieši pakešu zudumu, nevis pakešu aiztures un trīces, ietekmes testi.

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 neaizpildes gadījumos [40] var rasties pakešu zudums (*packet loss*), vizuālu piemēru skatīt 1.1. attēlā.



1.1. att. Pakešu pārraides process ar aizturēm un trīci.

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

Klasiskās TV apraides tehnoloģijas, tādas kā DVB – T, DVB – C un DVB – 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.

Meklējot sakarības pakešu zuduma lieluma un tā sadalījuma ietekmei uz video kvalitātes vērtējumu, darba eksperimentālos pētījumos tika izmantots *VBR* [41], [42] 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 atmetas paketes, piemēram, normālais (Gausa), Puasona, vienmērīgais sadalījums, kā arī determinēts (periodisks) pakešu zudums [43] [44]. Lai varētu emulēt pašlīdzības datu plūsmu, IP tīklos, tika izmantota *VBR* video plūsma [39]. Minētie varbūtību sadalījuma likumi

ir izmantoti pakešu zuduma emulācijām, bet izstrādātā laboratorija 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 1.2. tabulai.

1.2. tabula

Pakešu zuduma eksperimenta nosacījumi

Video kodētājs	RAW YUV 4:2:0, H.264/MPEG – 4 AVC P10, Main@L4.1, 1280 × 720, 16:9, 25 fps
Video straumēšana	VBR video 30 Mbps (10 Mbps to 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 (Puasona, Gausa un vienmērīgais)
IP pārraides tīkla parametri	Trīces buferatmiņa 1000 ms, CAS (<i>Conditional Access</i>), atkārtota pārraide, kļūdu labošana, pakešu remaršrutēšana, 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 [45] [46], t.sk. ITU-T [32] rekomendācijā. Atsevišķos pētījumos tiek izmantots pavisam vienkāršots, maršrutētājos iebūvēts, pakešu rindu vadības mehānisms [47] vai arī operētājsistēmu (*Linux, Unix*) tīkla filtrācijas rīki, lai varētu nodrošināt pakešu atmešanas emulācijas. Atsevišķos pētījumos tiek izmantots Puasona sadalījums [48] [49], kā arī jebkurš cits, bieži neaprakstīts, gadījuma sadalījums. Atsevišķos pētījumos, papildus pakešu atmešanas sadalījumam, ir izmantots uzplaisnījuma (*burst*) un ilglaicīgas pakešu zuduma atkarības parametrs [50] [51] [52], bet šajā pētījumā [53] ir minēti atsevišķi Puasona sadalījuma likuma pielietojuma ierobežojumi. Tomēr šajā pētījumā [46] ir konstatēts, ka datu plūsmas uzplaisnījuma (*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, remaršrutēšana, 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 [54] [55] 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 [56] var būtiski ietekmēt video straumēšanas kvalitāti [57], 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 [58]. *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, [56] [59]. Savukārt pētījumi par reālā laika video plūsmu modelēšanu ir ievērojami mazāk [60] [61].

Konstatēts, ka dažādos pētījumos, kā arī *ITU* rekomendācijās, nav skaidri definētas pakešu zuduma robežvērtības un to saistība ar *MOS* vai aprobētiem subjektīvās kvalitātes eksperimentiem. Pakešu zuduma apjoma robežvērtības un ar tiem saistītie koeficienti ir neskaidri un vispārināti definēti, piemēram, *ITU-T* [32] gadījumā, pakešu zudumam ir jābūt mazākam par 10 %. Savukārt šajā pētījumā [62] pakešu zuduma apjoms ir definēts no 1 % līdz 20 %. Šajos pētījumos [63] [64] 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 1.2. 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 laboratorijas un testēšanas telpas parametri. Iespējams, ka testēšanas apstākļi neatbilst *ITU-R*

[21] un ITU-T [65] [66] rekomendācijās minētajām prasībām, nekorekti sagatavoti video sižeti, nav veikta monitora kalibrācija, kā arī citi apgaismojuma spilgtuma un krāsas mērījumi, skatīt 3. nodaļu.

Minētais motivēja meklēt sakarības starp šiem dažādiem varbūtību sadalījumiem (Puasona, Gausa 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, skatīt 4. 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 [67] [53] pakešu zuduma statistiku:

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (1.4)$$

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:

$$p(k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-\lambda)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.5)$$

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 [68] [53], 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:

$$P(k) = \begin{cases} \frac{1}{a-b} & a < k < b \\ 0 & k < a \\ 0 & k > b \end{cases} \quad (1.6)$$

Pētījumā [39] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* nav novērota atšķirība starp Puasona, Gausa un vienmērīgo sadalījumu, kuri tika izmantoti kā gadījuma sadalījumi, atmetot paketes.

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 pielietojumiem, 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 pielietojumiem, 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.

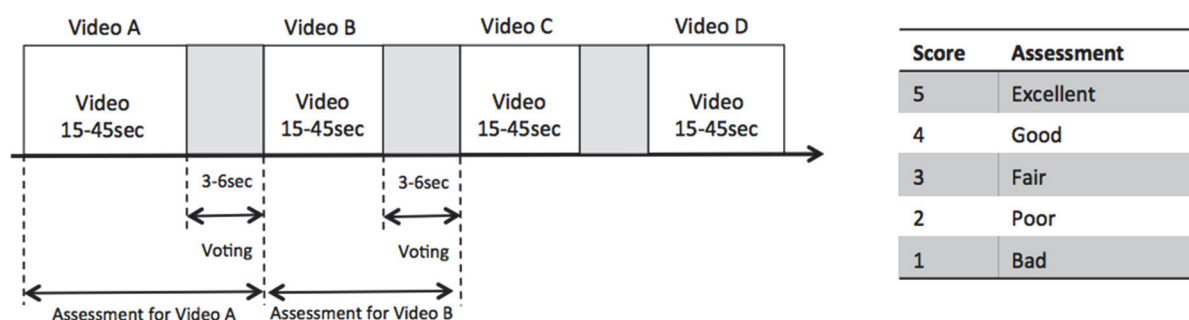
Mūsdienās ir pieejams salīdzinoši liels skaits video kvalitātes novērtēšanas metožu – gan starptautisko organizāciju rekomendācijās atzītās [21] [22], gan dažādu eksperimentu un zinātnisko pētījumu rezultātā ieteiktās metodes, piemēram, *MSUCQE* [69] vai *EBU* (*European Broadcasting Union*) *SAMVIQ* [70].

Video kvalitātes novērtēšanai izmanto vienekrāna *SS* (*Single Stimulus*) un *DS* (*Double Stimulus*), bet divekrānu vienlaicīga lietojuma 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 lietojums, 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 laboratorijas apstākļos u.tml. Turpmāk tekstā par katru metodi detalizētāk, kā arī par metožu novērtējumu un salīdzinājumu.

ACR (Absolute Category Rating) [22] ir zināma kā *SS (Single Stimulus)* metode, kuru izmanto, novērtējot video kvalitāti piecu baļļu skalā (5 – lieliska (*Excellent*), 4 – laba (*Good*), 3 – mērena, vidēja (*Fair*), 2 – slikta, vāja (*Poor*), 1 – ļoti slikta, vāja (*Bad*)), līdzīgi audio kvalitātes novērtēšanai atbilstoši [66], 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.

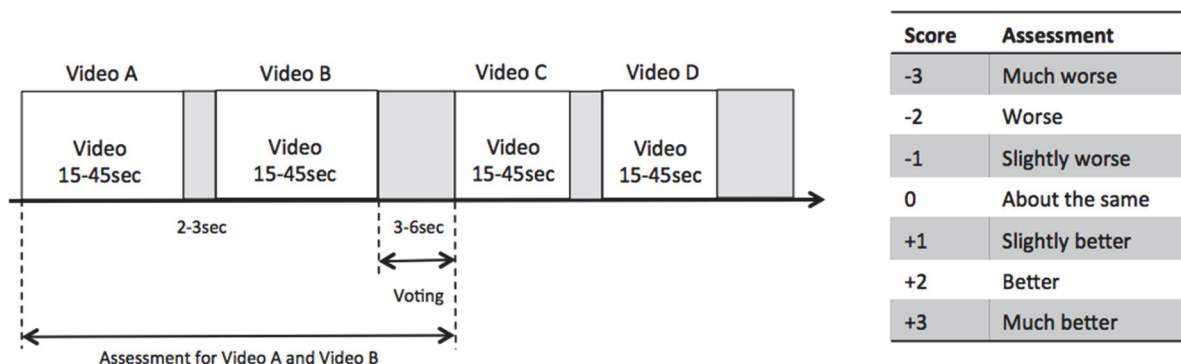


2.1. att. *ACR* video fragmentu attēlošanas process.

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 tie, kas nav eksperti, novērtējot absolūto video kvalitāti gan oriģināliem, gan bojātiem video fragmentiem.

PC (Pair Comparison) [22] izmanto divu video fragmentu pāru kvalitātes atšķirību novērtēšanai septiņu baļļu salīdzinājumu skalā (–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*)). Minēto 7 baļļu novērtēšanas skalu mēdz dēvēt par *CCR (Comparison Category Rating)* pēc [66] vai *DSCS (Double Stimulus Comparison Scale)* pēc [21].



2.2. att. PC video fragmentu attēlošanas process.

Atbilstoši 2.2. attēlam tiek attēloti divi dažādas kvalitātes video fragmenti, pēc katra video fragmenta pāra attēlošanas tiek rādīts pelēks ekrāns ar aicinājumu novērtēt kvalitāti pēc 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*) [21] gadījumos abi salīdzināmie video fragmenti tiek rādīti vienlaicīgi uz diviem identiskiem ekrāniem, kur “Video A” uz kreisā ekrāna un “Video B” uz labā ekrāna. Šo paņēmieni mēdz dēvēt par SDS (*Simultaneous Double Stimulus*).

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 2.1. tabulā.

2.1. 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</i> un <i>PoW</i>	<i>Good or Better</i> un <i>Poor or Worse</i>			Jā
<i>QoP</i>	<i>Quality of Perception</i>	Jā		Jā

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

MOS mēra pakalpojuma apmierinātības līmeni [28], bet *GoP* un *PoW* tiek izmantots pakalpojuma akceptēšanas novērtējumam [71]. 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 [72]. *QoP* ir lietotāja orientēts [73] multivides (video, audio un teksts) kvalitātes novērtējums, kuru iegūst pēc sarežģītas un laikietilpīgas procedūras – jautājumi un atbildes par video kvalitāti un sižetu [74].

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 [75]. *JND* ir subjektīvās kvalitātes mērs, kaut gan praksē ir pieejamas arī *JND* realizācija objektīvas kvalitātes novērtēšanas modeļos [76], kā arī komerciālos video kvalitātes mēraparatūras produktos [77].

Lai arī pētījumos ir izklāstītas dažādas *MOS* metrikas alternatīvas, skatīt 2.1. tabulā, tomēr *MOS* nu jau vairāk nekā desmit gadus var dēvēt par (*de-facto*) mēru video kvalitātes novērtēšanā. Turpmāk darbā par *MOS* ieguves un aprēķinu metodēm.

2.2. tabulā klasificētas populārākās novērtēšanas metodes pēc lietojuma (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.

Vispirms dažādas testēšanas metodes tika radītas un testētas nekustīgu attēlu JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) kvalitātes novērtēšanai [78], [79], [80], 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 2.2. tabulai.

Pētījumā [81] ir testētas *ACR, DSIS, DSCQS* un *SAMVIQ* metodes. Salīdzinot metožu iegūtos rezultātus, ir konstatēta augsta korelācija (no $r = 0,96$ līdz $r = 0,99$), kas kalpo kā rādītājs, ka starp metodēm nav novērotas būtiskas atšķirības. [82] 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 [83] ir veikts pārskats par *ACR, DSCQS* un *SSCQE*. Savukārt [84] ir salīdzinātas divas metodes *ACR-HR* un . 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 [85], tāpēc tās ir piemērotas video kodēšanas parametru noskaņošanai vai kvalitātes novērtēšanai. Pētījumā [86] 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 [87] eksperimentā ir konstatēts, ka īstermiņa atmiņas ilgums svārstās no 15 sekundēm līdz 30 sekundēm, citā pētījumā [88] atmiņas ilgums novērtēts ar 18–20 sekundēm, bet pēc Millera pētījuma [89], 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 attēlā redzamu bojājumu skaitam nav vajadzības būt lielākam par 9. Pētījumā [90] 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) .

Novērtēšanas metožu skalas

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 atkārtosanos (<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 (slaidieris)

2.2. tabulā atspoguļotajām metodēm ir norādītas ieteicamās skalas, bet tas nav jāuzskata par ierobežojumu vai šķērslī, var izmantot arī citas skalas, piemēram, 5 baļļu diskrētās skalas vietā var izmantot arī 9 un 11 baļļu diskrētu skalu. Teorētiski 5 baļļu MOS rezultātiem ir jābūt ar lielāku standarta novirzi [91], salīdzinot ar 9, 11 vai 100 baļļu MOS rezultātiem, kaut gan pētījumā [92] konstatēts, kas šīs atšķirības ir statistiski maznozīmīgas.

2.3. 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.

2.3. tabula

Novērtēšanas metožu izvēles vadlīnijas

Metode	Kvalitātes novērtēšanas paņēmieni		Testēšanas ilgums (laiks)	Respondenti	
	Kodēšanas	Pārraides		Tipiskie lietotāji (neeksperti)	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 **** labi piemērota *** vidēji piemērota ** slikti piemērota * ļoti slikti piemērota		***** ļoti īss **** īss *** normāls ** garš * ļoti garš	***** ļoti labi piemērota **** labi piemērota *** vidēji piemērota ** slikti piemērota * 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 (neekspertiem). Metodes, kuras ir uzskatāmas par precīzām un sarežģītām, piemēram, *SAMVIQ*, nav ieteicams izmantot tipiskiem lietotājiem (neekspertiem). 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 tik pat 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 diskretas novērtēšanas skalas – *ACR* un *ACR-HR*. Turpinājumā, aprakstot metodes darbības principus, tiks apskatīta tikai 5 baļļu diskretās skalas lietojuma piemērs.

Pēc katra video fragmenta atskaņošanas respondenti novērtē ne tikai video vispārējo kvalitāti 5 baļļu skalā, bet arī novērtē šī paša video fragmenta akceptēšanas kvalitāti 5 baļļu skalā, uz kuras nav atzīmētas vērtības 2.4. tabulā, bet vārdiski atzīmēti trīs novērtējumi – pieņemama (*acceptable*), neitrāla (*neutral*) vai nepieņemama (*unacceptable*) kvalitāte.

2.4. tabula

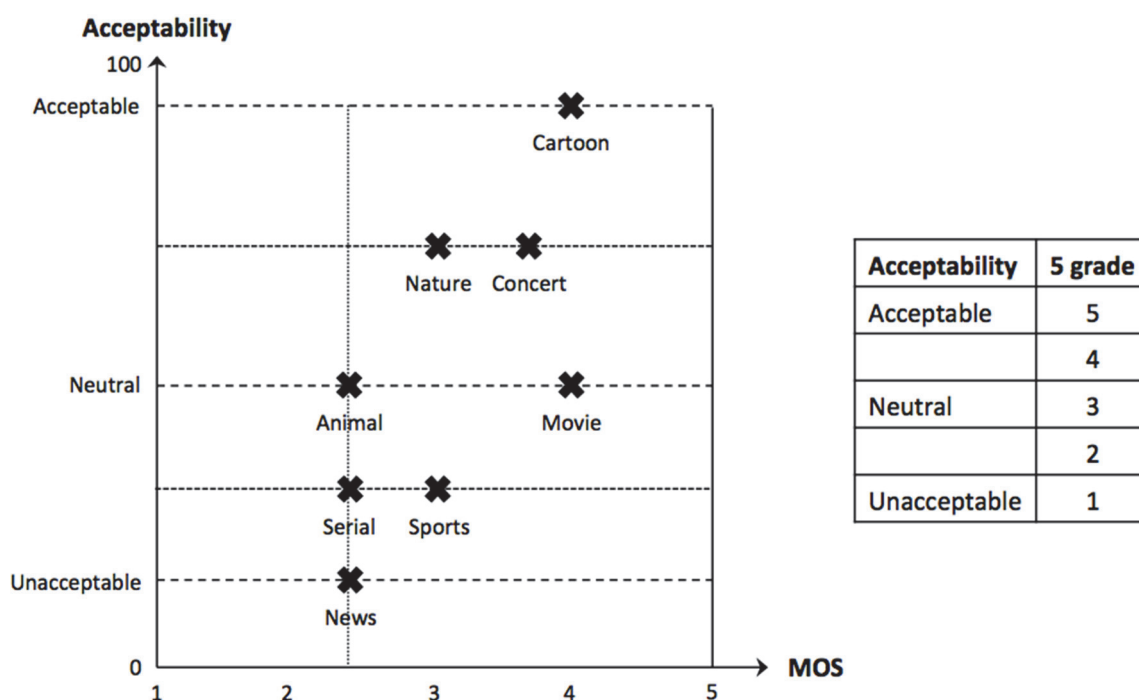
Kvalitātes un akceptēšanas novērtējuma skalas

Vērtība	Kvalitātes novērtējuma skala (<i>quality scale</i>)	Vērtība	Akceptēšanas novērtējumu skala (<i>acceptability</i>)
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>)

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 divkārsais

novērtējums visai nebūtiski pagarina kopējo testēšanas laiku. Tas nozīmē, ka viendimensionāla *MOS* novērtējuma vietā var iegūt divdimensionālu vispārējās kvalitātes un akceptēšanas novērtējumu.

Provizorisks rezultātu grafiks, kurā ir attēlots divdimensionāla *MOS* kvalitātes un akceptēšanas novērtējums 2.3. attēls. Pēc nepieciešamības 5 baļļu marķēto kvalitātes skalu, kā arī 5 baļļu nemarkēto akceptēšanas skalu, var lineāri transformēt uz vērtējuma skalu 0–100 [93], kur 1 atbilst 10 un 5 atbilst 90.



2.3. att. Provizorisks rezultātu grafiks – divdimensionāls *MOS*.

Šajā pētījumā [94] 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 [95], ka marķētas skalas gadījumā respondentiem ir tendence izvairīties no novērtēšanas skalā atzīmētiem galējiem (minimālais un maksimālais) vērtējumiem.

Eksperimentālā pētījumā [92] ir parādīta ļoti spēcīga lineāra sakarība starp 5, 9 baļļu diskrētām un 5, 11 baļļu nepārtrauktām novērtēšanas skalām. Tika konstatētas nebūtiskas statistiskas atšķirības starp video kvalitātes vērtējumiem, kuri iegūti, izmantojot minētās novērtēšanas skalas.

Savukārt pētījumā [96] ir konstatēts, ka 5 baļļu skalu lielākais respondentu skaits uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu 4.1. tabulā, līdzīgs rezultāts ir iegūts arī šajā pētījumā [81], kur *ACR* metode ar 5 un 11 baļļu skala ir atzīta par saprotamāko, skatīt 4. nodaļā.

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.

Mūsdienās *MOS* var uzskatīt par (*de-facto*) metriku vai mēru novērtējot multimediju kvalitāti [28]. Ticamu secinājumu iegūšanai, vadoties pēc aprēķinātā *MOS*, ir jānodrošina pietiekoši liels respondentu skaits, kur pēc [22] ir jābūt no 6 līdz 40, bet pēc [21] ne mazākam par 15. Pirms aprēķiniem ir jāveic testa datu apstrāde ar mērķi atrast un dzēst kļūdainus vai nepatiesus datus [21].

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

$$MOS_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij}}{N}, \quad (2.1)$$

kur $MOS_i = \overline{X}_i$.

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - MOS_i)^2} \quad (2.2)$$

$$MOS_i - t_{\alpha, N} \frac{S_i}{\sqrt{N}} < \mu < MOS_i + t_{\alpha, N} \frac{S_i}{\sqrt{N}}, \quad (2.3)$$

kur $1 - \alpha = 0,95$.

Atsevišķos gadījumos aprēķināta korelācija (Pīrsona korelācijas koeficients) r :

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (2.4)$$

vai arī Spīrmana korelācija ρ :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2.5)$$

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

Iepriekš 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 [29], jo tas ir viens no vairākiem statistikas mēriem, kā standartnovirze, ticamības intervāls, variācijas, asimetrijas, ekscesa koeficients, mediāna, moda, korelāciju aprēķins u.tml.

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.

Video kompresijas un pārraides tehniskie parametri var būtiski ietekmēt video kvalitātes novērtējumu tāpēc, lai nodrošinātu ticamus eksperimentu rezultātus tika izveidota atbilstoša laboratorija un video kvalitātes novērtēšanas metodika. Pirmkārt, bija izveidota eksperimentu veikšanas laboratorija, kura nodrošināja visiem respondentiem identiskus testa apstākļus, kā arī kontrolējamus un nemainīgus tehniskos parametrus. Otrkārt, bija izstrādāta metodika, kura apraksta specifiskus laboratorijas 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.

Laboratorijas telpa ir aprīkota vadoties pēc rekomendācijās [21] un [22] noteiktajiem parametriem. Testēšanai izmantota 25 m² telpa, aptuveni 5 m × 5 m. Dabīgā apgaismojuma aizturēšanai un apgaismojuma intensitātes regulēšanai izmantotas necaurspīdīga auduma ruļļu žalūzijas, apgaismojuma līmenis aizvērtā veidā 0 lx. Mākslīgā 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 faktoros, kuri var ietekmēt testēšanas rezultātus, piemēram, fona trokšņa līmenis [66], 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 uzskaitīti svarīgākie testēšanas telpas mikroklimata rādītāji un to vērtības.

Testēšanas telpas mikroklimats

Rādītājs	Vērtība
Apgaismojuma līmenis	200 lx
Apgaismojuma temperatūra (<i>CCT</i>)	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*). Laboratorijas telpas aprīkojums nodrošināja visiem respondentiem kontrolējamus un gandrīz identiskus testēšanas apstākļus.

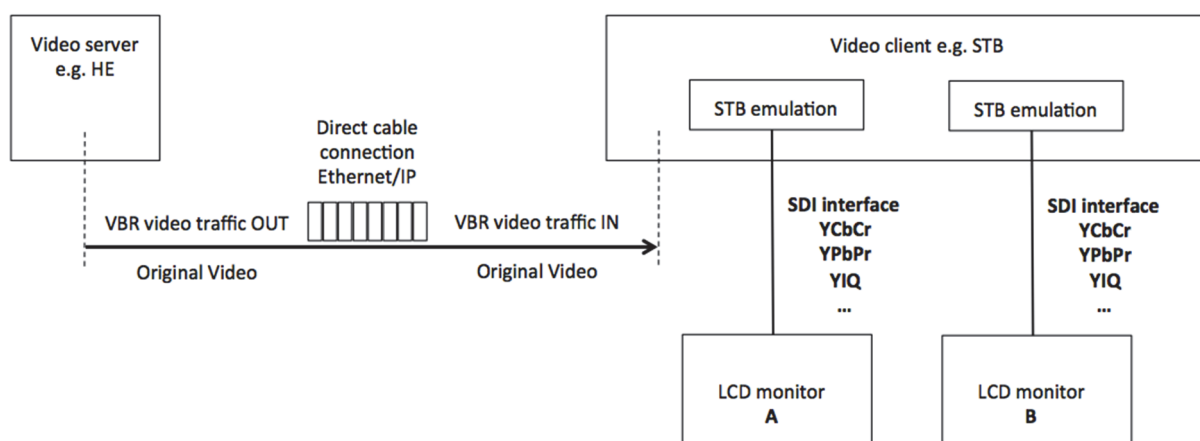
Pētījumos tika izmantota vairāku ražotāju aparatūra un programmatūra, t.sk. dažādas klases monitori, dekoderi, savienošanas interfeisi, galvstacijas un tīkla aprīkojums, bet par pamatu tika izmantota speciāli aprīkota testa telpa, apgaismojuma un krāsas mērījumu aprīkojums, studiju kvalitātes *LCD* monitori, 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.

Monitora ekrāns 1920 × 1080, (4 : 2 : 2), 10 bitu RGB krāsu modelis, video interfeisi – *SDI, CVBS, RGB/YPbPr, HDMI/YCbCr* –, ekrāna spilgtuma uzstādīšana un mērījumi (cd/m^2 , 0–500 cd/m^2), kontrasta attiecība (1300 : 1), iebūvēta kalibrēšana, izmantojot spektroskopu, *AWB (Automatic White Balance)* uzstādīšana, krāsu temperatūras uzstādīšana (K, 4000–13000 K, *CCT*, *x*, *y* ir robežās no 0,27 līdz 0,35) un mērījumi, krāsu intensitātes vektroskops un signāla amplitūdas (*IRE*, 0 vai 7,5–100) mērījumi u.c. ir tikai daži kontrolējami monitora parametri. 3.2. tabulā ir uzskaitīti svarīgākie raksturlielumi, kuri izmantoti eksperimentos lietoto monitoru kalibrēšanai.

Monitora parametri un kalibrēšana

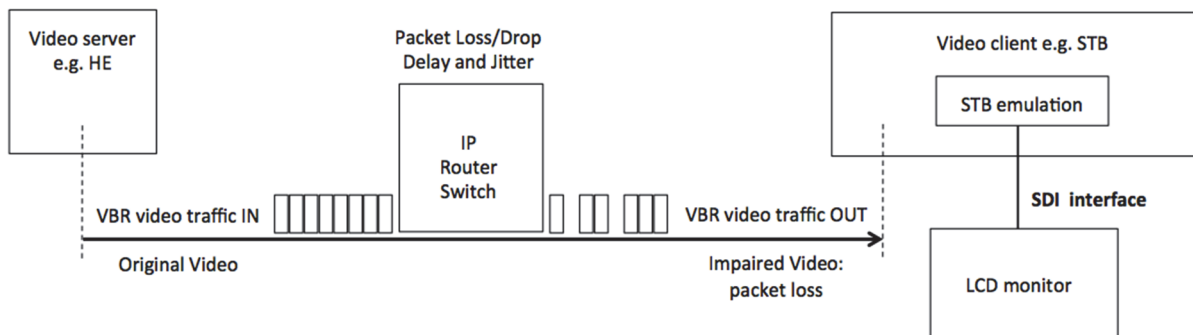
Rādītājs	Vērtība
Spilgtuma līmenis (pīķa vērtības)	200 cd/m ²
Apgaismojuma temperatūra (<i>CCT</i>)	6500 K
Baltās krāsas punkts (<i>CCT</i>)	D65
<i>CIE xyY</i> (<i>CCT</i>)	$x = 0,3128, y = 0,3292$
Ekrāna izšķirtspēja un proporcija	1920 × 1080, 16 : 9
Ciparu video signāls (jēldatu/ <i>RAW</i>)	<i>SDI</i> 1920 × 1080p
Skatīšanās attālums un leņķis	3H, 30°
Pārējie tehniskie raksturlielumi atbilstoši [21], [65] un [66]	

Pētījumos par video kodēšanas un video interfeisu kvalitātes novērtēšanu [38] ir izmantota slēguma shēma atbilstoši 3.1. attēlā parādītai. 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 [39] ir izmantota slēguma shēma atbilstoši 3.2. attēlā parādītai. Līdzīgi kā kodēšanas, tā arī pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas testos izmantots *FR* (*Full Reference*) paņēmieni, kur pikselis 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 vektroskopu (*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 – kolorimetrs (*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.

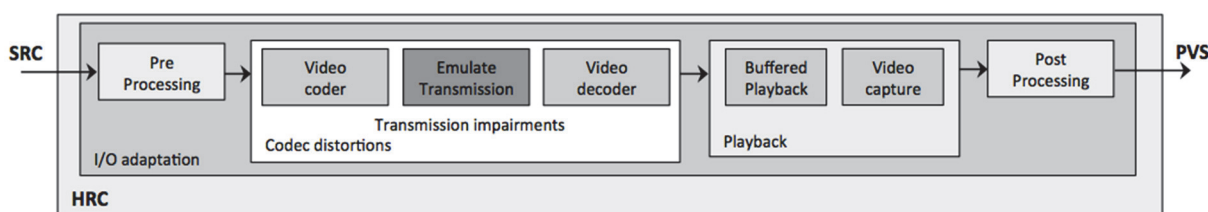
Video kvalitātes testēšanā izvēlētais video materiāls būtiski ietekmē iegūtos rezultātus, tāpēc, atlasot video materiālu, tika ņemti vērā ieteikumi no šī pētījuma [97], kā arī atsevišķi ieteikumi no pētījumā analizēto publisko video materiālu datubāzēs pieejamās informācijas [98], t.sk. individuāliem pētījumiem par katru video materiālu datu krātuvē. Testēšanā izmantotais video materiāls tika atlasīts pēc dažādiem video datnes raksturlielumiem [99], [100]: 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, [101], šāda veida materiāli publiski ir pieejami visai ierobežotā skaitā. Atsevišķos eksperimentos video testēšanai tika izmantoti sintētiski radīti video materiāli no komerciālām video datu krātuvēm [102]. Sevišķi sarežģīti ir atrast un atlasīt saturiski plašu spektru (ziņas, seriāli, filmas, multfilmās, daba, dzīvnieki, sports u.tml.) video materiālu ar vēlamajiem 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. Minētie video fragmenti tika izmantoti [39] pētījumā par pakešu zudumu ietekmi uz video kvalitātes vērtējumu.

Video fragmentu atlasē pirmais solis ir izslēgt testēšanā izmantojamus video fragmentus, kuri ļoti būtiski var ietekmēt katra indivīda saturisko novērtējumu [100]: 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* [103]. Piemēram, ja video fragmenta fonam ir ļoti augsta kustību intensitāte, tad cilvēka uztvere nespēj iegūt tik pat precīzu strukturālu informāciju par video fragmentā redzamo objektu salīdzinājumā ar statisku attēlu. Savukārt, palielinot video fragmenta kontrastu, objekti tiek uztverti ar mazāku nenoteiktību [104]. 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 novērtējumu.

Vēl viena ļoti svarīga lieta, kura seko pēc video fragmentu atlasē, ir video fragmentu sagatavošana. Testēšanā izmantoto video fragmentu *HRC (Hypothetical Reference Circuits)* ieguvu no atlasītiem (oriģināliem) video fragmentiem *SRC (Source Reference Channel)* vai *Circuits* skatīt 3.3. attēlā.



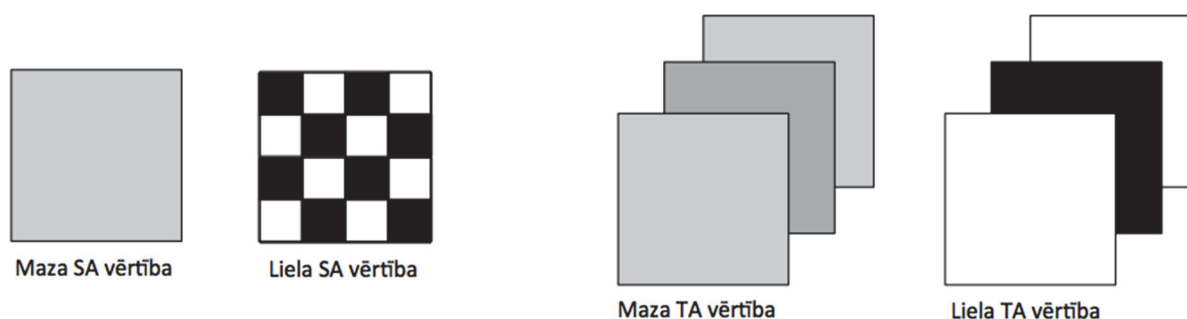
3.3. att. *HRC* video ieguve no *SRC* video fragmentiem.

No *SRC* iegūst *HRC*, bet respondentiem uz ekrāna 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 izvēlēta video kvalitātes testēšanas metode, skatīt 2. nodaļu.

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

Video kvalitātes novērtēšanas testos svarīga ir izvēlēto video sižetu atlase. Būtiski ir video sižeta telpiskie *SA* (*Spatial Activity*) un laika *TA* (*Temporal Activity*) parametri [105] [106] [107], kā arī video sižetu saturs [108]. Praksē ir pieejamas vairākas metodes video sižeta *SA* un *TA* parametru aprēķinam, bet darbā tiks izmantota metode no rekomendācijas [22].

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



3.4. att. *SA* un *TA* vērtību ilustratīvs attēlojums.

Atsevišķus video attēla kvalitātes bojājumus/artefaktus, 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 kadram malu detektēšanai (*y* spilgtuma komponente) laika momentā (F_n) lieto $[Sobel(F_n)]$ filtrēšanu.

Atfiltrētām rezultātam 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:

$$SA = std_{space}[Sobel(F_n)]. \quad (3.1)$$

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:

$$M_n(i, j) = F_n(i, j) - F_{n-1}(i, j), \quad (3.2)$$

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

$$TA = std_{space}[M_n(i, j)]. \quad (3.3)$$

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 $SA = 0$.

Sintētiskie video izmantoti šajā [109], [110] pētījumā, bet standarta televīzijas pārraižu video izmantoti šajā [39] pētījumā. Šajā pašā pētījumā sintētiskiem video sižetiem ir konstatēta negatīva logaritmiska atkarība no TA ($r = -0,85$).

Testēšanā izmantoto video fragmentu paraugu skatīt www.youtube.com (meklētājā ierakstīt „Romass Pauliks video quality testing”).

Video kvalitātes testēšanā izvēlētais video materiāls var atstāt 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 var samazināties MOS un palielināties ticamības intervāla robežas, tāpēc jāizvēlas pēc iespējas neitrālākas tēmas. Otrkārt, video sižeti ir jāatlasa pēc tehniskajiem parametriem, jāaprēķina katra individuāla video sižeta telplaika SA un laika TA vērtība. 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.

Pirmajā posmā respondenti tika atlasīti pēc dzimuma, vecuma, izglītības līmeņa, profesijas vai nodarbošanās sfēras [20]. 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 (*non-expert*). Minētie respondentu atlasē 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. [111] un [112] 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.

Otrajā posmā, lai novērtētu atlasīto respondentu vispārējo redzes līmeni, tikai izveidots vienkāršots redzes, krāsu atšķirtspējas un kontrasta jūtības pārbaudes tests. Lai savāktu iepriekš minēto informāciju par respondentiem, tika izstrādāta speciāla anketa,

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. *Ishihara* tests ļauj vienkāršā un ātrā veidā identificēt problēmu.

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 nomainas laikā tiek attēlots pelēks ekrāns ar instrukciju, kā jāaizpilda anketa. Respondentiem jāaizpilda anketa ar 24 tukšiem tabulas laukiem 96 sekunžu laikā.

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

Savukārt atsevišķos eksperimentos kontrasta jūtības pārbaudēm tika izmantota (*Pelli-Robson Chart*) metodes [113] kartītes elektroniskais attēls [114], kas tika attēlots monitorā. Kartīte ekrānā attēlota kā statisks attēls, kartītes attēlošanas laikā jāaizpilda anketa. Respondentiem jāaizpilda anketa ar 48 tukšiem burtu laukiem 60 sekunžu laikā.

4. Video kvalitātes eksperimentālie pētījumi

Ceturtnā nodaļa ir veltīta video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu aprakstam, kuros konstatētas vairākas video attēla kvalitātes subjektīvo un objektīvo parametru sakarības. Pirmā apakšnodaļa ietver aprakstu par dažādu video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu pielietojuma novērtēšanas eksperimentu. Otrā apakšnodaļa ietver aprakstu par dažādu video kompresijas un interfeisu ietekmes kvalitātes novērtēšanas eksperimentu. Trešā apakšnodaļa ietver aprakstu par pakešu zuduma ietekmes kvalitātes novērtēšanas eksperimentu. Nodaļas nobeigumā kopsavilkums un secinājumi.

Video kvalitātes novērtēšanas skalu un ekrānu lietojuma novērtēšana

Atsaucoties uz literatūras pārskatu, skatīt 2. nodaļā, redzams, ka praksē tiek izmantoti ļoti daudz un dažādas video kvalitātes novērtēšanas metodes, piemēram, *ACR*, *DCR*, *PC*, *SCJAC* u.tml., un katrai no tām ir savi specifiski testa izpildes nosacījumi – *FR*, *RR* vai *NR*, viena vai divu ekrānu, 5, 7, 9, 11 vai 100 baļļu skalas. Minētais arī kalpoja kā galvenā motivācija pētījumiem, kā rezultātā jānoskaidro, kura no video kvalitātes testēšanas metodēm ir vieglāk uztverama un saprotama.

Eksperimenta mērķis.

1. Veikt pētījumus par video kvalitātes novērtēšanas metodēm, kā rezultātā izvēlēties atbilstošas 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 lapā), 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 par 2–3 minūtēm. Izmantojot šos 8 jautājumus, bija jānoskaidro, kura no video kvalitātes testēšanas metodēm (viena vai divu ekrānu) un skalām (5, 9, 11 vai 100) ir vieglāk uztverama un saprotama.

Eksperimentā piedalījās vairāk nekā 1300 respondenti, 1265 respondentu anketas tika atzītas par derīgām, 738 sievietes un 527 vīrieši, vecumā no 11 līdz 85 gadiem.

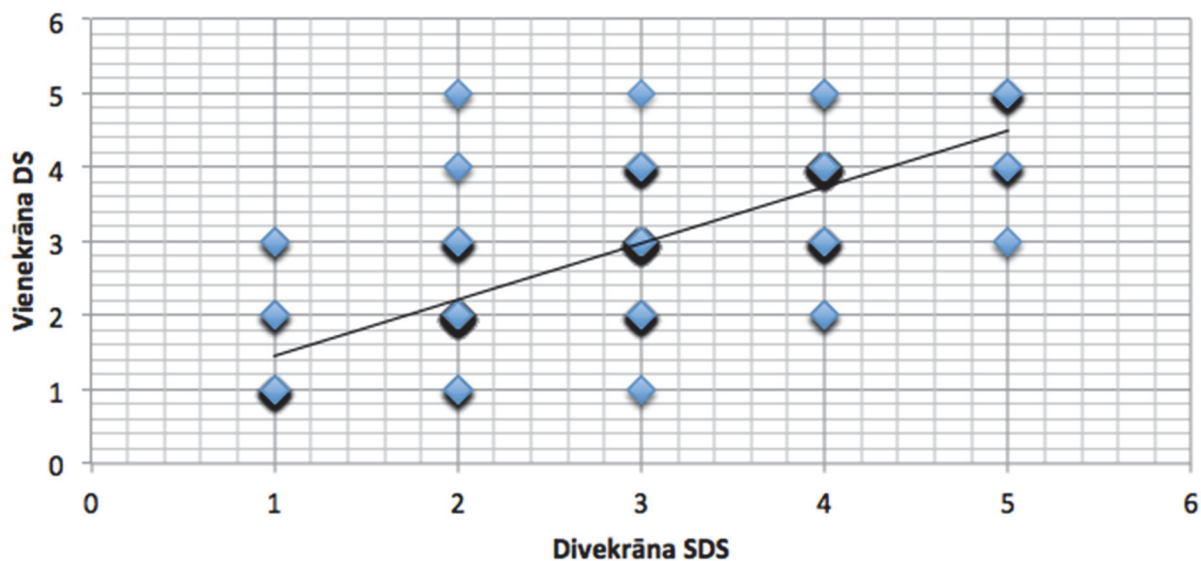
Testos tika izmantotas viena un divu ekrānu metodes, 5, 9, 11 un 100 baļļu skalas.

Pētījumā [96] ir konstatēts, ka 5 baļļu skalu lielākais respondentu skaits uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu 4.1. tabulā, līdzīgs rezultāts ir iegūts arī šajā pētījumā [81], 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

Šajā pašā pētījumā ir parādīts, ka ir nebūtiskas statistiskas atšķirības starp viena ekrāna un divu ekrānu metodēm [96], kaut gan vairums (70%) respondentu testēšanā vēlētos izmantot divu ekrānu metodi. 5 baļļu skalas gadījumā atšķirība starp *DS* un *SDS* metodēm ir statistiski nenozīmīga ($r = 0,78$), skatīt 4.1. attēlā.



4.1. att. Viena ekrāna un divu ekrānu metožu izvēle.

Ņemot vērā iepriekš izklāstīto, kodēšanas un video interfeisu parametru ietekmes novērtēšanai izmantota *PC* metode (*DS* un *SDS*), bet pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai izmantota *ACR- HR* metode.

Eksperimenta galvenie rezultāti.

1. 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.
2. Ir konstatēts, ka 5 baļļu skalu lielākais respondentu skaits uzskata par vieglāk uztveramu un saprotamu.

Video kompresijas un interfeisu ietekmes kvalitātes novērtēšana

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. Minētais arī kalpoja kā galvenā motivācija pētījumiem, kā rezultātā jānoskaidro video interfeisu kvalitātes rangs un būtiskākie video kompresijas parametri, kuri ietekmē video kvalitātes vērtējumu.

Eksperimenta mērķis.

1. Veikt dažādu video signālu un interfeisu video kvalitātes salīdzināšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi.
 - 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 telplaika (*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 [115] 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 $3 \cdot 12 + DS$ testi $2 \cdot 11$). 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 nēsā brilles vai lēcas, 48 % inženierzinātnes, 28 % sociālās zinātnes un 24 % humanitārās zinātnes pārstāvji.

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

Ietilpīga eksperimentāla pētījuma ietvaros, kura rezultāti ir atspoguļoti [116] un [38] ir veikta gan video interfeisu, gan arī video kodētāju kvalitātes novērtēšanas testi. Par video kodētāju kvalitātes novērtēšanu skatīt 3. nodaļā, bet turpinājumā par video interfeisu kvalitātes novērtēšanu.

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.

Kvalitātes novērtēšanas rezultāti attēloti 4.2. tabulā un 4.2. attēlā. Katram video interfeisam aprēķināts *MOS* (5 ballu 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 vienkārša metodes gadījumā kvalitātes novērtējuma atšķirības starp analogo *YPbPr* 720p un ciparu *YCbCr* 1080i video interfeisiem ir statistiski nenozīmīgas.

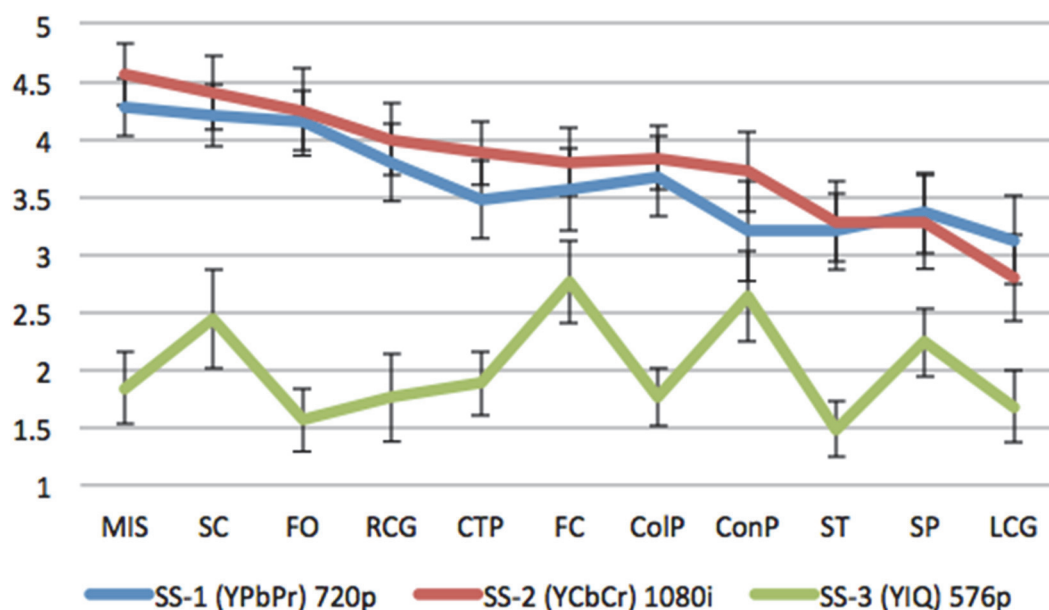
4.2. tabula

Video interfeisu salīdzinājums (vienkrāna)

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

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.

Lai savstarpēji varētu salīdzināt divus dažādus video interfeisus specifiskācijas, tad uz diviem ekrāniem vienlaicīgi savstarpēji 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.

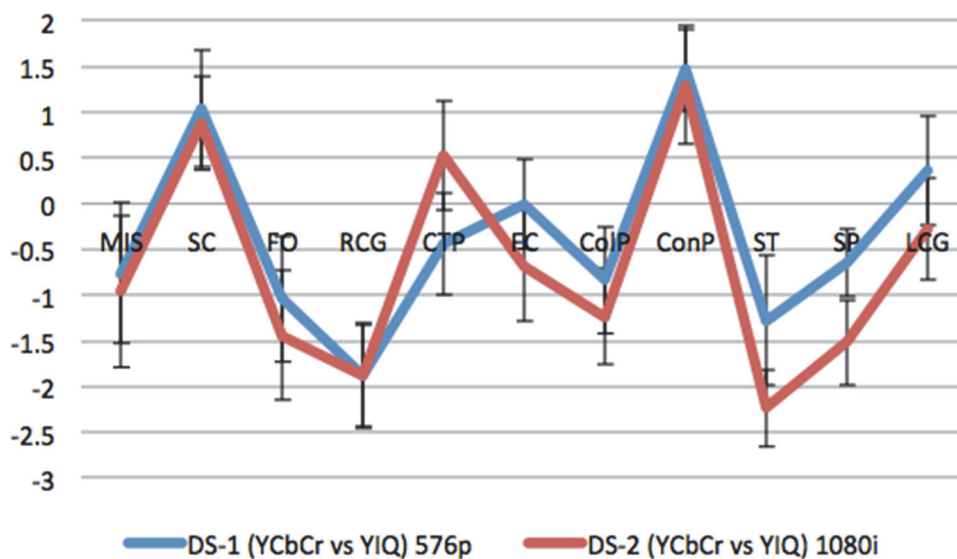
Kvalitātes novērtēšanas rezultāti attēloti 4.3. tabulā un 4.3. attēlā. Katram video interfeisam aprēķināts *MOS* (7 baļļu skala, *SCJAC*) un ticamības intervāli. Starp *DS1* un *DS2* var novērot ciešu korelāciju ($r = 0,89$). Tas nozīmē, ka ir novērotas statistiski nenozīmīgas atšķirības starp 576p un 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 1. nodaļā

4.3. tabula

Video kodētāju salīdzinājums (divekrānu)

Video sižeti	<i>DS1</i> (<i>YCbCr</i> vs <i>YIQ</i>)		<i>DS2</i> (<i>YCbCr</i> vs <i>YIQ</i>)	
	576p		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



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

Video sižetiem ar lielu telplaika 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.

Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telplaika 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.

TA un *SA* aprēķinus skatīt 4.4. tabulā. Sintētiskie video izmantoti šajā [117] pētījumā. Šajā pašā pētījumā sintētiskiem video sižetiem ir konstatēta negatīva logaritmiska atkarība no *TA* ($r = -0,85$).

4.4. tabula

Sintētisko video sižetu *SA* un *TA* 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.

Eksperimenta galvenie rezultāti.

1. Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telplaika (*TA*) parametru vērtības ($r = -0,85$).

Video pārraides pakešu zuduma ietekmes kvalitātes novērtēšana

Atsaucoties uz literatūras pārskatu, skatīt 1. nodaļā, redzams, ka video kvalitātes samazināšanos pārraidot IP tīklos ietekmēt pakešu aiztures, trīce un zudums. Lielas pakešu aiztures un trīce rada pakešu zudumu, tāpēc eksperimentos izmantots pakešu zuduma rādītājs. Minētais arī kalpoja kā galvenā motivācija pētījumiem, kā rezultātā jānoskaidro kā pakešu zuduma apjoms un sadalījums ietekmē video kvalitātes vērtējumu.

Eksperimenta mērķis.

1. Veikt pakešu zuduma ietekmes uz video kvalitāti novērtēšanas eksperimentus un statistisko datu apstrādi.
 - 1.1. Mainīga ātruma video (VBR) plūsmai veikt pakešu atmešanu.
 - 1.1.1. Atmest 0,25 %, 1 %, 2 % un 5 % paketes no kopējā video sižeta apjoma.
 - 1.1.2. Pakešu atmešanai izmantot Puasona, Gausa un vienmērīgo varbūtību sadalījumu.
 - 1.2. Veikt video kvalitātes novērtēšanu.
 - 1.2.1. Veikt video kvalitātes novērtēšanu, izmantojot *ACR-HR* (0,25 % un 1 % pakešu zudumam).
 - 1.2.2. Veikt video kvalitātes novērtēšanu pēc *MSE* un *PSNR* (0,25 %, 1 %, 2 % un 5 % pakešu zudumam).
 - 1.3. Veikt bojāto video sižetu *GOP* kadru (*I* un *P* kadri) mērījumus.
 - 1.4. Veikt vidējā vērtējuma (*MOS*), standarta novirzes, ticamības intervālu un korelācijas koeficienta aprēķinus.
2. Veikt video sižetu atlasī un novērtēšanu, kuri tiks izmantoti darba eksperimentos.
 - 2.1. Veikt video sižetu atlasī pēc satura (daba, dzīvnieki, sports, ziņas u.tml.).
 - 2.2. Veikt video sižetu atlasī pēc telpas (*SA*) un telplaika (*TA*) mērījumiem.
 - 2.3. Veikt oriģinālā un bojāto (kodēšanas vai pārraides rezultātā radušos bojājumu) video sižetu salīdzinājumu pēc *MSE* un *PSNR* mērījumiem.

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 bija jānoskaidro, 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 [39] 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 [39] ir izmantota 3.2. attēlā parādītā slēguma shēma. Līdzīgi kā kodēšanas, tā arī pārraides kanāla kvalitātes novērtēšanas testos izmantots *FR (Full Reference)* paņēmieni, kur pikselis pēc pikseļa (*pixel-by-pixel*) tiek salīdzināts oriģinālā (*original*) un uztvertā/bojātā (*impaired*) video attēls, veicot laukietilpīgas un apjomīgas skaitļošanas operācijas.

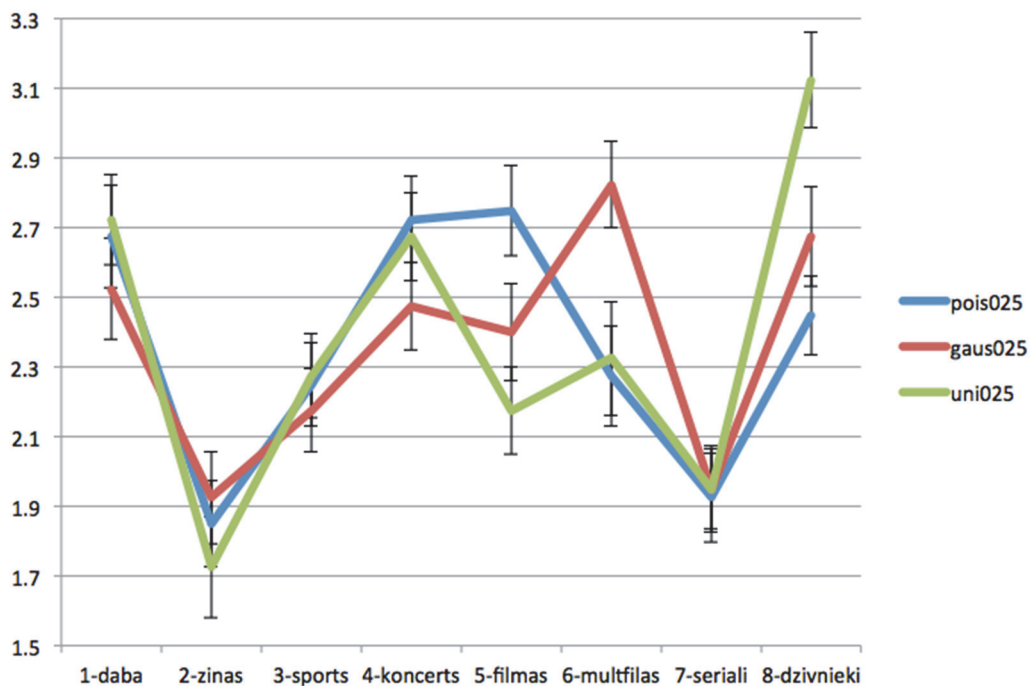
Video kvalitātes novērtēšanas testi tika veikti trijās testa grupās: respondentu redzes pārbaudes testi, iepazīšanās tests un pamattests. Kopējais testa laiks 45 minūtes.

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.

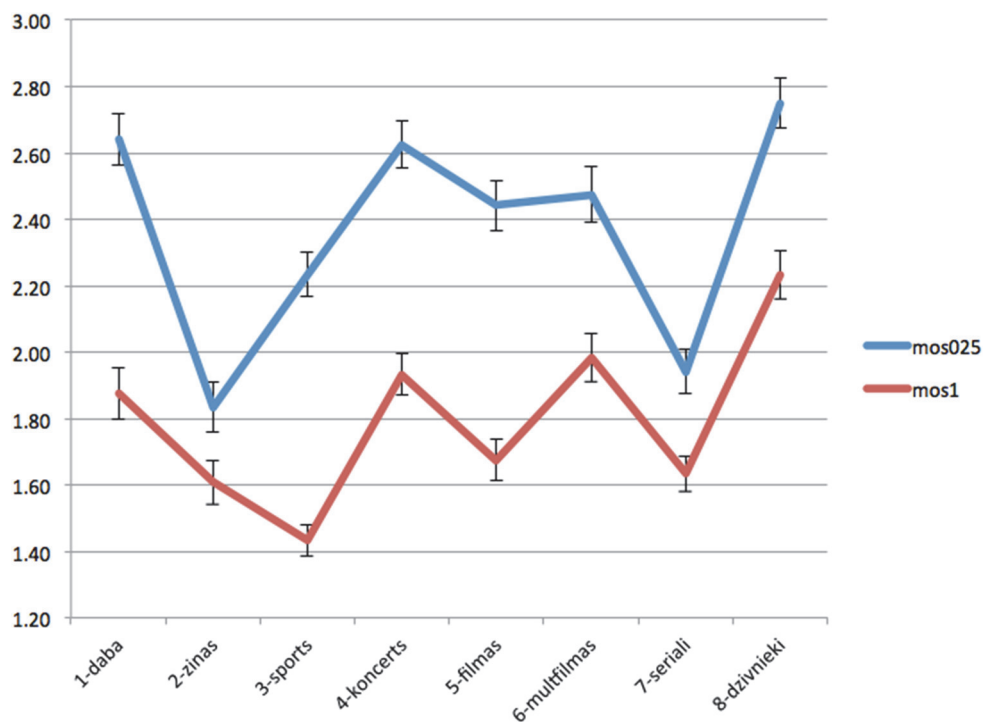
Minētais motivēja meklēt sakarības starp šiem dažādiem varbūtību sadalījumiem (Puasona, Gausa un vienmērīgais), kuri tika izmantoti, aprakstot pakešu atmešanas statistiku. Šajā pašā pētījumā ir meklētas un atrastas pakešu zuduma apjoma robežvērtību saistības ar *MOS* vai kvalitātes novērtējumu.

Pētījumā [39] par 0,25 % pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* nav novērota atšķirība starp Puasona, Gausa un vienmērīgo sadalījumu 4.4. attēlā, kuri tika izmantoti kā gadījuma sadalījumi, atmetot paketes.



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

Pētījumā [39] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* var novērot būtisku atšķirību, 4.5. attēlā, starp 0,25 % un 1 % pakešu zudumu Puasona, Gausa un vienmērīgā sadalījumiem, atkarībā no video sižetiem.



4.5. att. *MOS* vērtības 0,25 % un 1 % pakešu zudumam.

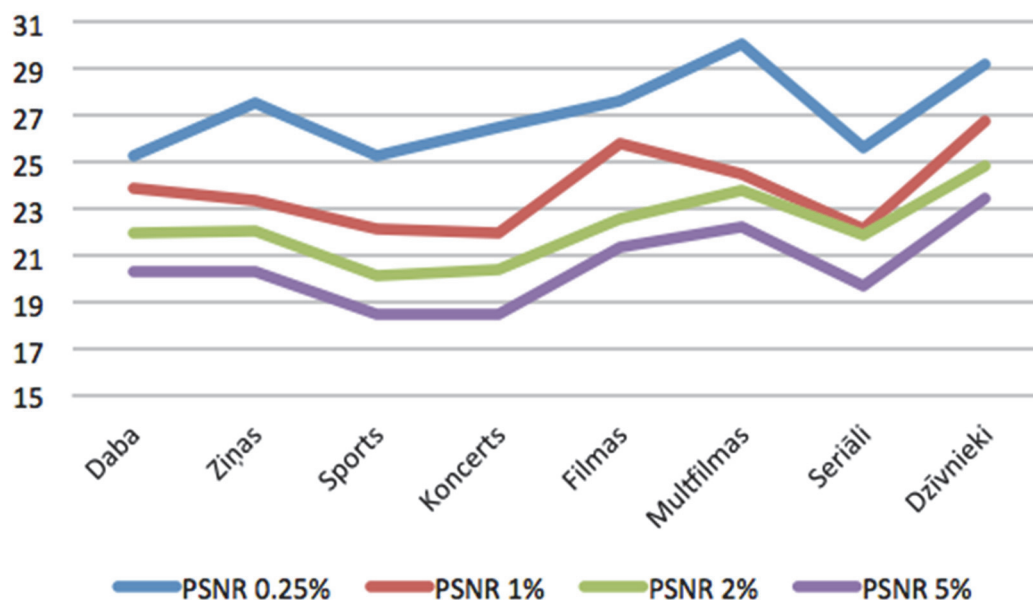
Pētījumā [39] par pakešu zuduma ietekmi uz *MOS* ir konstatēta visai vāja saistība ar *PSNR* (no $r = 0,28$ līdz $r = 0,60$), skatīt 4.5. tabulā.

4.5. tabula

MOS (0,25 % un 1 % pakešu zudumam), salīdzinot ar *MSE* un *PSNR*

Sižeti	<i>MSE</i>		<i>PSNR</i> (dB)		<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
Multfilmas	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 4.6. attēlam.



4.6. att. *PSNR* atkarībā no video sižeta.

Kaut arī video kvalitātes vērtējums (*MOS*) vāji korelē ar objektīvo video kvalitātes vērtējumu (*PSNR* un *lgMSE*) pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai (no $r = 0,28$ līdz $r = 0,60$),

tomēr liela pakešu zuduma (≥ 1 %) gadījumos *PSNR* un *IgMSE* var izmantot *MOS* prognozēšanai.

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.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

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, kuri ietekmē video kvalitātes novērtējumu – 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)* 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 uz ekrāna. 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 uz ekrāna 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 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 [32] 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 no $MOS = 1,4$ līdz $MOS = 2,2$;
- Konstatēts, ka ITU-T [32] un [31] 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 apbētas ar video 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 [117] 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 redzamu 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;

- Ir izveidota testgultne video kvalitātes novērtēšanas eksperimentu veikšanai:
 - ir izveidota testgultnes telpa ar tehniskiem parametriem atbilstoši (BT.500, 2012), (P.910, 2008) un [66], t.sk. telpas apgaismojums, apgaismojuma krāsas un mikroklimate mēraparatūra;
 - 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;
- 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 uz ekrāna (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 telplaika 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 nespēcīlistu, nevis ekspertu, kvalitātes novērtējuma testi, tāpēc visos darba eksperimentos bija pieaicināti respondenti, kuri nav eksperti;

- Ir veikts video kvalitātes novērtēšanas metožu salīdzinājuma eksperimenti un statistisko datu apstrāde;
 - 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 ($MOS = 1$ līdz $MOS = 2,5$ *MOS* ballēm zemāks salīdzinājumā ar *YCbCr* un *YPbPr*);
 - Sintētiskā video sižetu kvalitātes vērtējums *MOS* ir apgriezti proporcionāls logaritmam no telplaika (*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 nenozīmīgas 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 sižeta, kuri izmantoti darba eksperimentos atlase un novērtēšana;
 - Sintētisko video sižeta vērtējumu ietekmē telpa laika 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 uz ekrāna 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 nenožīmīgas 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.

Pakešu zuduma, aiztures un trīces statistikai izmanto dažādus sadalījuma procesus. Maza pakešu zuduma (≤ 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 $\lg MSE$) pakešu zuduma ietekmes novērtēšanai (no $r = 0,28$ līdz $r = 0,60$), tomēr liela pakešu zuduma (≥ 1 %) gadījumos $PSNR$ un $\lg MSE$ 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] TNS Latvia, «TNS Latvia,» 21. novembris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.tns.lv/?lang=lv&category=showproduct&id=tvm>. [Piekļūts 21. novembrī 2013].
- [2] 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].
- [3] 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].
- [4] dvb.org, 4. marts 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.dvb.org/>. [Piekļūts 4. martā 2015].
- [5] atis.org, 5. marts 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.atis.org/>. [Piekļūts 5. martā 2015].
- [6] E.800, «Definitions of terms related to quality of service,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2008.
- [7] 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.
- [8] Stockhammer T., «Dynamic adaptive streaming over HTTP – Standards and design principles,» *MMSys'11 – Proceedings of the 2011 ACM Multimedia Systems Conference*, 2011.
- [9] Gozdecki, J. Jajszczyk, A. Stankiewicz, R., «Quality of service terminology in IP networks,» sēj. 41, nr. 3, pp. 153–159, 2003.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ATIS-0800008, «QoS Metrics for Linear (Broadcast) IPTV,» 2011.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] QUALINET, 12. februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.qualinet.eu>. [Piekļūts 12. februārī 2015].
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] BT.500, «Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures,» ITU–R Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [22] P.910, «Subjective video quality assessment methods for multimedia applications,» ITU–T Rec, Geneva, Switzerland, 2008.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] P.10/G.100, «Vocabulary and effects of transmission parameters on customer opinion of transmission quality,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2006.
- [31] G.107, «The E-model: a computational model for use in transmission planning,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2015.
- [32] G.1070, «Opinion model for video-telephony applications,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 2012.
- [33] Moller, S., *Quality Engineering: Qualitat Kommunikationstechnischer Systeme*, Springer, 2010, p. 212.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Pauliks, R. Slaidins, I., «Quality Evaluation of Synthetic Video in Simultaneous Double Stimulus Environment,» *IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 2013.
- [39] Pauliks, R. Slaidins, I. Krauze. A. Tretjaks, K., «Assessment of IP packet loss influence on perceptual quality of streaming video,» 2015.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Gonick L. Smith W., *The Cartoon Guide to Statistics*, New York: HarperPerennial A Division of HarperCollinsPublishers, 1993.
- [44] Spiegel M. Stephens L., *Schaums Outline of Statistics, Fourth Edition (Schaum's Outline Series)*, McGraw-Hill; 4 edition, 2011, p. 600.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.

- [48] Zhang Y. Duffield N. Paxson V. Shenker S., «On the Constancy of Internet Path Properties,» *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop*, 2001.
- [49] Win M. Z. Pinto P. C. Shepp L.A., «A mathematical theory of network interference and its applications,» *Proceedings IEEE*, 2009.
- [50] Cidon I. Khamisy A. Sidi M., «Analysis of packet loss processes in high-speed networks,» *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993.
- [51] Paxson, V., «End-to-end Internet packet dynamics,» *EEE/ACM Transactions on Networking*, 1999.
- [52] Yajnik M. Moon S. Kurose J. Towsley, D., «Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss,» *Proceedings IEEE INFOCOM*, 1999.
- [53] 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.
- [54] Kanumuri S. Cosman P. C. Vaishampayan V. A. Reibman A. R., «Modeling Packet-Loss Visibility in MPEG-2 Video,» *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] Mathis M. Semke J. Mahdavi J. Ott T., «The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm,» *Computer Communication Review*, 1997.
- [60] Izquierdo M. R. Reeves D. S., «Survey of statistical source models for variable-bit-rate compressed video,» *Multimedia Systems*, 1999.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] P.911, «Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 1998.
- [66] P.800, «Methods for subjective determination of transmission quality,» ITU-T Rec, Geneva, Switzerland, 1996.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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. [Pieklūts 6. novembrī 2013].
- [70] 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.
- [71] G.107, «The E-model: a computational model for use in transmission planning,» ITU-T Rec., Geneva, Switzerland, 2014.
- [72] 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.

- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] Tektronix/Sarnoff PQR Picture Quality Metric, «Tektronix,» 21. februāris 2015. [Tiešsaiste]. Pieejams: www.tektronix.com/PQA500. [Piekļūts 21. februārī 2015].
- [78] 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.
- [79] Dijk A. M. Martens J. B., «Perceptual image quality: concept and measurement,» *Philips Journal of Research*, sēj. 47, pp. 35–62, 1992.
- [80] Dijk A. M. Martens J. B., «Subjective quality assessment of compressed images,» *Signal Processing*, sēj. 58, p. 235–252, 1997.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] Keelan, B., *Handbook of Image Quality: Characterization and Prediction*, CRC Press, 2002, p. 544.
- [86] Pinson M. Wolf S., «Comparing subjective video quality testing methodologies,» *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Lugano, Switzerland, 2003.
- [87] Atkinson R. C. Shiffrin R. M., «The control process of short term memory,» Standord University, Stanford, California, US, 1971.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.

- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] Winkler, S., «stefan.winkler.net,» 5. jūnijs 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://stefan.winkler.net/resources.html#Video>. [Piekļūts 27. decembrī 2013].
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] CDVL, «The Consumer Digital Video Library,» 13. marts 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.cdvl.org>. [Piekļūts 13. martā 2014].
- [102] equasys, «equasys GmbH,» 13. marts 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://download.equasys.de/downloadvideo.html>. [Piekļūts 21. janvārī 2012].
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] Fischer, W., *Digital Video and Audio Broadcasting Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Kortum P. Sullivan M., «The effect of content desirability on subjective video quality ratings,» sēj. 52, nr. 1, pp. 105–118, 2010.
- [109] 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.
- [110] Pauliks, R. Slaidins, I., «Quality Evaluation of Synthetic Video in Simultaneous Double Stimulus Environment,» *IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 2013.
- [111] Deffner G. Yuasa M. McKeon M. Arndt D., «Evaluation of Display-Image Quality: Experts vs. Non-Experts,» *SID Digest*, pp. 475–478, 1994.
- [112] Heynderickx I.E. Soren B., «Image quality assessment by expert and non-expert viewers,» *Human Vision and Electronic Imaging VII*, 2002.
- [113] Eye charts, 10. oktobris 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: <http://www.psych.nyu.edu/pelli/charts.html>. [Piekļūts 21. maijā 2015].
- [114] 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.
- [115] Pauliks, R. Slaidins, I., «Quality Evaluation of Synthetic Video in Simultaneous Double Stimulus Environment,» *IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 2013.
- [116] 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.
- [117] R. A. L. B. Z. H.-J. Shahid M., «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.