

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Radioelektronikas institūts

Krišs OSMANIS

Doktora studiju programmas „Elektronika” doktorants

DAUDZPLAKŅU VOLUMETRISKĀS 3D VIZUALIZĀCIJAS SISTĒMAS MODEĻA ANALĪZE UN IZVEIDE PROGRAMMĒJAMOS LOĢISKOS MASĪVOS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Profesors *Dr. sc. ing.*

PĒTERIS MISĀNS

Akadēmiskais konsultants

As.profesors *Dr. sc. ing.*

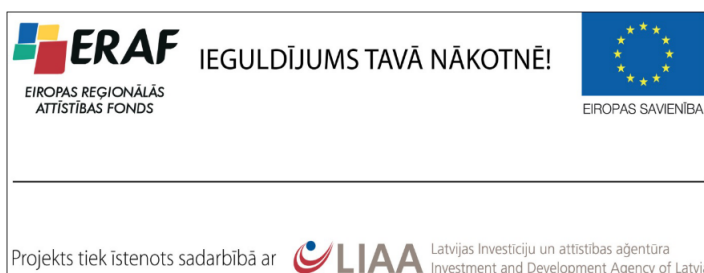
ELMĀRS BEĶERIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2016

Osmanis K. Daudzplakņu volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas modeļa analīze un izveide programmējamos loģiskos masīvos. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 51 lpp.

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



Šis darbs ir izstrādāts SIA „LEO pētījumu centrs” projekta „Latvijas elektronisko un optisko iekārtu ražošanas nozares kompetences centrs” (L-KC-11-0006) pētījuma 1.10 „Volumetrisku trīs dimensiju attēlu veidošanas tehnoloģiju pētījumi” ietvaros, ko līdzfinansē Eiropas Reģionālās attīstības fonds.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 7. jūlijā Rīgas Tehniskās Universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 2-38. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Guntars Balodis
Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija

Pētījumu profesors *Dr. sc. ing.* Olev Mārtens
Tallinas Tehnoloģiju Universitāte, Igaunija

Profesors *Dr. habil. phys.* Ivars Lācis
Latvijas Universitāte, Latvija

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.

Krišs Osmanis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, sešas nodaļas, nobeigumu, literatūras sarakstu, terminu rādītāju, kopā 141 lappuses. Darbā ir 67 zīmējumi un ilustrācijas, 22 tabulas, literatūras sarakstā ir 133 nosaukumi.

Saturs

Terminoloģija	5
Darba vispārējais raksturojums	9
Tēmas aktualitāte	9
Darba mērķis	9
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	10
Aizstāvamās tēzes	10
Pētījumu metodika	10
Pētījumu objekts	11
Darba praktiskais lietojums	11
Aprobācija	11
Disertācijas struktūra	12
1 3D vizualizācijas tehnoloģiju pārskats un novērtējums	14
1.1 Volumetrisko vizualizāciju lietojumi un datu avoti	14
1.2 Volumetriskās 3D tehnoloģijas un to attīstītāju pārskats	14
1.3 Vizualizācijas sistēmas kvalitātes metrika	15
1.4 Kopsavilkums un secinājumi	17
2 Daudzplakņu 3D vizualizācijas sistēmas princips	18
2.1 Arhitektūras pārskats	18
2.2 Telpiskais gaismas modulators un gaismas avoti	18
2.3 Gaismas modulācijas metodes	20
2.4 Nodaļas pārskats	21
3 Sistēmas modelis un ieejas parametri	22
3.1 Neietekmējamie parametri	22
3.2 Ietekmējamie parametri	23
3.3 Lietotāja atrašanās vietu raksturojošie parametri	24
4 Modeļa izejas parametri un matemātiskās sakarības	25
4.1 Telpisko kadru atjaunošanas biežums	25
4.2 Spožums	27
4.3 Krāsu toņu skaits	32
4.4 3D attēla kvalitātes parametri	32
5 Modeļa analīze un parametru parciālā optimizācija	33
5.1 Analīzes procesa apraksts	33
5.2 Ieejas parametru un grupu parciālā analīze	33
5.3 Sistēmas modeļa analīzes pārskats	37
6 Eksperimentālās iekārtas un modeļa izveidošana	38
6.1 Volumetrisko datu pārraide	38
6.2 Volumetriskās vizualizācijas sistēmas izveidošana	42
6.3 Demonstrācijas iekārta	45
6.4 Vizualizācijas sistēmas darbības parametru novērtējuma tests	45
6.5 Nodaļas pārskats	47
Secinājumi	48
Literatūra	49

Terminoloģija

Apzīmējumu saraksts (attēlošanas secībā)

η_{open}	optiskā slēdža caurspīdīgā stāvokļa gaismas caurlaidība
η_{closed}	optiskā slēdža izkliedējošā stāvokļa gaismas caurlaidība
t_{decay}	optiskā slēdža pārslēgšanās laiks no caurspīdīgā uz izkliedējošo stāvokli
t_{rise}	optiskā slēdža pārslēgšanās laiks no izkliedējošā uz caurspīdīgo stāvokli
d_{v}	optiskā slēdža platums
d_{h}	optiskā slēdža augstums
N_{v}	telpiskā gaismas modulatora horizontālo attēla elementu skaits
N_{h}	telpiskā gaismas modulatora vertikālo attēla elementu skaits
R_{slmBin}	telpiskā gaismas modulatora bināro kadru attēlošanas skaits sekundē
t_{slmRst}	telpiskā gaismas modulatora spoguļu iestatīšanas laiks
ϕ_{vsource}	gaismas avota gaismas plūsma
$\eta_{\text{passiveElements}}$	gaismas ceļa optisko elementu gaismas caurlaidība
N_{layers}	dziļuma plakņu skaits (dziļuma izšķirtspēja)
d_{layers}	attālums starp diviem secīgiem dziļuma slāņiem
N_{bpc}	biti uz pamatkrāsu
N_{bpwm}	bitu skaits, kuri tiek modulēti ar bināro impulsa platuma modulācijas metodi
N_{bsim}	bitu skaits, kuri tiek modulēti ar gaismas avota intensitātes metodi
$E_{\text{pwmSlmGlobalRst}}$	telpiskā gaismas modulatora spoguļišu iestatīšanas variants (bitiem, kas tiek modulēti ar impulsa platuma modulācijas metodi)
N_{colors}	pamatkrāsu skaits
R_{dbs}	dziļuma dzēšanās laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku
R_{db}	starpslāņu dzēšanās laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku
φ_{obs}	lietotāja skata leņķis
d_{obs}	lietotāja attālums
R_{fps}	telpisko kadru atjaunošanās skaits sekundē
L_{vscreen}	daudzplakņu ekrāna izstarotais gaismas apjoms (spožums)
N_{colVars}	krāsu toņu skaits
N_{volRes}	telpiskā izšķirtspēja vokseļos
N_{volDens}	vokseļu blīvums
N_{Score3D}	3D kvalitātes vērtējuma rezultāts
t_{v}	telpiskā kadra attēlošanas ilgums ar dzēšanās laikiem
$t_{\text{depthBlanking}}$	dziļuma dzēšanas ilgums
$t_{\text{layerBlanking}}$	kopējais starpslāņu dzēšanas ilgums
t_{active}	telpiskā kadra spīdēšanas ilgums (bez dzēšanās laikiem)
t_{blanking}	starpslāņu dzēšanas ilgums

t_{depth}	vienas dziļuma plaknes attēlošanas ilgums
t_{color}	vienas pamatkrāsas attēlošanas ilgums
$t_{\text{perPwmBits}}$	laika periods, kurā tiek modulēts nepieciešamais bitu skaits ar bināro impulsa platuma modulācijas metodi
$t_{\text{perLsimBits}}$	laika periods, kurā tiek modulēts nepieciešamais bitu skaits ar gaismas avota intensitātes modulācijas metodi
t_{pwmBit}	laika periods, kurā tiek ielādēts un attēlots viens binārais kadrs, modulācijai ar impulsa platuma metodi
t_{lsimBit}	laika periods, kurā tiek ielādēts un attēlots viens binārais kadrs, modulācijai ar gaismas avota intensitātes metodi
t_{slmLoad}	laika periods, lai ielādētu vienu bināro kadru telpiskajā gaismas modulatorā, izmantojot ciparu saskarni
G_{screen}	ekrāna pastiprinājuma koeficients
E_{Vscreen}	uz daudzplakņu ekrānu krītošā gaisma (apgaisojums)
ϕ_{Vscreen}	gaismas plūsma, kas sasniedz daudzplakņu ekrānu
η_{slm}	telpiskā gaismas modulatora efektīvā laiciskā gaismas caurlaidība
η_{vs}	daudzplakņu ekrāna optiskā gaismas caurlaidība
η_{vst}	daudzplakņu ekrāna efektīvā gaismas caurlaidība
t_{per}	gaismas plūsmas aprēķinam dotais laika periods
ϕ_{avg}	vidējā gaismas plūsma dotajā laika periodā
Q_{pwm}	kopējā gaismas enerģija periodā, kurā tiek modulēti biti ar bināro impulsa platuma modulācijas metodi
Q_{lsim}	kopējā gaismas enerģija periodā, kurā tiek modulēti biti ar gaismas avota intensitātes modulācijas metodi
N_{volume}	daudzplakņu ekrāna tilpums
N_{size}	telpiskā kadra binārais izmērs pie noteiktas izšķirtspējas un krāsu dziļuma
N_{bw}	3D telpisko kadru pārraidei nepieciešamais joslas platums pie noteikta pārraides ātruma
N_{bwDP}	<i>DisplayPort 1.2</i> standarta kopējais joslas platums
f_{sym}	<i>DisplayPort 1.2</i> simbolu takts frekvence
N_{lanes}	<i>DisplayPort 1.2</i> datu līnijas
N_{bitsDP}	ciparu signāla platums jeb biti uz vienu datu līniju
N_{bwvideo}	<i>DisplayPort 1.2</i> standarta telpisko kadru pārraidei pieejamais joslas platums
N_{blanking}	dzēšanas simbolu skaits telpiskajā kadrā

Darbā lietoto saīsinājumu saraksts

Saīsinājums	Nosaukums angļu valodā	Nosaukums latviešu valodā
2D	<i>Two dimensions</i>	Divas dimensijas
3D	<i>Three dimensions</i>	Trīs dimensijas
BIOS	<i>Basic Input Output System</i>	Pamata ievadizvades sistēma
BSLS	<i>Broad Spectrum Light Source</i>	Plaša spektra gaismas avots
BTS	<i>Bradley-Terry Score</i>	Bredlija-Terija rezultāts jeb indekss
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	Datorizētā projektēšana
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	Datorizētā ražošana
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i>	Katodstaru lampa
DDR	<i>Dual Data Rate</i>	Dubultais datu ātrums
DDR3	<i>Dual data rate three</i>	Dubultais datu ātrums, trešais tips
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>	Medicīnā plaši izmantots ciparu attēlu un saziņas standarts
DLP	<i>Digital Light Processing</i>	Gaismas ciparu apstrāde
DMA	<i>Direct Memory Access</i>	Atmiņas tiešpiekļuve
DMD	<i>Digital Micromirror Device</i>	Ciparu mikroskopu ierīce
DVI	<i>Digital Visual Interface</i>	Ciparu vizuālās saskarnes standarts
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>	Elektriski pārprogrammējama lasāmatmiņa
FIFO	<i>First In First Out</i>	Pirmais iekšā – pirmais ārā
FMC	<i>FPGA Mezzanine Card</i>	ANSI standarts meitasplatēm lietošanai ar <i>FPGA</i>
FPGA	<i>Field programmable gate array</i>	Programmējamais loģiskais masīvs
FPS	<i>Frames per second</i>	Kadri sekundē
HBP	<i>Horizontal Blanking Period</i>	Horizontālās līnijas dzēšanas laiks
HD	<i>High Definition</i>	Augstas izšķirtspējas
HDMI	<i>High Definition Multimedia Interface</i>	Augstas izšķirtspējas multivides saskarne
IC	<i>Integrated Circuit</i>	Mikroshēma
IEEE	<i>Institute of electronics and electrical engineers</i>	Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts
IP Core	<i>Intellectual property FPGA core</i>	Intelektuālā īpašuma <i>FPGA</i> modulis
ITU-R	<i>International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector</i>	Starptautiskās Telesakaru savienības radiosakaru sektors
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>	Elektronisko sistēmu pārbaudes un testēšanas metode
LC	<i>Liquid Crystal</i>	Šķidrās kristāls
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>	Šķidro kristālu displejs
LCOS	<i>Liquid Crystal On Semiconductor</i>	Šķidrās kristāls uz pusvadītāja

LED	<i>Light emitting Diode</i>	Gaismas diode
LSB	<i>Least Significant Bit</i>	Visnenozīmīgākais bits
LSE	<i>Laser Surface Engraving</i>	Virsmas lāzergravēšana
LSIM	<i>Light source intensity modulation</i>	Gaismas avota intensitātes modulācija
LUT	<i>Look-Up Table</i>	Loģisko kombināciju shēma
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>	Mikrokontrolieris
MEMS	<i>Microelectromechanical System</i>	Mikroelektromehāniskā sistēma
MSA	<i>Main Stream Attributes</i>	Pamata plūsmas atribūti
MSB	<i>Most Significant Bit</i>	Visnozīmīgākais bits
NSLS	<i>Narrow Spectrum Light Source</i>	Šaura spektra gaismas avots
OLED	<i>Organic Light Emitting Diode</i>	Organiskā gaismas diode
PC	<i>Personal Computer</i>	Personālais dators
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>	Spiestā plate
PCIe	<i>Peripheral Component Interconnection express</i>	Ātrdarbīga lokālā kopne <i>PCIe</i>
Pixel	<i>Picture Element</i>	Attēla elements
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Impulsa platuma modulācija
RAM	<i>Random Access Memory</i>	Brīvpiekļuves atmiņa
RGB	<i>Three base colors – red, green, blue</i>	Pamata krāsas – sarkanā, zaļā un zilā
RMS	<i>Root Mean Square</i>	Vidējā kvadrātiskā vērtība
RX	<i>Receiver</i>	Uztvērējs
SDR	<i>Single Data Rate</i>	Vienkāršais datu ātrums
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>	Standarta izšķirtspējas televīzija
SID	<i>Society of Informative Displays</i>	Informācijas displeju sabiedrība
SLM	<i>Spatial Light Modulator</i>	Telpiskais gaismas modulators
SODIMM	<i>Small Outline Dual In-line Memory Module</i>	Neliela izmēra divrindu atmiņas modulis
TI	<i>Texas Instruments</i>	Elektronisko komponentu ražotājs <i>Texas Instruments</i>
TLP	<i>Transaction Layer Packet</i>	Transakcijas slāņa datu pakete
TU	<i>Transfer Unit</i>	Pārraides vienība
TX	<i>Transmitter</i>	Raidītājs
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>	Universālais asinhronais raiduztvērējs
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Universālā seriālā kopne
VBP	<i>Vertical Blanking Period</i>	Vertikālais dzēšanas laiks
VGA	<i>Video Graphics Array</i>	Videostandarts VGA
VHDL	<i>Very high-speed integrated circuits Hardware Description Language</i>	Augsta ātruma mikroskāmu aparatūras projektēšanas valoda
XGA	<i>Extended Graphics Array</i>	Videostandarts XGA

Darba vispārējais raksturojums

Tēmas aktualitāte

Mūsdienu elektronikas iekārtās (piemēram, mobilajos telefonos, portatīvajos datoros, planšetdatoros) lietotāja saskarne tiek īstenota, izmantojot displejus, kuri attēlo informāciju kā divdimensionālus attēlus. Nākamais loģiskais solis ir papildināt attēlus ar trešo dimensiju (3D). Līdz šim ir bijuši vairāki mēģinājumi izveidot pilnvērtīgu 3D telpisko displeju, kas nav sekmējušies ar vērā ņemamiem panākumiem.

Vienkāršākie 3D attēli un vizualizācijas tiek veidotas, izmantojot stereoskopisko 3D tehnoloģiju, kas savukārt ir balstīta uz cilvēka acs binokulāro efektu [1]. Stereoskopisko 3D lietošana mūsdienās ir aktuāla un kļūst arvien populārāka, jo tiek īstenoti labāki tehnoloģiskie risinājumi, kas nodrošina labāku lietotāja pieredzi.

Stereoskopiskā 3D tehnoloģija patērētājiem ir pieejama kopš 1922. gada, kad tika izrādīta filma "The Power Of Love" kinoteātrī *Ambassador Hotel Theater*, Losandželosā. Kopš tā laika stereoskopiskā 3D popularitāte ir bijusi mainīga, taču mūsdienās tā atkal ir kļuvusi aktuāla un vairums populārās mākslas filmas tiek veidotas gan 2D, gan stereoskopiskā 3D variantos.

Dažāda veida 3D vizualizācijas kļūst pieejamas ne tikai patērētājiem, bet arī industriāliem un medicīnas lietojumiem. Stereoskopiskais 3D jau tiek lietots gan medicīnā, gan inženierijā, piemēram, *Zhao Y. et al* [2] apspriež 3D tehnoloģiju attīstības iespējas medicīnā, *Lu L. et al* [3] apskata konkrētus lietojuma variantus savukārt *Shen R. et al* [4] apskata variantus telpisko medicīnas datu attēlošanai uz parastajiem 2D displejiem.

Salīdzinot ar stereoskopiskajiem 3D displejiem, volumetrisko 3D vizualizācijas sistēmu izveidošana ir tehnoloģiski sarežģītāka, jo volumetriskajam 3D ir nepieciešama daudz lielāka datu pārraides josla un speciāls volumetriskais ekrāns, kurā tiek veidota telpiska bilde.

Eksistē vairāki volumetriskā 3D attēla veidošanas principi (tie ir detalizēti apskatīti 1. nodaļā), taču šī disertācija analizē volumetriskā 3D vizualizācijas displeja tehnoloģiju, kas ir balstīta uz vairākām dziļumā secīgi novietotām plaknēm, kuras veido volumetrisko ekrānu. Šī daudzplakņu tehnoloģija ir viena no retajām volumetriskā 3D tehnoloģijām, kas nodrošina iespēju attēlot reāla laika 3D attēlus.

Daudzplakņu volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas tehnoloģija pati par sevi nav jauna, taču šī disertācija analizē šo tehnoloģiju, lietojot zinātniskās metodes – izveidojot un analizējot sistēmas darbības modeli, izvirzot un pārbaudot teoriju par volumetriskā 3D subjektīvo uztveri. Disertācijā ir arī atspoguļota sistēmas īstenošana ar mērķi sasniegt labākus darbības parametrus (kadru atjaunošanās ātrumu, krāsu dziļumu un spožumu), salīdzinot ar iepriekšējās paaudzes volumetriskajiem displejiem. Citiem vārdiem sakot, pētījuma mērķis ir panākt labāko iespējamo veikspēju no šīs tehnoloģijas.

Veikto pētījumu aktualitāti un nozīmīgumu atspoguļo perspektīvie lietojuma varianti. Šādu reāla laika attēlu vizualizācijas volumetrisko 3D sistēmu var lietot medicīnā (datortomogrāfijā, rentģena starošanas procedūrās), drošības nozarē (bagāžas pārbaudē) un citur, kur nepieciešams attēlot precīzu volumetrisko 3D vizualizāciju. *Philips Healthcare* un *RealView Imaging* kompānijas ir veikušas pētījumu [5], kas parāda volumetrisko un hologrāfisko 3D vizualizācijas sistēmu lietošanas noderīgumu minimālā invazīvā kardioloģijā. *MarketsMarkets* [6] (tirgus analīzes kompānija) 2015. gada pavasarī publicēja volumetrisko displeju tirgus izaugsmes perspektīvu, norādot, ka šo displeju tirgus daļa pieaugs līdz 348,2 miljoniem ASV dolāru līdz 2020. gadam.

Darba mērķis

Darba galvenie mērķi ir:

- izstrādāt daudzplakņu volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas matemātisko modeli, lai panāktu sabalansētus sistēmas kvalitātes metrikas parametrus (tādus kā spožums, krāsu dziļums

- un kadru atjaunošanās ātrums), pielāgojot sistēmas dizaina un darbības parametrus;
- nākt klajā ar jaunām metodēm, kas uzlabotu sistēmas kvalitātes metrikas parametrus;
- izpētīt un īstenot volumetrisko 3D attēlu pārraidi, lai panāktu reāla laika volumetrisko kadru attēlošanu vizualizācijas sistēmā;
- izveidot pilnvērtīgu volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas prototipu, kurš balstīts uz daudzplakņu dziļuma slāņu tehnoloģiju un liela ātruma projekcijas sistēmu.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Galvenie rezultāti un zinātniskā novitāte darbā ir:

- daudzplakņu volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas darbības un matemātiskā modeļa izveidošana, kas ļauj veikt dažāda veida sistēmas analīzi;
- izstrādāta jauna gaismas modulācijas metode, *miksētā jeb jauktā modulācijas metode*, lietošanai projekcijas sistēmās ar telpisko gaismas modulatoru. Jaunajā metodē gaisma tiek modulēta kombinēti, izmantojot gan telpisko gaismas modulatoru, gan gaismas avota intensitāti;
- izpētīts, attīstīts un izveidots jauna veida reāla laika volumetrisko 3D attēlu pārraides protokols, par pamatu izmantojot *DisplayPort 1.2* video pārraides standartu;
- īstenota nepieciešamā sistēmas funkcionalitāte uz programmējamo loģisko masīvu (*FPGA*) bāzes, tai skaitā *FPGA* moduļi, piemēram, *DisplayPort 1.2* uztvērējs, projekcijas sistēmas vadība ar volumetriskā ekrāna un gaismas avotu vadības sinhronizāciju;
- izveidots iekārtas prototips – demonstrācijas iekārta, kas parāda un ļauj novērtēt daudzplakņu volumetriskās 3D attēlu veidošanas tehnoloģiju un tās darbības parametrus. Iekārta ir izveidota kompānijai *LightSpace Technologies* ar modeļa nosaukumu *X1405*.

Aizstāvāmās tēzes

1. Izstrādātais sistēmas matemātiskais modelis ļauj analizēt un simulēt daudzplakņu telpisko vizualizācijas sistēmu un pierāda, ka miksētās gaismas modulācijas metodes lietošana nodrošina labāku relatīvo spožumu pie konkrēta krāsu dziļuma un minimālā kadru atjaunošanās ātruma.
2. Reāla laika (vismaz 25 kadri sekundē) volumetrisko 3D video pārraidi var panākt, lietojot izstrādāto volumetrisko attēlu pārraides protokolu un izmantojot *DisplayPort 1.2* kā fizisko datu nesēju.
3. Pilnu 3D vizualizācijas sistēmu var izveidot vienā *Xilinx Virtex-6* saimes *FPGA* mikroshēmā, nodrošinot XGA (1024 x 768 punkti) izšķirtspēju, 20 dziļuma slāņus, 24 bitu krāsu dziļumu un attēlošanas ātrumu vismaz 25 volumetriskie kadri sekundē.
4. Pietiekošu dziļuma uztveri var nodrošināt ar 15 līdz 20 dziļuma slāņiem (pie 1024 x 768 punktu izšķirtspējas) vispārīgu 3D volumetrisko attēlu atveidei.

Pētījumu metodika

Pētījumu veikšanā tika izmantota šāda metodika:

- literatūras analīzē un sistēmas matemātiskā modeļa izveidē izmantotas analītiskās pētījumu metodes;
- matemātiskā modeļa un tehnoloģijas analīzē tiek lietotas skaitliskās metodes un simulācijas, ar kuru palīdzību tiek novērtēta sistēmas veiktspēja un precizēti parametri demonstrācijas iekārtas izveidošanai;
- pētījumos plaši tiek izmantotas sistēmu simulācijas metodes, ar kuru palīdzību tiek pētīti datu pārraides kanāli, gaismas avotu efektivitāte, gaismas modulācijas metožu varianti un sistēmas darbība;
- ar eksperimentālās metodes palīdzību tika veikti praktiski izveidošanas pētījumi ar *Xilinx ML605* izstrādes komplektu, uz kura atrodas *Virtex-6 XCV6LX240T-1FFG1156 FPGA*, kā arī praktiski

- pārbaudīta sistēmas funkcionalitāte izstrādātajās spiestajās platēs;
- sistēmas darbības novērtēšanai un 3D uztveres teorijas pārbaudei tika lietota industrijā standartizēta metodoloģija subjektīvo mērījumu veikšanai.

Pētījumu objekts

Galvenais pētījumu objekts ir visa kopējā daudzplakņu volumetriskā 3D vizualizācijas tehnoloģija un tās galvenās daļas:

- sistēmas matemātiskais modelis;
- volumetrisko 3D attēlu datu pārraide;
- volumetrisko 3D attēlu apstrāde un pārkārtošana vizualizācijas sistēmā;
- volumetriskā attēla pārveidošana no ciparu reprezentācijas uz redzamu telpisku attēlu volumetriskajā ekrānā.

Darba praktiskais lietojums

Darba praktiskais lietojums un nozīmīgums ir saistīts ar izveidoto volumetriskās vizualizācijas sistēmas modeli un tā īstenošanu demonstrācijas iekārtā.

Izstrādātais modelis ļauj novērtēt vizualizācijas sistēmas darbību un veiktspēju, analizējot dažādus ieejas parametru variantus (piemēram, novērtēt dažādu telpisko gaismas modulatoru veiktspējas ietekmi).

Pamatā visi pētījumi ir veikti industrijā, uzņēmuma SIA *EuroLCDs* izstrādes un attīstības laboratorijā, un viens no pētījuma mērķiem bija izstrādāt un izveidot ražojamu volumetriskās 3D vizualizācijas tehnoloģijas demonstrācijas iekārtu, kurā būtu izmantotas pētījumu gaitā radītās jaunās metodes un principi. Tas ir sekmīgi paveikts, un ir izveidota un pārbaudīta ražojama iekārta.

Papildus paveiktajam zinātniskajam darbam demonstrācijas iekārtas radīšanas procesā tika izprojektētas vairākas spiestās plātes, izplānota mehāniskā struktūra, īstenota šķidro kristālu optisko slēdžu elektriskā vadība un īstenota gaismas avotu elektriskā vadība.

Pētījumu gaitā radītās idejas un metodes ir iekļautas patenta pieteikumā [7], kas tika iesniegts 2015. gada rudenī izskatīšanai Eiropas patentu organizācijā *European Patent Office* (EPO).

Aprobācija

Pētījumu zinātniskie rezultāti ir publicēti zinātniskajās publikācijās

1. Osmanis, K. Optimum Driving Conditions Study for Digital Micromirror Devices. No: *13th Biennial Baltic Electronics Conference rakstu krājums*. Tallina, 2012, 61.–64. lpp.
Pieejams: doi:10.1109/BEC.2012.6376815
2. Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. Development of Digital Uncompressed 3D Image Transfer using DisplayPort video standard for volumetric 3D imaging applications. No: *International Conference on 3D Imaging rakstu krājums*. Ljēža, 2012, 1.–5. lpp.
Pieejams: doi:10.1109/IC3D.2012.6615132
3. Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. 3D Volumetric Display Design Challenges. No: *Norchip 2013 rakstu krājums*. Viļņa, 2013, 1.–4. lpp.
Pieejams: doi:10.1109/NORCHIP.2013.6702001
4. Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. Light Budget Study for a Multiplanar volumetric 3D display. No: *International Conference on 3D Imaging rakstu krājums*. Ljēža, 2013. 1.–5. lpp.
Pieejams: doi:10.1109/IC3D.2013.6732099
5. Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. 3D Volumetric Display Concept. No: *electronic displays*

2014 rakstu krājums. Nirnberga, 2014, 1.–4. lpp.

- Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I., Misans, P. PCIe and DisplayPort Based High Speed Volumetric 3D Video Output Card Implementation in FPGA. No: *14th Biennial Baltic Electronics Conference rakstu krājums*. Tallina, 2014, 1.–4. lpp.
Pieejams: doi:10.1109/BEC.2014.7320556
- Osmanis, K., Osmanis, I. Real-Time Volumetric 3D Imaging Technology. *Biophotonics*, 2016. gads, Nr. 23, aprīļa izdevums, 30.–33. lpp. ISSN-1081-8693.
Pieejams: <http://www.photonics.com>

Pētījumu zinātniskie un praktiskie rezultāti ir iekļauti patentā

- Osmanis, I., Osmanis, K., Valters, G. Multi-planar volumetric real time three-dimensional display and method of operation. Patent application No. PCT/IB2015/057484.

Zinātniskās publikācijas un rezultāti tika prezentēti un aprobēti zinātniskās un industrijas konferencēs, izstādēs un semināros

- „13th Biennial Baltic Electronics Conference”, 2012, 3.–5. oktobrī, Tallinā, Igaunijā.
- „International Conference on 3D Imaging 2012”, 2012, 3.–5. decembrī, Ljēžā, Beļģijā.
- „Technet Nano 2013”, 2013, 13. jūnijā, Jūrmalā, Latvijā.
- „Norchip-2013”, 2013, 11.–12. novembrī, Viļņā, Lietuvā.
- „AIEEE 2013 - Advances In Electronics and Electrical Engineering”, 2013, 26. novembrī, Rīgā, Latvijā.
- „International Conference on 3D Imaging 2013”, 2013, 3.–5. decembrī, Ljēžā, Beļģijā.
- „Electronic displays 2014”, 2014, 26.–27. februārī, Nirnbergā, Vācijā.
- „14th Biennial Baltic Electronics Conference”, 2014, oktobrī, Tallinā, Igaunijā.
- „Display Week 2015 – International Symposium, Seminar and Exhibition”, Society of Informative Displays, San Jose Convention Center. 2015, 2.–5. jūnijā, San Hosē, ASV.
- Prototipa iekārtas demonstrācija „*Philips Healthcare*.” 2015, 3. jūlijā, Eindhovenā, Nīderlandē.
- Prototipa iekārtas demonstrācija „*GE Vingmed*.” 2015, 12. augustā, Oslo, Norvēģijā.
- Prototipa iekārtas demonstrācija Valsts pētījumu programmas *SOPHIS* projekta seminārā *Elektronikas un datorzinātņu institūtā*. 2015. 7. oktobrī, Rīgā, Latvijā.
- „RTU 56th International Scientific Conference”, 2015, 14.–16. oktobrī, Rīgā, Latvijā.

Disertācijas struktūra

Disertācijas galvenās saturas daļas ir situācijas analīze jeb literatūras apskats, daudzplakņu volumetriskās tehnoloģijas darbības principa izklāsts, sistēmas modeļa izstrāde un analīze, sistēmas izveidošana (reāla laika volumetrisko datu pārraide un *FPGA* izveidotā datu kontroliera apraksts) un demonstrācijas iekārtas novērtēšanas tests ar reālu lietotāju piedalīšanos.

1. nodaļa ir veltīta literatūras analīzei, iekļaujot nozares apskatu, problēmas definēšanu un pamatojumu, volumetrisko 3D vizualizāciju tehnoloģiju pārskatu un salīdzinājumu. Nodaļā tiek akcentēti aktuālie nozares dalībnieki un to jaunākie panākumi, kā arī pieminēta daudzplakņu volumetriskās tehnoloģijas vēsture un apspriestas vizualizācijas sistēmas kvalitātes metrikas un to nozīmīgums.

2. nodaļa izklāsta daudzplakņu volumetriskās 3D tehnoloģijas darbības principu un apraksta gaismas modulācijas metodes, un iepazīstina ar jauno izstrādāto miksēto jeb jaukto gaismas modulācijas metodi.

Tālākās nodaļas ir veltītas sistēmas matemātiskajam modelim – definēšanai, izstrādei un risinājumam. Vispirms 3. nodaļā tiek uzskaitīti un aprakstīti modeli raksturojošie ieejas parametri, kā arī tie tiek iedalīti trīs grupās – neietekmējamie parametri, maināmie parametri un lietotāja atrašanās vietu raksturojošie parametri.

Atsauce	Publikācijas nosaukums	Pētījumu daļa
[P1] / [8]	Osmanis, K. Optimum Driving Conditions Study for Digital Micro-mirror Devices. No: <i>13th Biennial Baltic Electronics Conference rakstu krājums</i> . Tallinā, 2012, 61.–64. lpp. (IEEE)	sistēmas modelis
[P2] / [9]	Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. Development of Digital Uncompressed 3D Image Transfer using DisplayPort video standard for volumetric 3D imaging applications. No: <i>International Conference on 3D Imaging rakstu krājums</i> . Ljēža, 2012, 1.–5. lpp. (IEEE)	datu pār-raide
[P3] / [10]	Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. 3D Volumetric Display Design Challenges. No: <i>Norchip 2013 rakstu krājums</i> . Viļņa, 2013, 1.–4. lpp. (IEEE)	sistēmas izveidošana
[P4] / [11]	Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. Light Budget Study for a Multiplanar volumetric 3D display. No: <i>International Conference on 3D Imaging rakstu krājums</i> . Ljēža, 2013. 1.–5. lpp. (IEEE)	sistēmas modelis
[P5] / [12]	Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I. 3D Volumetric Display Concept. No: <i>electronic displays 2014 rakstu krājums</i> . Nirnberga, 2014, 1.–4. lpp.	sistēmas izveidošana
[P6] / [13]	Osmanis, K., Valters, G., Osmanis, I., Misans, P. PCIe and DisplayPort Based High Speed Volumetric 3D Video Output Card Implementation in FPGA. No: <i>14th Biennial Baltic Electronics Conference rakstu krājums</i> . Tallinā, 2014, 1.–4. lpp. (IEEE)	datu pār-raide
[P7] / [14]	Osmanis, K., Osmanis, I. Real-Time Volumetric 3D Imaging Technology. <i>Biophotonics</i> , 2016.gads, Nr.23, aprīļa izdevums, 30.–33. lpp. ISSN-1081-8693.	sistēmas izveidošana

Modeļa izejas parametri (piemēram, volumetrisko kadru atjaunošanās ātrums, spožums un krāsu dziļums) ir aprakstīti 4. nodaļā. Izejas parametri tiek definēti un sasaistīti ar attiecīgajiem ieejas parametriem un matemātiskajām sakarībām, veidojot bāzi matemātiskajam modelim.

Modeļa analīze un parciālo (lokālo) optimumu meklēšana (viena izejas parametra optimizācija, pārējos izejas parametrus definējot noteiktās robežās, pie dažādām ieejas parametru kombinācijām) ir parādīta 5. nodaļā. Tiek pētīta atsevišķu ieejas parametru un to grupu ietekme uz izejas parametriem, kā arī tiek pamatota jaunās modulācijas metodes lietošanas lietderība.

Disertācijas noslēgumā, 6. nodaļā, ir izklāstīta volumetriskās vizualizācijas sistēmas demonstrācijas iekārtas izveidošana. Vispirms tiek apskatīti pētījumi saistībā ar reāla laika volumetrisko datu pārraidi, izmantojot *DisplayPort 1.2* video pārraides standartu un *PCIe* kopni. Tālāk seko volumetrisko datu manipulācijas un sagatavošanas apraksts liela ātruma projekcijas sistēmai un projekcijas sistēmas vadības izstrāde. Nodaļas nobeigumā tiek aprakstīti veiktie demonstrācijas iekārtas novērtējuma testi, kuros tika pārbaudīta vairāku modeļa ieejas parametru ietekme uz volumetriskā 3D attēla uztveri reāliem lietotājiem.

Disertācija tiek lietots *IEEE 1541-2002* bināro prefiksu pieraksta standarts. Ar "Kb" vai "Kbit" tiek apzīmēti 1000 biti (10^3), savukārt ar "Kib" vai "Kibit" tiek apzīmēti 1024 biti (2^{10}).

1 3D vizualizācijas tehnoloģiju pārskats un novērtējums

Šajā nodaļā ir aplūkotas pasaulē eksistējošās 3D vizualizācijas tehnoloģijas. Nodaļas pirmajā daļā ir aprakstīti konkrēti tehnoloģiskie risinājumi un to attīstītāji, savukārt otrajā daļā tiek apskatīti šādu sistēmu novērtēšanas un salīdzināšanas principi un kvalitātes metrika. Šis pārskats veido bāzi un pamato nepieciešamību veiktajiem pētījumiem.

1.1 Volumetrisko vizualizāciju lietojumi un datu avoti

Volumetriskās vizualizācijas sistēmas rada telpisku attēlu ar reālām trīsdimensionālām koordinātēm noteiktā un ierobežotā trīsdimensionālā telpā, piemēram, tilpumā ar gaisu, cietu vielu, specifisku gāzi vai plazmu.

Radītā attēla uztvere ir iespējama vairākos veidos, atkarībā no vizualizācijas tipa un ierobežotās telpas veida, piemēram, volumetriskais attēls var būt apskatāms no visām pusēm – no priekšpuses, no augšas, vai no kāda cita virziena. Ideālā gadījumā, volumetriskais attēls tiek radīts ar pilnu dziļuma informatīvo saturu, kas ir aplūkojams no jebkura virziena.

Šādas volumetriskās 3D vizualizācijas sistēmas var tikt lietotas dažādiem mērķiem. *Langhans, K., et al* [15] norāda, ka lietojumi ir zinātnisko datu vizualizācija, izklaides nozare, datorprojektēšana, medicīnisko datu attēlošana un gaisa satiksmes kontroles informācijas attēlošana. *Gong, X., et al* [16] detalizēti apskata variantus lietojumam medicīnas nozarē. Uzņēmumi *RealView* un *Philips* [5] ir veikuši eksperimentus ar pozitīviem rezultātiem, lietojot reāla laika hologrāfiskā veida volumetrisko 3D vizualizācijas tehnoloģiju strukturālo sirds slimību ārstēšanas procedūrās.

1.2 Volumetriskās 3D tehnoloģijas un to attīstītāju pārskats

Līdz šim vienu no vispilnīgākajiem un aktuālākajiem nozares apskatiem ir veicis *Geng, J.* [1]. Viņš iedala 3D displeju tehnoloģijas atkarībā no veida, kā cilvēka acs uztver telpisko efektu – stereoskopiskās un autostereoskopiskās (daudzskatu 3D, volumetriskais 3D, ciparu hologrammas). Papildus, vērtīgus apskatus ir veikuši arī *Favalora, G.E.* [17], *Holliman, N.S. et al* [18] un *Hong, J.* [19].

Geng, J. savā apskatā piedāvā sistemātisku modernāko 3D displeju tehnoloģiju apskatu, pieminot arī to attīstītājus. Viņš piemin arī Latvijas uzņēmumu *SIA EuroLCDs* kā vienu no volumetrisko 3D tehnoloģiju attīstītāju un caur to arī šajā disertācijā atspoguļotos pētījumus.

Vairākas nozīmīgas un veiksmīgas volumetrisko attēlu radīšanas tehnoloģijas ir pieminētas un apskatītas tālākajā tekstā.

1.2.1 Statisks tilpums, pasīvs ekrāns

Volumetriskās vizualizācijas sistēmas, kas balstītas uz statisku tilpumu (tilpumā neatrodas kustīgas sastāvdaļas) un pasīvu ekrānu (ekrāns pats par sevi nerada attēlu), ir apskatītas šajā apakšnodaļā:

- **cietvielu augšupkonvertēšana** – volumetriskais attēls tiek radīts vielā, kuru var ierosināt nepieciešamajos telpas punktos ar diviem lāzera stariem;
- **augšupkonvertēšana telpā ar gāzi** – līdzīgi kā iepriekš, telpa ar gāzi var tikt lietota, lai radītu volumetrisko attēlu, ierosinot nepieciešamos telpas punktus;
- **lāzera izvēršana telpā ar gaisu** – telpā ar gaisu tiek izvērsti lāzera stari, radot plazmu, kas izgaismo nepieciešamos telpiskos punktus;
- **reaktīva cietvielu telpa** – volumetriskais attēls tiek radīts, apstarojot nepieciešamos telpas punktus ar elektromagnētiskajiem viļņiem, radot gaismas emisiju.

1.2.2 Statiskais tilpums, aktīvs ekrāns

Šajā apakšnodaļā ir minētas volumetriskās vizualizācijas tehnoloģijas, kuras balstītas uz statisku tilpumu un aktīvu ekrānu (ekrāns pats spēj radīt gaismu):

- **vokseļu masīvs no optisko šķiedru kūļiem** – telpā, caurspīdīgā kubā, noteiktos punktos tiek novietoti optiskās šķiedras kūļi, kas miera stāvoklī ir caurspīdīgi, taču var tikt izgaismoti;
- **vokseļu masīvs no gaismas diodēm** – telpā (parasti kuba formā) tiek izvietotas gaismas diodes, kas katra individuāli tiek adresēta un var tikt ieslēgta, veidojot volumetrisku attēlu;
- **vairākslāņu LCD sakārtojums** – šī tehnoloģija balstās uz volumetrisko ekrānu, kas ir veidots no secīgi sakārtotiem slāņiem (viens slānis ir elektroniski pārslēdzams optiskais slēdzis, piemēram, no šķidrā kristāla). Projektors secīgi attēlo daļas no volumetriskā attēla šajā ekrānā.

1.2.3 Dinamiskais tilpums, pasīvs ekrāns

Volumetriskās vizualizācijas sistēmas, kas balstītas uz dinamisku tilpumu (tilpumā atrodas kustīgas detaļas) un pasīvu ekrānu, ir apskatītas tālāk:

- **kustīgs ekrāns un CRT televizors** – 3D vizualizācijas iekārta tiek veidota no CRT televizora un rotējoša plakana ekrāna. 2D attēls no televizora tiek aizvadīts uz ekrānu, izmantojot spoguļu un prizmu optisko sistēmu;
- **maināma fokusa attāluma spoguļa sistēma** – tehnoloģija balstās uz ātru 2D displeju un spoguļi ar maināmu fokusa attālumu, kurš tiek vibrēts, izmantojot zemo frekvenču skaļruni, sinhroni ar attēloto 2D attēlu;
- **lāzera izvēršana uz rotējošas virsmas** – volumetrisko attēlu rada apspīdinot rotējošu hēlisku (vītnes veida) virsmu ar izvērstu redzamās gaismas spektra lāzera staru;
- **DLP projekcija uz rotējošas virsmas** – uz rotējoša plakana gaismu izkliedējoša ekrāna tiek projicēta bilde sinhroni ar griešanās ātrumu.

1.2.4 Dinamiskais tilpums, aktīvs ekrāns

Tehnoloģija ar dinamisku tilpumu un aktīvu ekrānu ir:

- **rotējošs gaismas diožu masīvs** – uz plakanas plāksnes atrodas 2D gaismas diožu masīvs vai elektroluminiscējoši elementi, un šī plāksne tiek rotēta ap vertikālo asi, kas sakrīt ar garāko malu. Volumetriskais attēls rodas, attēlojot leņķiskus attēlus sinhroni ar plāksnītes atrašanās vietu.

1.2.5 Nozīmīgākie nozares pārstāvji

Iepriekšējā nodaļā tika apskatītas dažādas līdz šim izstrādātās volumetriskā 3D tehnoloģijas. Dažas no šīm tehnoloģijām joprojām ir perspektīvas un tiek attīstītas, taču nozares apskats parāda, ka iespēja iegādāties un sākt lietot šādas iekārtas ir ļoti neliela.

Nozīmīgākie šī brīža nozares pārstāvji ir apkopoti 1.1. tabulā. No tabulas redzams, ka tikai viens uzņēmums, Ungārijas *Holografika*, publiski piedāvā iegādāties volumetrisko displeju. Citu attīstītāju iekārtas atrodas izstrādes stadijā.

Viens no iemesliem, kādēļ volumetriskās vizualizācijas sistēmas vēl nav plaši pieejamas, ir zinātniski un tehniski sarežģītā sistēmu īstenošana, lai sistēmām būtu salīdzināmi kvalitātes parametri (izšķirtspēja, spožums, attēla kvalitāte). Kaut arī volumetriskās vizualizācijas sistēmas piedāvā dabiski uztveramu telpisku attēlu, pārējiem parametriem būtu jātuvojas esošo 2D displeju līmenim.

1.3 Vizualizācijas sistēmas kvalitātes metrika

Vizualizācijas sistēmas kvalitātes novērtēšanai un salīdzināšanai jālieto nozares standarta kvalitātes metrika. Tā tiek lietota, lai raksturotu dažādus lietotājam uztveramus vizuālos parametrus un efektus dažādiem lietojumiem (piemēram, izšķirtspēja, kontrasts).

Displeja sistēmu veiktspējas, drošības un vērtēšanas standarti ir atrodami *American Association of Physicists in Medicine* [31] veiktajā pārskatā *Assessment of Display Performance for Medical Imaging Systems* un tie ir: *SMPTE RP 133-1991*, *NEMA-DICOM Standard (PS 3)*, *DIN V 6868-57*, *ISO 9241* un *ISO 13406*.

Volumetrisko 3D tehnoloģiju aktīvie attīstītāji

Attīstītājs	Jaunākās aktivitātes
<i>Toshiba</i>	Tiek attīstīta <i>Hyper Viewer</i> [20] 3D tehnoloģija, kurai nav nepieciešamas speciālas brilles. Papildus tam <i>Toshiba</i> izstrādā programmatūru volumetrisko medicīnas datu attēlošanai <i>Voxar 3D</i> [21]
<i>3DIcon</i>	Kompānija izstrādā <i>Cspace 360</i> grādu 3D displeju [22]. <i>Cspace</i> atbalstīs augstas izšķirtspējas, krāsainus volumetriskos attēlus
<i>Realview Imaging</i>	Šis Izraēlas uzņēmums [23] izstrādā hologrāfiskā principa volumetrisko displeju. Uzņēmuma mājas lapā var aplūkot video ierakstus, kuros tiek demonstrēts displejs darbībā
<i>Holografika</i>	Vienīgais uzņēmums, kurš piedāvā iegādāties hologrāfiskā veida volumetrisko displeju [24] – sērijas <i>HoloVizio 80WLT</i> , <i>HoloVizio 722RC</i>
<i>Burton Inc</i>	Japānā bāzēts uzņēmums [25], kurš attīsta 3D vizualizācijas tehnoloģiju balstītu uz plazmas emisijas fenomenu
<i>Voxon</i>	Uz galda novietojamu volumetrisko displeja sistēmu <i>Voxiebox</i> , kas balstīta uz augšup-lejup kustīgu ekrānu, attīsta Kalifornijas jaunuzņēmums [26]
<i>Holoxica</i>	Lielbritānijā bāzētais uzņēmums [27] šobrīd izstrādā trešo paaudzi dinamiskam hologrāfiskā veida volumetriskajam displejam, kas ļaus adresēt individuāli katru telpas vokseli
<i>Zebra Imaging</i>	Pamatā uzņēmums nodarbojās ar hologrāfiskām izdrukām, taču paralēli arī strādā pie 3D hologrāfiskā kustību displeja <i>ZScape</i> [28]
<i>LEIA 3D</i>	Vēl viens Kalifornijas jaunuzņēmums, attīsta 5,5" izmēra ekrāna hologrāfiskā tipa 3D displeja sistēmu [29], [30]

Šie standarti un rekomendācijas aptver dažādus displeja sistēmu novērtēšanas aspektus un parametru atbilstības pārbaudes. Pamata kvalitātes metrikas parametri, kas tiek salīdzināti, ir spožums, izšķirtspēja, pelēko un krāsu toņu skaits un kvalitāte. Šie parametri tiek apskatīti detalizētāk tālākajās apakšnodalās.

1.3.1 Izšķirtspēja

Displeja sistēmas izšķirtspēja apraksta uztveramo attēla elementu (pikseļu) vai telpisko attēla elementu (vokseļu) skaitu. To mēdz izteikt dažādās formās, piemēram, horizontālie un vertikālie pikseļi (1280 x 1024), kopējais pikseļu skaits (2 MP – divi miljoni pikseļu jeb divi megapikseļi), vai kā līniju skaitu (2 k jeb 2000 līniju displejs) [31].

Plaša patēriņa displeju sistēmās parasti tiek lietotas standarta izšķirtspējas (piemēram, *Full HD*, *HD Ready*, 4 k). Medicīnas iekārtu displejos ir līdzīgas izšķirtspējas, piemēram, *Barco* diagnostikas displejam *Coronis Uniti (MDMC-12133)* ir 3840 x 2160 punktu izšķirtspēja.

Volumetriskā 3D sistēmas izšķirtspēja ir atvasināta no 2D sistēmu izšķirtspējas, pievienojot klāt trešo virzienu – dziļuma asi. Telpiskos attēlu elementus sauc par vokseļiem.

1.3.2 Attēlu atjaunošanas biežums

Attēlu atjaunošanas biežums kā atsevišķs parametrs ir minēts [31], taču iekārtu ražotāji, piemēram, *Barco* un *NEC*, neuzrāda kadru atjaunošanas ātrumu pie sistēmas parametriem, taču uzrāda atbalstītos attēlu pārsūtīšanas ātrumus. Vizualizācijas sistēmām būtu jānodrošina attēls bez mirgošanas, kas ir aptuveni 55 Hz atjaunošanas biežums sekundē.

1.3.3 Spožums

Displeju sistēmu viens no pamata vērtēšanas parametriem ir tā spožums. *Barco* informatīvais ziņojums [32] vēsta, ka patērētāju līmeņa sistēmās tipiskais spožums ir ap 250 cd/m² līdz 300 cd/m², savukārt medicīnas iekārtu displejos spožums sasniedz 1000 cd/m². Piemēram, *Barco* diagnostikas displejam *Coronis Uniti (MDMC-12133)* maksimālais kalibrētais spožums ir 1000 cd/m². *American Association of Physicists in Medicine* [31] norāda, ka minimālā spožuma vērtība patērētāju līmeņa iekārtās ir ap 100 cd/m², bet augsta spožuma iekārtās – ap 600 cd/m². Abi avoti apstiprina, ka spožums ir svarīgs parametrs, it sevišķi, ja sistēmu ir paredzēts lietot medicīnas lietojumiem.

1.3.4 Krāsu binārais dziļums

Krāsu binārais dziļums apzīmē maksimālo skaitu ar attēlojamajiem pelēkās krāsas toņiem. Patērētāju iekārtās parasti tiek lietots 8 b krāsu dziļums, taču profesionālās un medicīnas iekārtās tas sasniedz 12 b (piemēram, *Barco Nio 5MP LED (MDNG-5221)* displejam). Krāsu dziļums ir īpaši svarīgs medicīniskās diagnostikas lietojumiem, vienkāršākiem lietojumiem tas var būt zemāks.

Haidekker [33, 387. lpp] atzīmē, ka biomedicīnisko attēlu krāsu dziļumi var būt robežās no 8 bitiem (ultraskaņa, magnētiskā rezonanse, ciparu foto attēli) līdz 14 bitiem (datortomogrāfijā).

1.3.5 3D kvalitāte

Literatūras analīze parāda, ka šobrīd neeksistē standarta metrikas 3D kvalitātes salīdzināšanai un novērtēšanai. Šai lietai ir vērts pievērst uzmanību, jo dažāda veida volumetriskās tehnoloģijas rada telpisko attēlu dažādos veidos, taču šo attēlu 3D kvalitātei jābūt kaut kādā mērā salīdzināmai. *Philips Research* [34] ir mēģinājis veikt 3D kvalitātes novērtējumu, veicot vizuālās kvalitātes pārbaudes ar lentikulārajiem autostereoskopiskajiem 3D displejiem.

Par 3D kvalitātes novērtēšanas parametriem volumetriskām vizualizācijas sistēmām varētu kalpot vokseļu blīvums (vokseļu skaits tilpumā), skatīšanās leņķis, paralēlu lietotāju skaits. Turklāt grūtāk novērtējams parametrs ir radītā 3D attēla kvalitāte, kuru nosaka volumetriskais ekrāns un tehnoloģija.

1.4 Kopsavilkums un secinājumi

Esošajām volumetriskajām vizualizācijas sistēmām pārsvarā nav pieejami kvalitātes metrikas parametri, jo tās atrodas izstrādes un prototipa stadijās. *Holografika* [24] ziņo, ka displejam ir parametri: 78 miljoni vokseļu, 8 b toņu dziļums uz krāsu un vokseli, 300 cd/m² spožums.

Pilnvērtīgas daudzplakņu volumetriskās vizualizācijas sistēmas īstenošanai ir nepieciešams saņiegt līdzīgus kvalitātes metrikas parametrus kā 2D sistēmām. Tas arī ir ticis uzsvērts apspriedēs ar *Philips Healthcare* [35] un *GE Medving* [36] medicīnas sistēmu inženieriem. *Lightspace Technologies* iepriekšējās paaudzes sistēmas *DepthCube z1024* lietošanas atsauksmes uzrāda to pašu, ka lietotājiem nepieciešams augsts spožums un volumetriskais attēls, kas nemirgo.

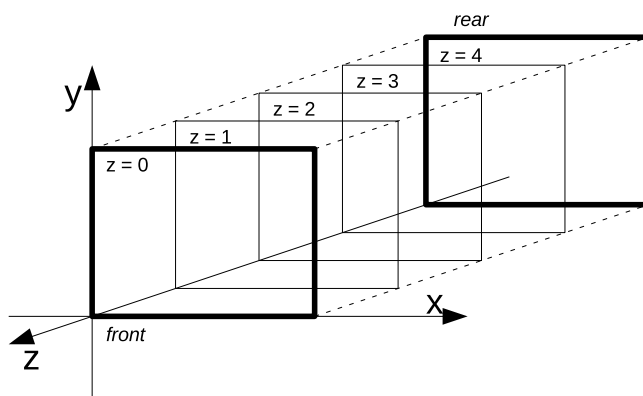
Problēmas risināšanai nepieciešamie soļi:

- jānedefinē sistēmas arhitektūra (galvenās sastāvdaļas) un darbības princips. Jāpiedāvā jaunas idejas gaismas modulācijas metodēm, jo pirmie rezultāti parāda, ka klasisko metožu izmantošana nenodrošina pietiekošu spožumu pie nemirgojoša attēlu atjaunināšanās biežuma kombinācijas;
- jāievieš sistēmas ieejas un izejas (mērķa) parametri;
- jāizveido sistēmas darbību aprakstošas matemātiskās izteiksmes un matemātiskais modelis izejas parametriem;
- jāveic sistēmas modeļa analīze, ietverot arī jaunās metodes, lai atrastu ieejas parametru variantus, kas maksimizē spožumu pie nepieciešamā attēlu atjaunināšanās biežuma;
- jāizveido eksperimentāls iekārtas prototips, lai varētu pārbaudīt sistēmas darbību un veikt sistēmas vērtēšanas salīdzinošo testu, ko īsteno reāli lietotāji.

2 Daudzplakņu 3D vizualizācijas sistēmas princips

Daudzplakņu 3D vizualizācijas metode rada volumetrisko attēlu (ar reālām telpiskām koordinātēm), izmantojot elektroniski adresējamu un pārslēdzamu optisko slēdžu sakārtojumu, kurā optiskie slēdži izvietoti secīgi, viens aiz otra, virzienā pret lietotāju. Tas ir detalizēti parādīts 2.1. attēlā, kur redzams, ka pieci optiskie slēdži ir novietoti viens aiz otra, secīgi, z ass virzienā, diskrētās attāluma pozīcijās ($z = 0, z = 1, z = 2$). Šīs z koordinātes ir ar reālu fizikālo dimensiju un raksturo volumetriskā ekrāna fizisko uzbūvi, piemēram, ($z1 - z0 = 10$ mm).

Volumetriskais attēls tiek radīts, projicējot divdimensionālus attēlus (3D attēla šķērs griezumus) daudzplakņu ekrānā, līdzīgi kā darbojas aizmugurējās projekcijas displeji, taču šajā gadījumā ekrāns sastāv no vairākiem dziļuma slāņiem, nevis vienas plaknes.



2.1. att. Daudzplakņu displeja ekrāns ar pieciem secīgi novietotiem dziļuma slāņiem.

Projekcijas sistēma un daudzplakņu ekrāns tiek savstarpēji sinhronizēti, lai jebkurā laika momentā viens optiskais slēdžis ir gaismu izkliedējošā stāvoklī un uz šī slēdža ir redzams tajā brīdī projicētais trīsdimensionālā attēla šķērs griezumus, bet visi pārējie optiskie slēdži ir caurspīdīgā stāvoklī. Nākamajā laika momentā nākamais optiskais slēdžis ir pārslēgts gaismu izkliedējošā stāvoklī, bet iepriekšējais – caurspīdīgā stāvoklī, un tiek projicēts nākamais volumetriskā attēla šķērs griezumus.

Autoraprāt, piedāvātais sistēmas modelis ļaus atrast prasītajiem kvalitātes metrikas parametriem atbilstošos ieejas parametrus, taču, lai sāktu modeļa izveidi, vispirms nepieciešams apskatīt projekcijas sistēmas darbību un nepieciešamās gaismas modulācijas metodes.

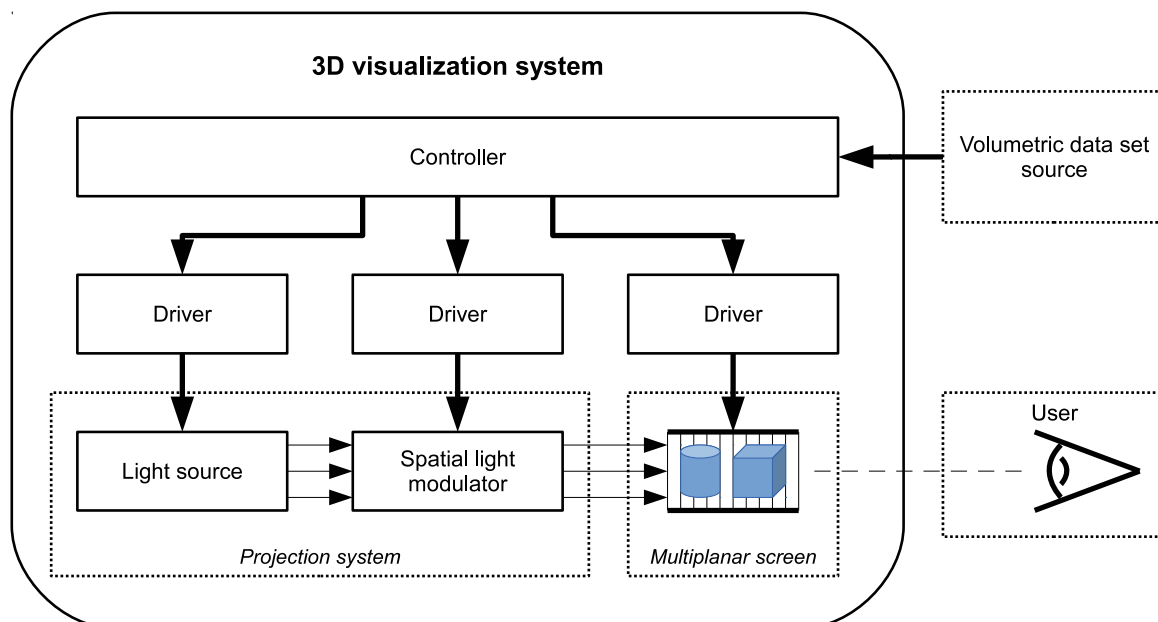
2.1 Arhitektūras pārskats

3D vizualizācijas sistēma sastāv no diviem galvenajiem elementiem – daudzplakņu volumetriskā ekrāna un projekcijas sistēmas. Papildus nepieciešams arī volumetrisko datu avots, ko vizualizēt. Funkcionālā arhitektūras shēma ir parādīta 2.2. attēlā. Sistēmas galvenais vadītājs un sinhronizētājs ir elements *Controller* un šādu elementu var izveidot vai nu ar mikroprocesoru sistēmu, vai nu programmējamos loģiskos masīvos (*FPGA*), vai speciāli izstrādātās integrālajās mikroshēmās.

Minētie arhitektūras elementi ir reālas fizikālās iekārtas, kurām ir savi fizikālie, uzstādāmie un darbības parametri, kas vada un apraksta iekārtas lietošanu. Piemēram, telpiskā gaismas modulatora izšķirtspēja vai daudzplakņu ekrāna dziļuma izšķirtspēja.

2.2 Telpiskais gaismas modulators un gaismas avoti

Projekcijas sistēmas funkcija ir pārveidot ciparu video pikseļu reprezentāciju uz vizuāli dabā redzamu pikseli. To paveic, izmantojot telpisko gaismas modulatoru un gaismas modulācijas metodes.



2.2. att. 3D vizualizācijas sistēmas arhitektūras funkcionālais pārskats.

2.2.1 Telpiskais gaismas modulators

Telpiskais gaismas modulators (*spatial light modulator; SLM*) ir neliela izmēra gaismu atstarojošs mikrodisplejs, kur viens pikselis ir viens atstarojošs elements – spogulis. Katrs elements var tikt pārslēgts starp diviem stāvokļiem – ieslēgts vai izslēgts, līdzīgi kā optiskais slēdzis. Mikrodispleja spoguļišu masīvs, kas iestatīts katrs savā nepieciešamajā pozīcijā, tiek saukts par bināro kadru. Mikrodispleju tehnoloģija ļauj sasniegt augstu bināro kadru atjaunošanas ātrumu, jo vienā paņēmienā paralēli tiek pārslēgti visi masīva spoguļiši.

Divas komerciāli pieejamās *SLM* tehnoloģijas ir ciparu mikrospoguļu iekārta (*Digital Micromirror Device; DMD*), ko ražo *Texas Instruments*, un šķidrās kristāls uz pusvadītāja (*Liquid Crystal on Semiconductor; LCoS*), ko izstrādāja *General Electric* [37]. Salīdzinot abu tehnoloģiju bināro kadru attēlošanas biežumu (pārslēgšanās ātrumu), *DMD* ir ātrāks. *William* [38] no *JVC North America R&D Center* ziņo, ka *LCoS* pārslēgšanās ātrums ir 12 ms (nodrošinot 83 pelēki modulētus kadrus sekundē), bet *DMD* čips *DLP7000* [39] nodrošina 32 552 bināros kadrus sekundē jeb 127 astoņu bitu pelēki modulētus kadrus sekundē (ar impulsa platuma modulācijas metodi).

Texas Instruments DLP7000 spoguļmatricai ciparu saskarne tiek īstenota caur *DLP4100* mikroshēmojumu. *DLP7000* spoguļmatricā ir 1024 spoguļiši vienā rindā un 768 rindas (1024 × 768 pikseļi), kas sagrupētas 16 blokos pa 48 rindām. Mikrospoguļišu stāvokļa maiņa tiek sākta pēc iestatīšanas impulsa padošanas, un katram rindu blokam tas ir atsevišķs. Iestatīšana ilgst vairākas mikrosekundes.

Ņemot vērā, ka jaunus binārā kadra datus var ierakstīt spoguļmatricas rindās, kuras tajā momentā netiek iestatītas, lietojot iestatīšanas impulsa vadību pa četrus bloku komplektiem, var panākt augstāku kopējo bināro kadru atjaunošanas ātrumu. Šādu metodi sauc par dalīto iestatīšanu (*phased reset mode*). Pilna binārā kadra iestatīšana tiek saukta par pilno iestatīšanu (*global reset mode*).

2.2.2 Gaismas avoti

Telpiskais gaismas modulators reālā sistēmā ar gaismas avotiem un elementiem var tikt izmantots vairākos variantos.

1. Plaša spektra gaismas avota (*broad spectrum light source; BSLs*) izstarotā gaisma tiek sadalīta pa krāsām, izmantojot krāsu disku, un tiek lietots viens *SLM*, kā aprakstīts [40, 2.1. nod]. Pamatkrāsas tiek sajauktas ar laika metodi.
2. Plaša spektra gaismas avota izstarotās gaismas sadalīšanai tiek lietotas prizmas un katru pamatkrāsu atstaro viens no trijiem *SLM*. Šis variants ir apskatīts [41, 3.2. nod]. Pamatkrāsas tiek sajauktas optiski.

3. Šaura spektra gaismas avoti (*narrow spectrum light sources; NSLS*) tiek lietoti ar vienu *SLM*, bez krāsu diska. Variants ir apskatīts [40, 5.1. nod]. Pamatkrāsas tiek sajauktas ar laika metodi.
4. Šaura spektra gaismas avoti tiek lietoti ar trijiem *SLM*, un krāsas tiek sajauktas optiski. Šāds variants ir parādīts [42].

Plaša spektra gaismas avots nozīmē, ka tiek izstarota plaša spektra redzamā (baltā) gaisma, piemēram, ksenona loka spuldze. Šaura spektra gaismas avots nozīmē, ka tiek izmantoti atsevišķi avoti, kur katrs spīd kādā no pamatkrāsām, piemēram, sarkanajā, zaļajā vai zilajā.

Aditīvās krāsu jaukšanas sistēmai par pamatkrāsām tiek lietotas sarkanā, zaļā un zilā krāsa. Kā skaidro *Gegenfurtner* [43], tas ir balstīts uz teoriju par cilvēka acs trihromātiskumu jeb Junga–Helmholca teoriju. Šāda trīs pamatkrāsu aditīvā krāsu jaukšana tiek plaši lietota displeju tehnoloģijās, piemēram, *CRT* un *LCD*.

2.3 Gaismas modulācijas metodes

Gaismas avota izstarotā plūsma tiek bināri atstarota no telpiskā gaismas modulatora. Lai panāktu toņus (piemēram, astoņu bitu pelēkais), nepieciešams īstenot gaismas modulāciju.

Gaismas intensitātes modulācijas rezultātā iegūtā spožuma enerģija (pelēkais tonis) ir gaismas plūsmas integrālis noteiktā laika periodā [44]. Pelēkie toņi tiek iegūti, lietojot gaismas modulāciju ar *SLM* palīdzību [45], taču pilnas krāsas tiek iegūtas, lietojot pelēko toņu modulāciju atsevišķi katrai pamatkrāsai. Pelēko toņu modulācijas principi tiek lietoti arī pasīvajos *LCD* [46], un populārākais ir impulsa platuma modulācija ar *SLM*, ko piemin arī *Brennesholtz* [47, 60. lpp].

Pamatā ir divas projekcijas sistēmās lietojamās gaismas modulācijas metodes.

1. Binārā impulsa platuma modulācija (*binary pulse width modulation; PWM*) [48], kuru veic *SLM*, turot avota gaismas plūsmas vērtību konstantu. Šī modulācijas metode ir aprakstīta *Texas Instruments* patentā [49], kurš tika iesniegts 1991. gadā reizē ar telpiskā gaismas modulatora izgudrojumu. Detalizēta *PWM* laika diagramma ir parādīta 4.1. attēlā.
2. Gaismas avota intensitātes modulācija (*light source intensity modulation; LSIM*), kuru veic reālā laikā vājināms gaismas avots, kamēr *SLM* tiek attēlots nepieciešamais binārais kadrs. Šī metode ir pieminēta [50], taču kopumā tikai neliels skaits zinātnisko rakstu piemin šādu modulācijas metodi un tās lietojumus projekcijas sistēmās [51]. Viens no iemesliem tam varētu būt, ka projekcijas sistēmās parasti mēģina maksimizēt spožumu un līdz šim reālā laikā vājināmi gaismas avoti (piemēram, gaismas diodes) nav bijuši pietiekoši jaudīgi. Detalizēta *LSIM* laika diagramma ir parādīta 4.2. attēlā.

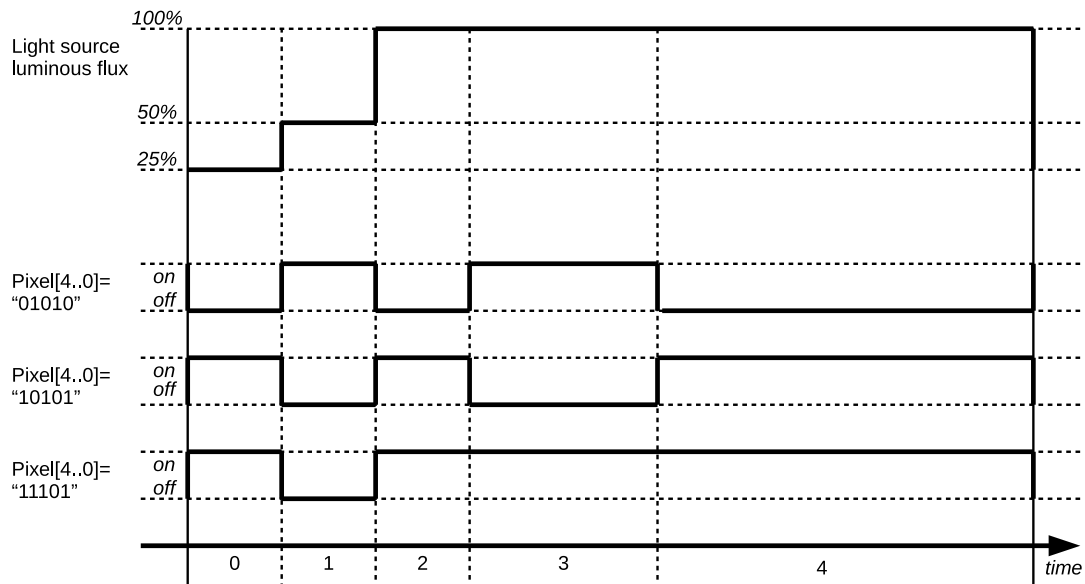
Divas pieminētās modulācijas metodes var apvienot viena pelēkā toņa attēlošanā, veidojot jaunu modulācijas metodi – jaukto modulācijas metodi (*mixed light modulation method*). Literatūras un patentu apskats parāda, ka šāda modulācijas metode projekcijas sistēmām līdz šim nav pieminēta un lietota.

2.3.1 Jauktā modulācijas metode

Jauktā modulācijas metode paredz, ka viena pelēkā toņa modulēšanai tiek izmantota gan impulsa platuma modulācija, gan gaismas avota intensitātes modulācija.

Jauktās modulācijas metodes būtība ir parādīta 2.3. attēlā, kur redzams kā tiek modulēti vairāki piecbitīgi toņi. Attēla augšējā daļā ir parādīta gaismas avota plūsmas izmaiņa (divi biti no pieciem tiek modulēti ar gaismas avota intensitāti, trīs biti ar impulsa platuma modulāciju). *Pixel[4..0] = "zzzzz"* parāda modulējamā pelēkā toņa skaitlisko vērtību, kur "zzzzz" ir piecu bitu dziļa pikseļa pelēkā toņa vērtība. Attēlā skaidri parādīts, ka *PWM* bitu modulācijas laikā gaismas avota plūsma saglabājas nemainīga (100 %), taču avota modulācijas laikā plūsma krītas par 50 % katram nākošajam bitam.

Kaut kas līdzīgs jauktajai modulācijas metodei ir redzams [50], taču gan [51], gan [46], gan lietojumu informācijas analīze neuzrāda, ka šāda veida metode būtu līdz šim lietota projekcijas sistēmām ar telpisko gaismas modulatoru, tādēļ šī ir uzskatāma par jaunu metodi.



2.3. att. Jauktās modulācijas metodes secības vairāku piecbitīgu pelēko toņu modulācijai.

2.4 Nodaļas pārskats

Šajā nodaļā tika izklāstīts 3D vizualizācijas sistēmas darbības princips, piedāvāti vairāki arhitektūras izveidošanas varianti, apskatīts telpiskais gaismas modulators un gaismas modulācijas metodes.

Turpmākai sistēmas modelēšanai un eksperimentālai īstenošanai nepieciešams izvēlēties vienu projekcijas sistēmas arhitektūru. Pirmkārt, lai novērtētu piedāvāto jauno modulācijas metodi, jāizmanto reālā laikā vājināmi avoti – gaismas diodes. Otrkārt, lai atvieglotu pirmā prototipa fizisko projektēšanu un izgatavošanu, tiks lietots viens telpiskais gaismas modulators, nevis trīs, taču izstrādātā modulācijas metode var tikt lietota arī trīs telpisko gaismas modulatoru sistēmā. Uz šādas arhitektūras bāzes tiks veikta tālākā sistēmas modelēšana.

3 Sistēmas modelis un ieejas parametri

Sistēmas modeļa izveidošana sākas ar ieejas parametru definēšanu. Katru sistēmas arhitektūras elementu raksturo viens vai vairāki parametri, un tie tiek saukti par sistēmas *ieejas* parametriem, jo tie nosaka kā tieši sistēma darbosies. Parametri tiek grupēti saistībā ar konkrēto arhitektūras elementu, savukārt arhitektūras elementi tiek grupēti pēc to izcelsmes veida (vai pastāv iespēja tiešā veidā ietekmēt elementu un tā parametrus). Parametri tiek iedalīti trijās grupās.

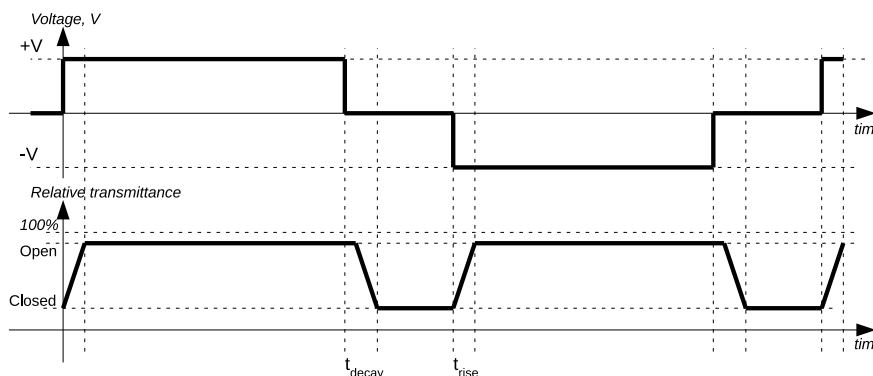
1. Neietekmējamie parametri – šajā parametru grupā ietilpstošie elementi ir reālas fizikālās iekārtas, kuras ražo nozares uzņēmumi (piemēram, iepriekš pieminētie *Texas Instruments* un *EuroLCDs*), un ir iespēja tikai izvēlēties kādu no iespējamajiem iekārtu variantiem.
2. Ietekmējamie parametri – šajā grupā esošos arhitektūras elementus un to parametrus var brīvi vadīt un izvēlēties vai nu izstrādes stadijā, vai darbības laikā. Piemēram, izvēlēties kādu no modulācijas metodēm.
3. Lietotāja atrašanās vietu raksturojošie parametri – šajā grupā atrodas parametri, kuri apraksta lietotāja atrašanās vietu telpā attiecībā pret vizualizācijas sistēmu. Kā parādīts 2.2. attēlā, lietotājs skatās uz daudzplakņu ekrānu no noteikta punkta un 3D kvalitāti, ko uztver lietotājs, ietekmētas, kurā vietā precīzi lietotājs atrodas.

3.1 Neietekmējamie parametri

3.1.1 Optiskais slēdzis

Optiskā slēdža darbību apraksta pārslēgšanās pārejas procesa un optisko īpašību raksturojošie parametri. Tipiskā sprieguma vadības forma šķidro kristālu optiskajiem slēdžiem ir parādīta 3.1. attēlā (balsoties uz [52] un [46]).

Optiskais pārejas process notiek rimšanas (*decay*) un kāpuma (*rise*) laikā. Rimšanas laiks apraksta procesu, kurā optiskais slēdzis maina stāvokli no caurspīdīga uz izkliedējošu stāvokli (t_{decay}). Kāpuma laiks apraksta procesu, kurā optiskais slēdzis maina stāvokli no izkliedējoša uz caurspīdīgu stāvokli (t_{rise}). Šķidro kristālu optiskais slēdzis tiek vadīts ar simetrisku bipolāru spriegumu.



3.1. att. Šķidro kristālu optiskā slēdža gaismas caurlaidības atkarība no vadības sprieguma izmaiņām.

Optiskā slēdža caurspīdīgā stāvokļa gaismas caurlaidība (η_{open})

Parametrs definē optiskā slēdža caurspīdīgā stāvokļa gaismas caurlaidību. Parametra vēlamā (ideālā) vērtība ir 1 jeb 100 % (bez zudumiem). Reāliem optiskajiem slēdžiem šis parametrs nav 100 % un caurspīdīgā stāvoklī notiek absorbcija un izkliedēšanās.

Optiskā slēdža izkļiedējošā stāvokļa gaismas caurlaidība (η_{closed})

Izkļiedējošā stāvokļa gaismas caurlaidība apraksta to, cik labi tiek izkļiedēta gaisma. Šis parametrs ietekmē ekrāna pastiprināšanas koeficienta vērtību, aprēķinot ekrāna spožumu.

Optiskā slēdža pārslēgšanās laiks starp optiskajiem stāvokļiem ($t_{\text{decays}}, t_{\text{rise}}$)

Pārslēgšanās laiks (rimšanas un kāpšanas) tiek definēts kā pārejas process starp 10 % un 90 % (un otrādi) caurspīdīguma vērtībām. Šķidro kristālu optiskajiem slēdžiem laika ilgums ir atkarīgs no pieliktā elektriskā lauka intensitātes, materiāla un slāņa biezuma [46].

Vizualizācijas sistēmas modelī šis laiks ir jāņem vērā, lai novērstu viena attēla izmērēšanos starp diviem secīgiem slāņiem, ieviešot dzēšanās (*blanking*) laiku. Katrs dzēšanās laiks samazina kopējo kadru atjaunošanas ātrumu un spožumu.

Optiskā slēdža izmērs (horizontālais un vertikālais) (d_w, d_h)

Optiskā slēdža horizontālais un vertikālais izmērs ietekmē vizualizācijas sistēmas radītā volumetriskā attēla maksimālos izmērus, tādā veidā ietekmējot uztveramā attēla kvalitāti.

3.1.2 Telpiskais gaismas modulators

Telpisko gaismas modulatoru apraksta turpmāk minētie parametri.

Telpiskā gaismas modulatora izšķirtspēja (N_w, N_h)

Izšķirtspēju nosaka mikropoguļu skaits. Ražotāji piedāvā iekārtas ar nozares standarta izšķirtspējām (640 x 480, 1024 x 768, 1920 x 1080) un malu attiecību (4 : 3, 16 : 9). Šo parametru maksimālās vērtības sasniedz 8K, kas tiek lietota lielizmēra projekcijas sistēmās, piemēram, *FullDome* projektors (8192 x 8192), kas tiek lietots planetārijos.

Telpiskā gaismas modulatora bināro kadru atjaunošanas biežums (R_{slmBin})

Šis parametrs raksturo skaitu, cik bināros kadrus telpiskais gaismas modulators spēj iestatīt mikropoguļu masīvā (ieskaitot datu ielādes un iestatīšanās laikus). Parametru nosaka konkrētais *SLM* – uzbūve, datu joslas platums un takts frekvence. Pieejamiem *SLM* šī vērtība ir no 4000 līdz 32 552 bināriem kadriem sekundē [53].

Telpiskā gaismas modulatora mikropoguļu iestatīšanās laiks (t_{slmRst})

Iestatīšanās laiks ir atkarīgs no konkrētā *SLM* uzbūves īpašībām (spoguļišu izmēra, smaguma). Tā vērtība ir minēta ražotāju datu lapās, piemēram, *Texas Instruments* ražotā *DLP7000* iestatīšanās laiks ir $\approx 12,5\mu\text{s}$.

3.1.3 Gaismas avots un gaismas pārvades ceļš

Gaismas avots, telpiskais modulators un daudzplakņu ekrāns ir sasaistīti ar gaismas pārvades ceļu. Tā galvenais uzdevums ir savākt avota radīto gaismu, to homogenizēt, nofokusēt uz telpiskā gaismas modulatora virsmu un aizvadīt atstaroto gaismu uz daudzplakņu ekrānu.

Avota gaismas plūsma (ϕ_{vsource})

Šis parametrs raksturo avota radīto gaismas plūsmas daudzumu, kas tiek aprakstīts ar gaismas plūsmas parametru. Tā kā pamatkrāsas tiek jauktas laikā, tad trīs pamatkrāsu gadījumā katrs gaismas avots spīd trešo daļu no laika, un kopējā avotu gaismas plūsma tiek izteikta kā vidējais no trijiem.

Gaismas pārvades ceļš ($\eta_{\text{passiveElements}}$)

Gaismas pārvades ceļš sastāv no pasīviem optiskajiem elementiem, piemēram, savācējlēcām, pārvades lēcām, gaismas homogenizētāja un prizmas. Šos pasīvos elementus var aprakstīt ar vienu parametru – kopējo gaismas caurlaidību, kas tiek lietota spožuma aprēķināšanai.

3.2 Ietekmējamie parametri

Sistēmas ietekmējamie parametri ietver daudzplakņu ekrāna uzbūvi un darbības parametrus (krāsu dziļums, dzēšanas parametri, modulācijas metode).

3.2.1 Daudzplakņu ekrāna uzbūve

Daudzplakņu ekrāna uzbūvi raksturo dziļuma plakņu skaits un to savstarpējais attālums.

Dziļuma plakņu skaits (N_{layers})

Ideālam volumetriskam attēlam būtu nepieciešams bezgalīgs skaits dziļuma plakņu, taču individuālo optisko slēdžu parametru dēļ tas nav iespējams. Minimālais dziļuma plakņu skaits volumetriskam ekrānam ir divas, taču mazāk par 10 dziļuma plaknēm rada kropļotu volumetrisko attēlu.

Divu dziļuma plakņu savstarpējais attālums (d_{layers})

Šis parametrs nosaka fizisko attālumu starp divām secīgām dziļuma plaknēm jeb optiskajiem slēdžiem. Minimālais attālums ideāliem optiskajiem slēdžiem ir nulle, taču praktiskos apstākļos minimālais attālums ir puse no optiskā slēdža biezuma (optiskie slēdži atrodas viens pie otra). Savstarpējais attālums un dziļuma plakņu skaits nosaka kopējo volumetriskā ekrāna izmēru.

3.2.2 Laika, modulācijas un krāsu aprakstošie parametri

Šajā parametru grupā ir uzskaitīti ieejas parametri, kurus var mainīt un pielāgot vizualizācijas sistēmas darbības laikā. Tie ir: modulācijas metode, krāsu dziļums un dzēšanas ilguma parametri. Izvēlēto modulācijas metodi definē kā divu mainīgo ($N_{b_{pwm}}$ un $N_{b_{lsim}}$) attiecību. Kopējais krāsu dziļums $N_{bpc} = N_{b_{pwm}} + N_{b_{lsim}}$.

Ar *PWM* modulējamo bitu skaits ($N_{b_{pwm}}$)

Šis parametrs norāda, cik biti no kopējiem toņa bitiem tiks modulēti ar *PWM* metodi, un parametrs var būt robežās no nulles līdz N_{bpc} .

Ar *LSIM* modulējamo bitu skaits ($N_{b_{lsim}}$)

Šis parametrs norāda, cik biti no kopējiem toņa bitiem tiks modulēti ar *LSIM* metodi, un parametrs var būt robežās no nulles līdz N_{bpc} .

Telpiskā gaismas modulatora spoguļišu iestatīšanas variants ($E_{pwmSlmGlobalRst}$)

Šis parametrs attiecas uz bitiem, kas tiek modulēti ar *PWM*, un nosaka, vai telpiskā gaismas modulatora spoguļiši tiek iestatīti ar pilno iestatīšanas (*global reset mode*) variantu vai dalīto iestatīšanu (*phased reset mode*). Parametram var būt tikai divas vērtības – 0 vai 1. Ja parametrs uzstādīts kā 1, tad tiek pieņemts, ka tiek lietots pilnās iestatīšanas variants, kā parādīts izteiksmē (4.7).

Pamatkrāsu skaits (N_{colors})

Pamatkrāsu skaits nosaka sistēmā iespējamo krāsu toņu virzienus. Lai arī mūsdienās displejos lieto plašu krāsu gammu, atsevišķos lietojumos var būt nepieciešams lietot tikai pelēkos toņus (vienu krāsu), piemēram, datortomogrāfijas attēli ir melnbalti un to attēlošanai pietiek ar pelēko toni.

Dziļuma dzēšanās laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku (R_{dbs})

Šis parametrs apraksta dzēšanās perioda ilgumu starp pēdējo un pirmo dziļuma plakni. Tas ir nepieciešams, lai novērstu pirmā un pēdējā slāņa attēlu pārklāšanos uz nepareizajiem slāņiem, tādā veidā kropļojot volumetrisko attēlu. Parametrs tiek definēts kā attiecība starp dzēšanās perioda ilgumu un optiskā slēdža ilgāko pārejas procesu, $R_{dbs} = \frac{t_{depthBlanking}}{\max(t_{decay}, t_{rise})}$.

Starpslāņu dzēšanās laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku (R_{db})

Šis parametrs nosaka starpslāņu dzēšanās periodu ilgumu starp divām secīgām dziļuma plaknēm (izņemot pirmo un pēdējo). Attiecība ir definēta kā $R_{db} = \frac{t_{blanking}}{\max(t_{decay}, t_{rise})}$.

3.3 Lietotāja atrašanās vietu raksturojošie parametri

Lietotāja atrašanās vietu pret daudzplakņu ekrānu nosaka turpmāk minētie parametri.

Lietotāja skata leņķis (φ_{obs})

Skata leņķi definē kā leņķi starp daudzplakņu ekrāna normāli un vektoru, kas sākas daudzplakņu ekrāna centrā un ir pavērsts pret lietotāja acīm.

Lietotāja attālums (d_{obs})

Attālumu definē kā vektora garumu no daudzplakņu ekrāna centra līdz lietotāja acīm.

4 Modeļa izejas parametri un matemātiskās sakarības

Vizualizācijas sistēmu veiktspēju apraksta ar iepriekš minētajām kvalitātes metrikām (izejas parametriem) un šajā nodaļā tās tiek sasaistītas ar ieejas parametriem, izmantojot matemātiskās sakarības. Apkopojot visas sakarības, izveidojas sistēmas matemātiskais modelis. Sistēmas izejas parametri:

- R_{fps} – telpisko kadru atjaunošanas biežums (kadru skaits sekundē), $[R_{\text{fps}}] = \text{Hz}$;
- L_{vscreen} – spožums, $[L_{\text{vscreen}}] = \text{cd/m}^2$;
- N_{colVars} – krāsu toņu skaits, $[N_{\text{colVars}}] = \text{integer}$;
- 3D attēla kvalitātes parametri:
 - N_{volRes} – telpiskā izšķirtspēja, $[N_{\text{volRes}}] = \text{integer}$;
 - N_{volDens} – vokseļu blīvums, $[N_{\text{volDens}}] = \text{integer}$;
 - N_{score3D} – 3D uztveres vērtējums, $[N_{\text{score3D}}] = \text{integer}$.

4.1 Telpisko kadru atjaunošanas biežums

Volumetriskā 3D vizualizācijas sistēmā kadru atjaunošanas ātrums ir definēts kā pilna telpiskā kadra ($x y z$) attēlošanas reižu skaits sekundē. Biežums ir apgriezta vērtība nepieciešamajam laika periodam vienas pilnas volumetriskās bildes attēlošanai (tai skaitā visas dziļuma plaknes, visi dzēšanas periodi, visas krāsas). To parāda izteiksme (4.1).

$$R_{\text{fps}} = \frac{1}{t_{\text{depthBlanking}} + t_{\text{layerBlanking}} + t_{\text{active}}} \quad (4.1)$$

kur $t_{\text{depthBlanking}}$ – dziļuma dzēšanas ilgums;

$t_{\text{layerBlanking}}$ – kopējais starpslāņu dzēšanas ilgums;

t_{active} – telpiskā kadra spīdēšanas ilgums.

Dziļuma dzēšanas ilgums ir atkarīgs no ieejas parametra R_{dbs} un optiskā slēdža pārejas procesa ilgumu ieejas parametriem, kā parādīts izteiksmē (4.2).

$$t_{\text{depthBlanking}} = R_{\text{dbs}} \cdot \max(t_{\text{decay}}, t_{\text{rise}}) \quad (4.2)$$

kur R_{dbs} – dziļuma dzēšanas laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku;

t_{decay} – optiskā slēdža pārslēgšanās laiks no caurspīdīgā uz izkliedējošo stāvokli;

t_{rise} – optiskā slēdža pārslēgšanās laiks no izkliedējošā uz caurspīdīgo stāvokli.

Kopējais starpslāņu dzēšanas ilgums ir aprēķināms ar izteiksmi (4.3), kur tiek sasummēts katra starpslāņa dzēšanas ilgums.

$$t_{\text{layerBlanking}} = (N_{\text{layers}} - 1)t_{\text{blanking}} \quad (4.3)$$

kur $t_{\text{layerBlanking}}$ – dzēšanas laiks starp visiem starpslāņiem;

N_{layers} – dziļuma plakņu skaits;

t_{blanking} – dzēšanās laiks starp diviem starpslāņiem.

Starpslāņu dzēšanas ilgums ir atkarīgs no ieejas parametra R_{db} un optiskā slēdža pārejas procesa ilgumu ieejas parametriem, kā parādīts izteiksmē (4.4).

$$t_{\text{blanking}} = R_{\text{db}} \cdot \max(t_{\text{decay}}, t_{\text{rise}}) \quad (4.4)$$

kur R_{db} – starpslāņu dzēšanas laika attiecība pret optiskā slēdža pārslēgšanās laiku.

Telpiskā attēla spīdēšanas ilgums (laiks, kurā attēls tiek projicēts daudzplakņu ekrānā) ir atkarīgs no dziļuma plakņu skaita un laika ilguma vienas plaknes 2D attēla projicēšanai, kā parādīts (4.5).

$$t_{\text{active}} = N_{\text{layers}} \cdot t_{\text{depth}} \quad (4.5)$$

kur t_{depth} – vienas dziļuma plaknes attēlošanas ilgums.

Vienas dziļuma plaknes attēlošanas ilgums ir definēts kā laika periods, kurā tiek pilnībā parādīts viens 2D kadrs ar uzstādīto pamatkrāsu skaitu un to dziļumu bitos. Vizualizācijas sistēma ir balstīta uz vienu *SLM* elementu, un krāsas tiek jauktas, izmantojot laika metodi. Tas ir parādīts ar formulu (4.6).

$$t_{\text{depth}} = N_{\text{colors}} t_{\text{color}} \quad (4.6)$$

kur N_{colors} – pamatkrāsu skaits;

t_{color} – vienas pamatkrāsas attēlošanas ilgums.

Vienas pamatkrāsas attēlošanas ilgums ir summa no laika periodiem, kas ir nepieciešami gan *PWM*, gan *LSIM* bitu modulēšanai, tādā veidā vienā formulā (4.7) apvienojot visas trīs piedāvātās modulācijas metodes.

$$t_{\text{color}} = t_{\text{perPwmBits}} + t_{\text{perLsimBits}} \quad (4.7)$$

kur $t_{\text{perPwmBits}}$ – laika periods, kurā tiek modulēts nepieciešamais bitu skaits ar *PWM*;

$t_{\text{perLsimBits}}$ – laika periods, kurā tiek modulēts nepieciešamais bitu skaits ar *LSIM*.

Laika periods, kurā tiek modulēti biti ar impulsa platuma modulāciju, ir saistīts ar viena binārā kadra attēlošanas ilgumu. Kā parādīts formulā (4.8), laika periodu aprēķina, sareizinot viena binārā kadra attēlošanas ilgumu ar nepieciešamo laika soļu skaitu. Laika soļu skaits binārai impulsa platuma modulācijai ir izsakāms pēc formulas $2^{N_{\text{bpwm}}} - 1$, piemēram, astoņu bitu izšķirtspējas impulsa platuma modulācijai ir nepieciešami $2^8 - 1 = 255$ laika soļi.

$$t_{\text{perPwmBits}} = t_{\text{pwmBit}} (2^{N_{\text{bpwm}}} - 1) \quad (4.8)$$

kur t_{pwmBit} – laika periods, kurā tiek ielādēts un attēlots viens binārais kadrs, modulācijai ar *PWM*;

N_{bpwm} – bitu skaits, kas tiek modulēts ar bināro impulsa platuma modulācijas metodi.

Laika periods, kurā tiek modulēti biti ar avota intensitātes modulāciju, ir saistīts ar viena binārā kadra attēlošanas ātrumu un modulējamo bitu skaitu, tos sareizinot, kā parādīts izteiksmē (4.9). *LSIM* metodei laika soļu skaits ir tāds pats kā modulējamo bitu skaits, jo katrs bits tiek izvadīts vienā laika solī, pielāgojot avota intensitāti konkrētajam bitam.

$$t_{\text{perLsimBits}} = t_{\text{lsimBit}} \cdot N_{\text{bLsim}} \quad (4.9)$$

kur t_{lsimBit} – laika periods, kurā tiek ielādēts un attēlots viens binārais kadrs, modulācijai ar *LSIM*;

N_{bLsim} – bitu skaits, kuri tiek modulēti ar gaismas avota intensitātes metodi.

Viena binārā kadra attēlošanas ilgums ir atkarīgs no *SLM* ieejas parametriem un spoguļīšu iestatīšanas varianta. *PWM* bināros kadrus var izvadīt ar abiem iestatīšanas variantiem un izvēlēto variantu nosaka $E_{\text{PwmSlmGlobalRst}}$. Tas ir parādīts izteiksmē (4.10).

$$t_{\text{pwmBit}} = t_{\text{slmLoad}} + (E_{\text{PwmSlmGlobalRst}} \cdot t_{\text{slmRst}}) \quad (4.10)$$

kur $E_{\text{PwmSlmGlobalRst}}$ – telpiskā gaismas modulatora spoguļīšu iestatīšanas variants;

t_{slmLoad} – viena binārā kadra ielādēšanas ilgums telpiskajā gaismas modulatorā;

t_{slmRst} – telpiskā gaismas modulatora spoguļu iestatīšanas laiks.

LSIM bināros kadrus var izvadīt tikai ar pilno spoguļu iestatīšanas variantu, kā parādīts izteiksmē (4.11).

$$t_{\text{lsimBit}} = t_{\text{slmLoad}} + t_{\text{slmRst}} \quad (4.11)$$

Viena binārā kadra ielādēšanas ilgums telpiskajā gaismas modulatorā ir:

$$t_{\text{slmLoad}} = \frac{1}{R_{\text{slmBin}}} \quad (4.12)$$

kur R_{slmBin} – telpiskā gaismas modulatora bināro kadru attēlošanas skaits sekundē.

Telpiskā gaismas modulatora spoguļišu iestatīšanas laiks ir atkarīgs no konkrēta *SLM*:

$$t_{slmRst} = f(slm) = 4,5 \mu s + 8 \mu s = 12,5 \mu s \text{ priekš } DLP7000 \quad (4.13)$$

Ar šo formulu ir pilnībā parādīta sistēmas volumetrisko kadru attēlošanas biežuma atkarība no ieejas parametriem. Šīs matemātiskās sakarības veido daļu no kopējā matemātiskā modeļa.

4.2 Spožums

Displeja spožums ir tā spēja radīt kvalitatīvus un uztveramus attēlus. Spožums ir atkarīgs no vairākiem parametriem, piemēram, atsevišķa optiskā slēdža kvalitātes, daudzplakņu ekrāna uzbūves, dziļuma plakņu skaita un citiem ieejas parametriem. Projektācijas sistēmu ekrāniem spožumu aprēķina pēc formulas, kas dota [47, 327. lpp]:

$$L_{vscreen} = \frac{E_{vscreen}}{\pi} G_{screen} \quad (4.14)$$

kur $L_{vscreen}$ – daudzplakņu ekrāna izstarotais gaismas apjoms (spožums), izteikts cd/m^2 ;

$E_{vscreen}$ – uz daudzplakņu ekrānu krītošā gaisma (apgaismojums), izteikts lux;

G_{screen} – ekrāna pastiprināšanas koeficients.

Ekrāna pastiprināšanas koeficients daudzplakņu ekrānam ir saistīts ar optisko slēdžu gaismas izkliedēšanas kvalitāti, taču šie dati nav precīzi zināmi, tāpēc tiek lietots relatīvais ekrāna pastiprinājums, kur, skatoties taisnā leņķī, vērtība ir 1, un krītas, mainoties leņķim. Šķidro kristālu optiskajiem slēdžiem gaismas leņķiskā izkliede ir izskaidrota [54]. *Park, G., et al* [55] ziņo par kosinuss formas sadalījuma funkciju, kā parādīts izteiksmē:

$$G_{screen} = 1 \cdot \cos(\varphi_{obs}) \quad (4.15)$$

kur φ_{obs} – lietotāja skata leņķis pret normāli (perpendikulāri ekrānam ir 0°).

Uz daudzplakņu ekrāna krītošais apgaismojums ir aprēķināms, zinot gaismas plūsmu un ekrāna izmēru, kā parādīts sakarībā (4.16).

$$E_{vscreen} = \frac{\phi_{vscreen}}{d_w \cdot d_h} \quad (4.16)$$

kur $\phi_{vscreen}$ – gaismas plūsma, kas sasniedz daudzplakņu ekrānu, izteikta lm;

d_w – optiskā slēdža platums, izteikts m;

d_h – optiskā slēdža augstums, izteikts m.

Gaismas plūsma ir enerģija, kas sekundē sasniedz daudzplakņu ekrānu. Gaismas plūsmas sākums ir gaismas avots, kuru pa ceļam vājina gaismas ceļā esošie optiskie elementi, modulācijas metode un daudzplakņu ekrāna pārslēgšanās laiks, kā parādīts:

$$\phi_{vscreen} = \phi_{vsource} \eta_{passiveElements} \eta_{slm}(t) \eta_{vs} \eta_{vst}(t) \quad (4.17)$$

kur $\phi_{vsource}$ – gaismas avota radītā gaismas plūsma;

$\eta_{passiveElements}$ – gaismas ceļa optisko elementu relatīvā gaismas caurlaidība;

$\eta_{slm}(t)$ – telpiskā gaismas modulatora efektīvā gaismas caurlaidība;

η_{vs} – daudzplakņu ekrāna optiskā gaismas caurlaidība;

$\eta_{vst}(t)$ – daudzplakņu ekrāna efektīvā gaismas caurlaidība.

Tā kā pirmie divi ir ieejas parametri, tālāk apskatīsim telpiskā gaismas modulatora efektīvo gaismas caurlaidību. Gaismas plūsmas vājināšana notiek dēļ izvēlētās modulācijas metodes. Modulācijas metožu ienestā *SLM* gaismas caurlaidība tiek izteikta relatīvi pret maksimālo gaismas caurlaidību noteiktā laika periodā pie vienas no modulācijas metodēm:

$$\eta_{slm}(t) = \frac{\phi_{avg}(\text{mode})}{\phi_{avg}(\text{max})} \quad (4.18)$$

Vidējā gaismas plūsma noteiktā periodā ir izteikta kā integrālis no gaismas plūsmas:

Modulācijas metodes definēšana

Metode (saīsinājums)	$N_{b_{pwm}}$	$N_{b_{lsim}}$
Binārā impulsa platuma (<i>PWM</i>)	$\neq 0$	$= 0$
Avota intensitātes (<i>LSIM</i>)	$= 0$	$\neq 0$
Jauktā (<i>mixed</i>)	$\neq 0$	$\neq 0$

$$\phi_{avg}(t) = \frac{1}{t_{per}} \int_0^{t_{per}} \phi(t) dt \quad (4.19)$$

kur ϕ_{avg} – vidējā gaismas caurlaidība dotajā laika periodā;

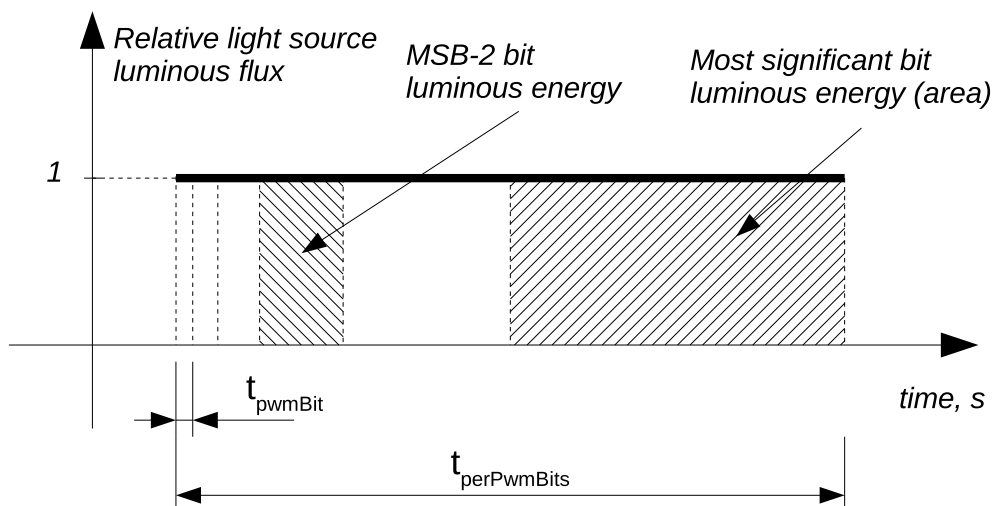
t_{per} – dotais laika periods;

$\phi(t)$ – gaismas plūsmas funkcija.

Izvēlētā modulācijas metode matemātiski tiek izteikta kā sakarība starp diviem parametriem $N_{b_{pwm}}$ un $N_{b_{lsim}}$ pēc 4.1. tabulā parādītajiem noteikumiem. Ja pikseļa pelēkā toņa spilgtums ir definēts kā N bitu skaitlis, tad katrs šī skaitļa bits $[0 \dots (N - 1)]$ ir jāparāda ar savu gaismas enerģijas daudzumu. Tas nozīmē, ja i -tā bita gaismas enerģija ir Q_v , tad $(i + 1)$ -tā bita gaismas enerģijai jābūt $2 Q_v$.

Impulsa platuma modulācijas gadījumā detalizēta laika diagramma ir parādīta 4.1. attēlā. Pilnā $t_{perPwmBits}$ perioda gaismas enerģija ir sadalīta bināri svērtos laika soļos. Mazākajā laika solī t_{pwmBit} tiek parādīts (uz *SLM* virsmas) vismazāk svarīgais intensitātes bits. Nākamajam bitam atvēlētais laiks ir divas reizes garāks $t_{pwmBit}(LSB + 1) = 2 t_{pwmBit}(LSB)$. Tādā veidā katrs bits tiek attēlots ar bināri svērtu gaismas enerģijas apjomu.

Pieņemot, ka avota gaismas plūsma ir konstanta $\phi_{v_{source}} (N_{b_{pwm}} \neq 0; N_{b_{lsim}} = 0) = const$ noteiktajā periodā, impulsa platuma modulācijas vidējā gaismas plūsma ir aprēķināma pēc sakarības (4.19) vai vienkāršākā formā pēc sakarības (4.20). Izteiksme parāda, ka *PWM* gadījumā vidējā gaismas plūsma nav atkarīga no *SLM* parametriem vai modulējamo bitu skaita.



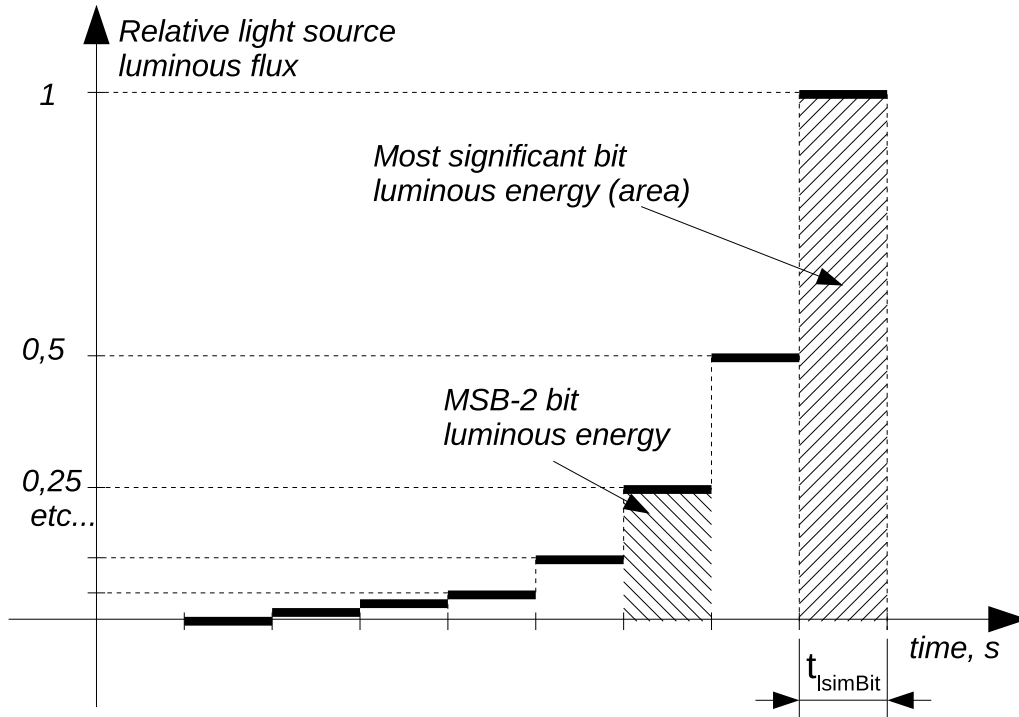
4.1. att. Ar impulsa platuma modulāciju modulējamo bitu gaismas enerģijas vizuālais attēlojums.

$$\phi_{avg}(N_{b_{pwm}} \neq 0; N_{b_{lsim}} = 0) = \phi_{v_{source}} \quad (4.20)$$

kur $\phi_{v_{source}}$ – avota gaismas plūsma (*PWM* modulācijas metodes laikā tā ir konstanta).

Avota intensitātes modulācijas gadījumā detalizēta laika diagramma ir parādīta 4.2. attēlā. Šajā gadījumā katram modulējamajam bitam ir vienāds laika solis ($t_{lsimBit}$), bet laikā mainās avota intensitāte, attiecīgi katram bitam tā ir bināri svērta. Pieņemot, ka i -tajam bitam gaismas enerģija ir

$Q_v = t_{\text{lsimBit}} \cdot \phi_{\text{vsource}}$, tad $(i - 1)$ -tajam bitam gaismas enerģija ir $\frac{1}{2}Q_v = \frac{1}{2}(t_{\text{lsimBit}} \phi_{\text{vsource}})$ un tā kā t_{lsimBit} nemainās, tad šī bita attēlošanas laikā gaismas plūsmai jābūt $\frac{1}{2}\phi_{\text{vsource}}$.



4.2. att. Ar avota intensitāti modulējamo bitu gaismas enerģijas vizuālais attēlojums.

Izmantojot izteiksmi (4.21) var aprēķināt i -tā ($0 \leq i \leq N - 1$) bita gaismas plūsmu. Pieņemot, ka visnozīmīgākā bita ($N - 1$) gaismas plūsma ir maksimālā ($\phi_{\text{vsource}}(N - 1) = 1$), izteiksmi var vienkāršot uz (4.22).

$$\phi_{\text{vsource}}(i) = \frac{1}{2^{((N-1)-i)}} \cdot \phi_{\text{vsource}}(N - 1) \quad (4.21)$$

$$\phi_{\text{vsource}}(i) = \frac{1}{2^{((N-1)-i)}} \quad (4.22)$$

4.2. attēlā parādītās avota intensitātes modulācijas gadījumā periodā vidējās gaismas plūsmas vērtība ir aprēķināma, summējot katra bita gaismas plūsmas vērtības un izdalot ar bitu skaitu:

$$\phi_{\text{avg}}(N_{\text{bpwm}} = 0; N_{\text{blsim}} \neq 0) = \frac{1}{N_{\text{blsim}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{blsim}}-1} \frac{1}{2^{((N_{\text{blsim}}-1)-i)}} \quad (4.23)$$

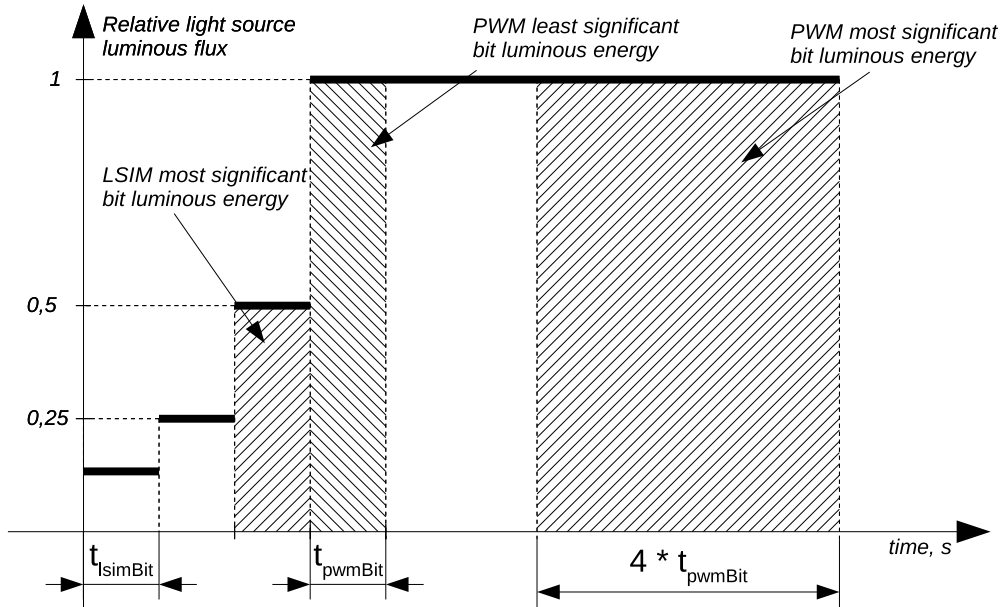
kur N_{blsim} – ar avota intensitātes metodi modulējamo bitu skaits.

Šī izteiksme parāda, ka *LSIM* gadījumā pie jebkura bitu skaitļa, izņemot 0 un 1 ($N_{\text{blsim}} > 1$), gaismas plūsma ir mazāka par 1 ($\phi_{\text{avg}}(\text{LSIM}) < 1$). Tas nozīmē, ka vienādojumā (4.18) maksimālā gaismas plūsmas vērtība (pret kuru tiks salīdzinātas pārējās) būs $\phi_{\text{avg}}(\text{PWM})$.

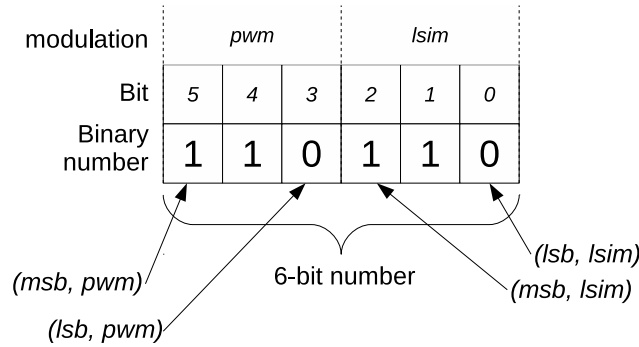
Jauktās modulācijas metode ir parādīta 4.3. attēlā. Tajā redzams, ka N_{blsim} biti tiek modulēti ar *LSIM* (tiem mainās gaismas plūsma vērtība) un N_{bpwm} biti tiek modulēti ar *PWM* (tiem nemainās gaismas plūsmas vērtība, taču mainās laika soļu platums). Jauktās modulācijas gadījumā, lai atšķirtu *PWM* un *LSIM* bitu kombinācijas, tiek lietots 4.4. attēlā redzamais pieraksts.

Vispārīgā gadījumā *PWM* un *LSIM* periodi t_{lsimBit} un t_{pwmBit} var nebūt vienādi, tādēļ vidējās gaismas plūsmas aprēķinā tiek lietoti abi šie periodi. Vissvarīgākā *LSIM* bita gaismas enerģija tiek definēta kā puse no vismazāk svarīgā *PWM* bita gaismas enerģijas, kā parādīts sakarībā:

$$Q_v(\text{MSB,LSIM}) = \frac{1}{2}Q_v(\text{LSB,PWM}) \quad (4.24)$$



4.3. att. Ar jaukto modulāciju modulējamo bitu gaismas enerģijas vizuāls attēlojums (pie $N_{b_{pwm}} = 3, N_{b_{lsim}} = 3$ bitu kombinācijas un $t_{lsimBit} = t_{pwmBit}$).



4.4. att. Jauktās modulācijas bitu pieraksts.

Gaismas enerģiju var izteikt kā gaismas plūsmas (kas ir zināma *PWM* laikā) un laika perioda reizinājumu (lietojot ģeometrisku piegājieni vidējās gaismas plūsmas integrāļa risināšanai). Tas ļauj pārrakstīt iepriekšējo izteiksmi kā:

$$\phi_{v_{source}}(\text{MSB}, \text{LSIM}) t_{lsimBit} = \frac{1}{2} \phi_{v_{source}}(\text{LSB}, \text{PWM}) t_{pwmBit} \quad (4.25)$$

Izsakot iepriekšējā izteiksmē $\phi_{v_{source}}(\text{MSB}, \text{LSIM})$ iegūstam sakarību (4.26).

$$\phi_{v_{source}}(\text{MSB}, \text{LSIM}) = \frac{1}{2} \frac{t_{pwmBit}}{t_{lsimBit}} \phi_{v_{source}}(\text{LSB}, \text{PWM}) \quad (4.26)$$

Izmantojot izteiksmes (4.10) un (4.11), sakarība (4.26) tiek pārveidota par sakarību (4.27) lietošanai ar *DLP7000* telpisko gaismas modulatoru.

$$\phi_{v_{source}}(\text{MSB}, \text{LSIM}) = \phi_{v_{source}}(\text{LSB}, \text{PWM}) \frac{1}{2} \begin{cases} 0,71 & \text{PWM ar dalīto iestatīšanu} \\ 1 & \text{PWM ar pilno iestatīšanu} \end{cases} \quad (4.27)$$

Izmantojot iepriekšējās izteiksmes, iespējams izveidot jauktās modulācijas metodes vidējās gaismas plūsmas formulu. Tā sastāv no divām daļām – no vidējās gaismas plūsmas *LSIM* bitu modulācijas laikā un vidējās gaismas plūsmas *PWM* bitu modulācijas laikā:

$$\phi_{\text{avg}}(N_{\text{bpwm}}, N_{\text{bsim}}) = \frac{Q_{\text{pwm}} + Q_{\text{lsim}}}{t_{\text{perPwmBits}} + t_{\text{perLsimBits}}} \quad (4.28)$$

PWM daļas gaismas enerģiju var aprēķināt, aizstājot Q_{pwm} ar formulu (4.20):

$$Q_{\text{pwm}} = t_{\text{perPwmBits}} \phi_{\text{avg}}(N_{\text{bpwm}} \neq 0; N_{\text{bsim}} = 0) \quad (4.29)$$

kur Q_{pwm} – *PWM* modulācijas bitu gaismas enerģija.

LSIM daļas gaismas enerģiju aprēķina, apvienojot izteiksmes (4.21) un (4.26). Formulā (4.23) esošo summēšanu nepieciešams izmainīt, ņemot vērā, ka jauktās modulācijas gadījumā *LSIM* daļas vissvarīgāko bitu izvada nevis ar 100 % gaismas plūsmu, bet tādu gaismas plūsmu, lai *LSIM* vissvarīgākā bita gaismas enerģija būtu 50 % no *PWM* daļas vismazāk svarīgā bita gaismas enerģijas.

Formulā (4.26) esošais koeficients $\frac{1}{2}$ ir iekļauts formulā (4.30), izmainot summēšanas sākumu no 0 uz 1 ($\frac{1}{2^1} = 0,5$). *PWM* un *LSIM* laika soļu iespējamā atšķirība ir iekļauta kā dalījums $\frac{t_{\text{pwmBit}}}{t_{\text{lsimBit}}}$.

$$Q_{\text{lsim}} = t_{\text{perLsimBits}} \frac{t_{\text{pwmBit}}}{t_{\text{lsimBit}}} \cdot \frac{1}{N_{\text{bsim}}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{bsim}}-1} \frac{1}{2^i} \quad (4.30)$$

kur Q_{lsim} – *LSIM* modulācijas bitu gaismas enerģija.

Ievietojot formulā (4.28) *PWM* gaismas enerģiju (izteiksme (4.29)) un *LSIM* gaismas enerģiju (izteiksme (4.30)), iegūstam:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{avg}}(N_{\text{bpwm}} \neq 0; N_{\text{bsim}} \neq 0) &= \\ &= \frac{t_{\text{perPwmBits}} \phi_{\text{avg}}(N_{\text{bpwm}} \neq 0; N_{\text{bsim}} = 0)}{(t_{\text{perPwmBits}} + t_{\text{perLsimBits}})} + \frac{t_{\text{perLsimBits}} \frac{t_{\text{pwmBit}}}{t_{\text{lsimBit}}} \frac{1}{N_{\text{bsim}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{bsim}}-1} \frac{1}{2^i}}{(t_{\text{perPwmBits}} + t_{\text{perLsimBits}})} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Šī izteiksme atspoguļo vidējo gaismas plūsmas aprēķinu jauktās modulācijas metodes gadījumā.

Ievietojot individuāli apskatītās modulācijas metodes formulā (4.18) iegūstam, ka visu trīs metožu telpiskā gaismas modulatora efektīvā caurspīdība ir izsakāma:

$$\eta_{\text{slm}}(\text{mode}) = \frac{1}{\phi_{\text{avg}}(\text{PWM})} \cdot \begin{cases} \phi_{\text{avg}}(\text{PWM}) & \text{priekš } PWM \\ \frac{1}{N_{\text{bsim}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{bsim}}-1} \frac{1}{2^i} & \text{priekš } LSIM \\ \frac{Q_{\text{pwm}} + Q_{\text{lsim}}}{(t_{\text{perPwmBits}} + t_{\text{perLsimBits}})} & \text{priekš jauktās} \end{cases} \quad (4.32)$$

Nākamais parametrs, kurš izteiksmē (4.17) ietekmē kopējo caurlaidību, ir daudzplakņu ekrāns. Tā optiskā gaismas caurlaidība ir atkarīga no optisko slēdžu skaita un katra optiskā slēdža caurspīdīguma:

$$\eta_{\text{vs}} = \eta_{\text{open}}^{N_{\text{layers}}} \quad (4.33)$$

kur η_{open} – optiskā slēdža caurspīdīgā stāvokļa gaismas caurlaidība;

N_{layers} – dziļuma plakņu skaits.

Daudzplakņu ekrāna efektīvā gaismas caurlaidība parāda to, cik liels gaismas daudzums pazūd dzēšanas periodu dēļ. To aprēķina kā attiecību starp telpiskā kadra spīdēšanas ilgumu un summu no šī ilgumu un dzēšanas ilgumiem (dzēšanas periodu laikā gaisma neparādās attēlā):

$$\eta_{\text{vst}} = \frac{t_{\text{active}}}{t_{\text{active}} + t_{\text{depthBlanking}} + t_{\text{layerBlanking}}} \quad (4.34)$$

4.3 Krāsu toņu skaits

Krāsu toņu skaits definē, cik daudz dažādus krāsu toņus vizualizācijas sistēma spēj parādīt. Toņu skaits ir atkarīgs no pamatkrāsu skaita un vienas krāsas pelēkā toņa krāsu dziļuma (bitos), kā parādīts izteiksmē:

$$N_{\text{colVars}} = 2^{(N_{\text{bpc}} N_{\text{colors}})} = 2^{\left((N_{\text{bpwm}} + N_{\text{blsim}}) N_{\text{colors}} \right)} \quad (4.35)$$

kur N_{colVars} – krāsu toņu skaits;

N_{bpwm} – bitu skaits, kas tiek modulēti ar bināro impulsa platuma modulācijas metodi;

N_{blsim} – bitu skaits, kuri tiek modulēti ar gaismas avota intensitātes metodi;

N_{colors} – pamatkrāsu skaits.

4.4 3D attēla kvalitātes parametri

4.4.1 Telpiskā izšķirtspēja un blīvums

Telpiskā izšķirtspēja ir visu dimensiju pikseļu reizinājums (horizontālā, vertikālā un dziļuma). Telpiskam gaismas modulatoram ir horizontālā un vertikālā izšķirtspēja, taču dziļuma izšķirtspēja ir dziļuma plakņu skaits, kā parādīts sakarībā (4.36). Vokseļu blīvums ir parametrs, kas nosaka, cik daudz vokseļu ir fiziskā tilpumā, un to aprēķina, izdalot kopējo vokseļu skaitu ar tilpumu, kā parādīts sakarībā (4.37).

$$N_{\text{volRes}} = N_w N_h N_{\text{layers}} \quad (4.36)$$

kur N_{volRes} – telpiskā izšķirtspēja vokseļos.

$$N_{\text{volDens}} = \frac{N_{\text{volRes}}}{d_w d_h d_{\text{layers}} (N_{\text{layers}} - 1)} \quad (4.37)$$

kur N_{volDens} – vokseļu blīvums;

d_w – optiskā slēdža platums;

d_h – optiskā slēdža augstums;

d_{layers} – attālums starp diviem secīgiem dziļuma slāņiem.

4.4.2 3D uztveres vērtējums

Volumetrisku displeja sistēmu 3D uztveres metriku var balstīt uz līdzīgiem pētījumiem par 2D displeju sistēmām – attēla dziļumu uztvere atkarībā no attēla izšķirtspējas.

Tsushima Y., et al [56] analizē kā 2D attēla izšķirtspēja ietekmē dziļuma uztveri un norāda, ka augstāka izšķirtspēja nodrošina labāku 2D attēla dziļuma uztveri ēnotiem objektiem. Viņi arī ziņo, ka uztverei un izšķirtspējai ir logaritmiskas formas sakarība, kā parādīts [56, 3. attēls]. *Masaoka K., et al* [57] ziņo par līdzīgiem novērojumiem, parādot logaritmisku sakarību [57, 12. attēls]. *Nur, G. et al* [58] informē, ka 3D video uztveramā dziļuma sajūta pakāpeniski pieaug līdz sasniedz kādu sliekšni.

Minētie avoti savstarpēji apstiprina logaritmisku sakarību starp izšķirtspēju un dziļuma uztveri. Var izvirzīt teoriju, ka daudzplakņu volumetriskās vizualizācijas sistēmās 3D uztveres vērtējums ir logaritmiskā veidā atkarīgs no dziļuma izšķirtspējas N_{layers} , kā parādīts izteiksmē (4.38). Vēl var ņemt vērā *Sullivan A.* [59] veiktos pētījumus, ka dziļuma izšķirtspēju var lietotājam šķietami paaugstināt, lietojot specifiskas dziļuma plakņu attēlu sapludināšanas metodes.

$$N_{\text{score3D}} = \log_{10}(N_{\text{layers}}) \quad (4.38)$$

kur N_{score3D} – 3D kvalitātes vērtējuma rezultāts.

Šīs teorijas pārbaude ir parādīta 6.4. nodaļā, kur ir aprakstīti veiktie eksperimenti ar reāliem lietotājiem. Šie eksperimenti daļēji apstiprina izvirzīto teoriju.

5 Modeļa analīze un parametru parciālā optimizācija

Šajā nodaļā tiek veikta modeļa analīze, sasaistot izveidoto matemātisko modeli ar ieejas parametru konkrētām vērtībām. Vispirms nodaļā tiek parādīts analīzes process, kam seko dažādu ieejas parametru un to grupu ietekmes pētīšana uz sistēmas modeli.

Iepriekšējā nodaļā parādītās matemātiskās sakarības tiek apvienotas *melnajā kastē* ar ieejām (ieejas parametri) un izejām (izejas parametri) un izveido sistēmas matemātisko modeli. Šāda modeļa analīzei un simulācijām var lietot dažādas metodes, piemēram, izveidot modeli iekš *MATLAB*, *Python*, *C# CLI* vai, izveidojot atsevišķu lietotni ar grafisko saskarni.

5.1 Analīzes procesa apraksts

Sistēmas modeļa analīzes mērķis ir atrast atbilstošas ieejas parametru kombinācijas, kas maksimizē vienu no izejas parametriem, pārējos turot noteiktās robežās.

Ieejas parametri ir sagrupēti un analīzes procesā tiek apskatītas atsevišķas grupas, lai izvairītos no pārlietu lieliem datoraprēķiniem. Parciālā parametru analīze tiek veikta noteiktam ieejas parametram vai ieejas parametru grupai, kamēr pārējie ieejas parametri tiek turēti noklusētajās vērtībās.

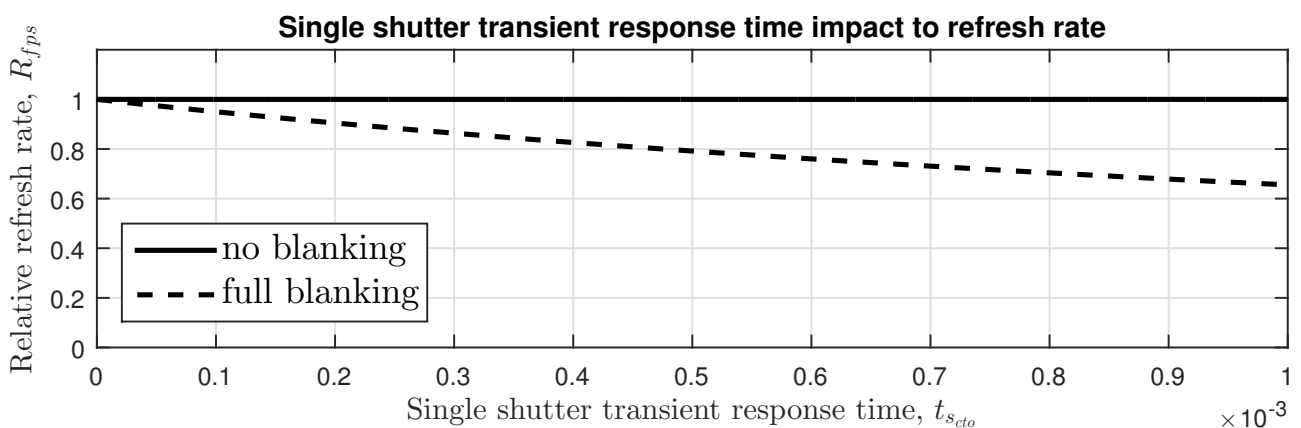
5.2 Ieejas parametru un grupu parciālā analīze

5.2.1 Optiskais slēdzis

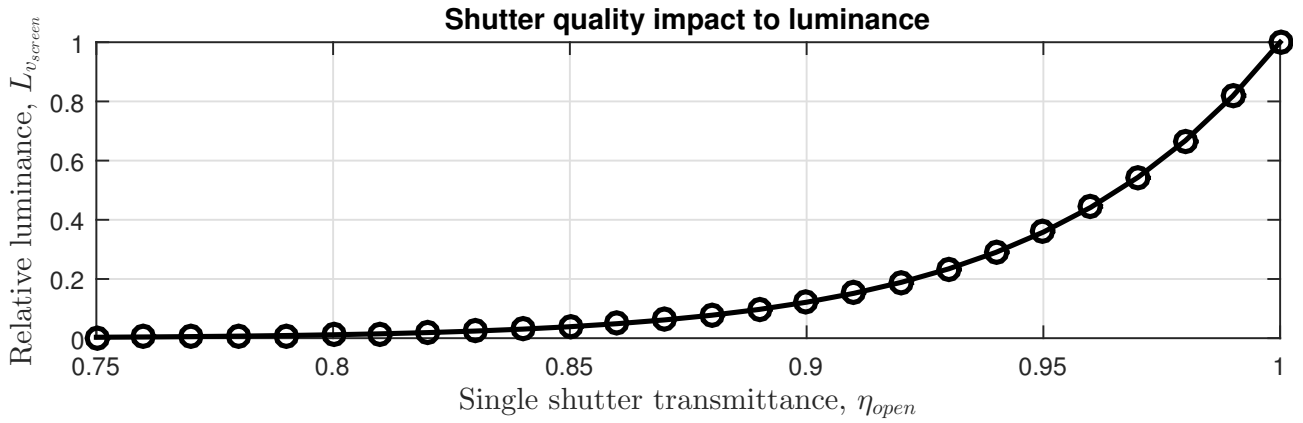
Vispirms tiek apskatīti optiskā slēdža pārejas procesu raksturojošie ieejas parametri, veicot t_{decay} vai t_{rise} parametra vērtību pilnizpildi (*sweep*). Tā kā šo parametru ietekmi kontrolē R_{db} un R_{dbs} vērtības, šie parametri arī tiek mainīti analīzē. Optiskā slēdža pārejas procesu ietekme pie divām dzēšanas parametru vērtībām (pilna dzēšana $R_{\text{db}} = 1$ un bez dzēšanas $R_{\text{db}} = 0$) ir parādīta 5.1. attēlā. Redzams, ja dzēšana netiek izmantota, tad optiskā slēdža pārejas procesi neietekmē kadru attēlošanas biežumu, taču, ja tiek izmantota dzēšana, tad ietekme ir lineāra, atkarībā no pārejas procesa ilguma. Piemēram, optiskais slēdzis ar pārejas procesu robežās no 500 μs līdz 1000 μs ietekmē relatīvo kadru attēlošanas biežumu no 0,79 uz 0,65 (relatīvi 1 ir kad netiek lietots dzēšanas laiks).

Optiskā slēdža optisko parametru ietekmi var redzēt, veicot η_{open} ieejas parametra pilnizpildi. Rezultāts ir redzams 5.2. attēlā – eksponenciāla ietekme uz kopējo sistēmas spožumu.

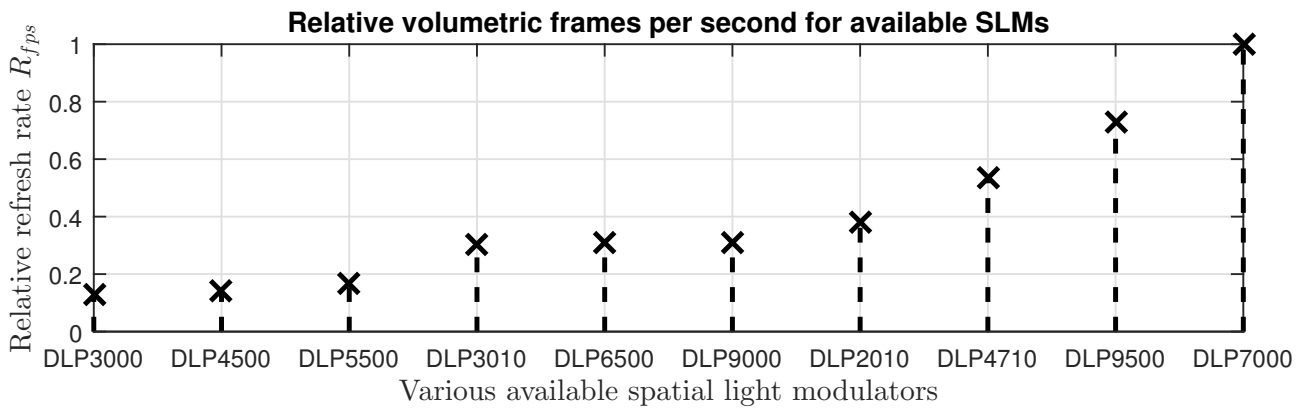
Analīze parāda, ka vajadzētu izvēlēties optisko slēdzi ar augstāko optisko caurspīdību un zemāku pārslēgšanās procesa ilgumu.



5.1. att. Optiskā slēdža pārejas procesu relatīvā ietekme uz volumetrisko kadru attēlošanas biežumu (arī spožumu), t_{rise} parametra pilnizpilde.



5.2. att. Optiskā slēdža ietekme uz sistēmas spožumu.



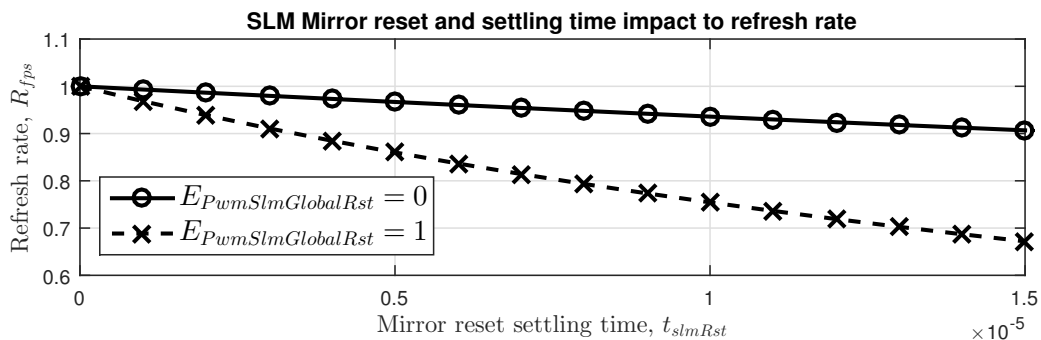
5.3. att. Sistēmas relatīvais attēlu atjaunošanas biežums ar dažādiem SLM.

5.2.2 Telpiskais gaismas modulators

Telpiskā gaismas modulatora parametri ietekmē attēla atjaunošanas biežumu un spožumu. 5.3. attēlā ir parādīta pieejamo SLM bināro kadru ātruma ietekme uz sistēmas relatīvo attēla atjaunošanas biežumu. Kā redzams, DLP7000 ir visātrākais, nodrošinot $\approx 30\%$ lielāku atjaunošanās biežumu.

Spoguļišu iestatīšanas laiks t_{slmRst} ietekmē atjaunošanas biežumu un spožumu lineāri, kā redzams 5.4. attēlā. Ietekme uz atjaunošanas biežumu ir lielāka, ja ieejas parametrs $E_{PwmSlmGlobalRst}$ ir uzstādīts uz 1, taču, no otras puses, spožumu tas neietekmē.

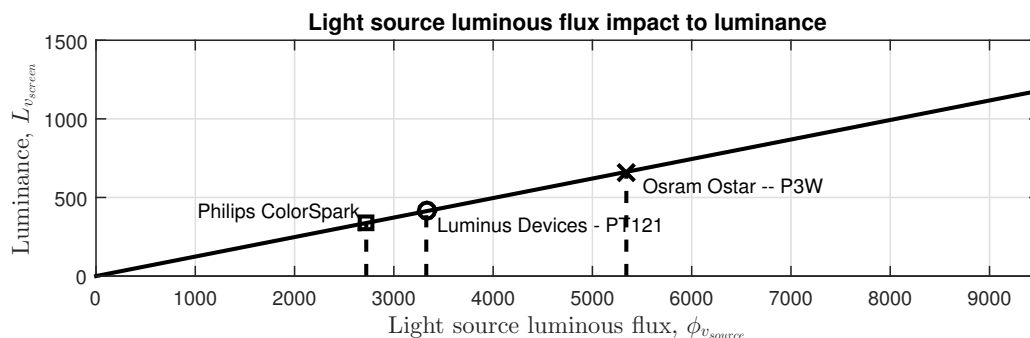
Analīze rāda, ka spoguļišu iestatīšanās laiks vairāk ietekmē atjaunošanas ātrumu, nevis spožumu, taču jebkurā gadījumā būtu jāizvēlas SLM ar pēc iespējas mazāku iestatīšanās laiku.



5.4. att. SLM spoguļišu iestatīšanās ilguma ietekme uz volumetriskā kadra atjaunošanas biežumu.

5.2.3 Gaismas avots un gaismas pārvades ceļš

Avota gaismas plūsmas vērtību lieto, lai aprēķinātu sistēmas spožumu. Šī parametra pilnizpilde ir redzama 5.5. attēlā – grafiks parāda, ka gaismas plūsma ietekmē spožumu lineāri (jo lielāka sākotnējā gaismas plūsma, jo lielāks spožums).

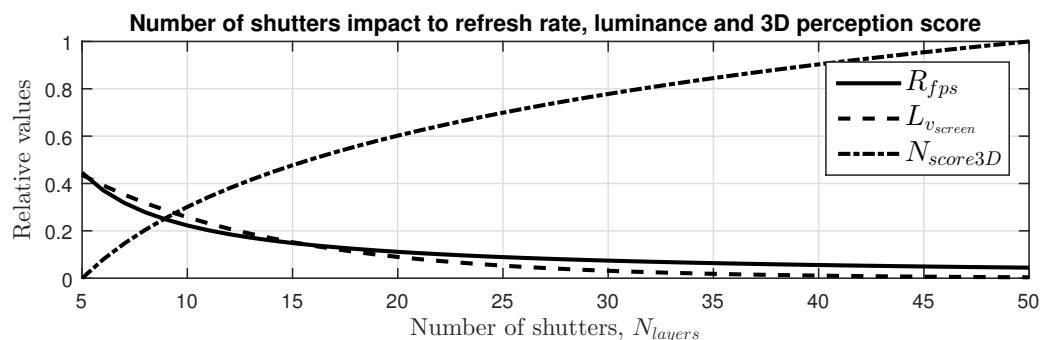


5.5. att. Avota gaismas plūsmas ietekme uz sistēmas spožumu ar atliktiem reāliem gaismas avotu variantiem.

5.2.4 Daudzplakņu ekrāns

Daudzplakņu ekrāna aprakstošie ieejas parametri tiek lietoti visu izejas parametru sakarībās. 5.6. attēlā ir parādīta triju izejas parametru relatīvā atkarība no daudzplakņu ekrāna dziļuma plakņu skaita. Redzams, ka kadru atjaunošanas ātruma un spožuma atkarība ir pēc formas $\left(\frac{1}{x}\right)$ funkcija. Pie noklusētām pārējo ieejas parametru vērtībām šīs līknes pārklājās pie 15 dziļuma plaknēm.

Vēl dziļuma plakņu skaits ietekmē 3D uztveres kvalitātes vērtējumu. Izvirzītās teorijas relatīvais rezultāts ir attēlots ar $N_{score3D}$ līniju (raustīti-punktēto) un ir ar logaritmisku formu. No lietotāja skatupunkta, dziļuma slāņiem būtu jābūt pēc iespējas vairāk, jo tad var labāk uztvert 3D kvalitāti, taču no otras puses, tad samazinās ekrāna spožums un kadru attēlošanas biežums. Šajā gadījumā līknes pārklājās pie 9–10 dziļuma plaknēm.



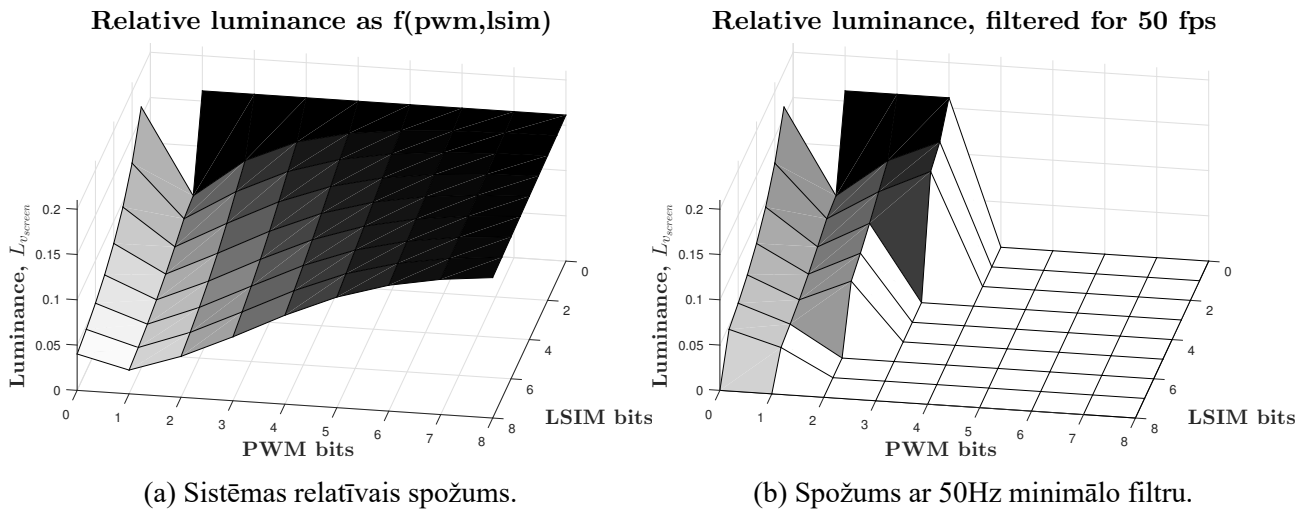
5.6. att. Dziļuma plakņu skaita ietekme uz kadru atjaunošanas ātrumu, spožumu un 3D kvalitātes novērtējumu.

5.2.5 Modulācijas metožu un laika parametru analīze

Modulācijas metodi ietekmē divu parametru (N_{bpwm} un N_{blsim}) savstarpējā sakarība, kā parādīts 4.1. tabulā. Analīzē tiek apskatītas dažādas šo parametru kombinācijas.

Spožums kā funkcija no N_{bpwm} un N_{blsim} ir parādīts 5.7a. attēlā, kur redzams, ka lielāks spožums tiek sasniegts, ja ir lielāks N_{bpwm} .

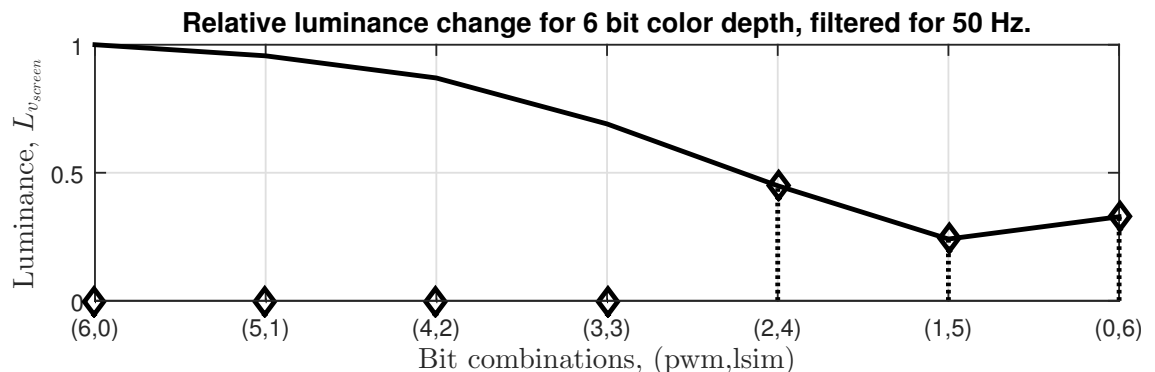
Modulācijas metodes izvēle ietekmē sistēmas spožumu nelineāri un var atrast lokālo optimumu spožumam un kadru atjaunošanas biežumam, ieviešot minimālo kadru atjaunošanas biežuma parametra vērtību un skatoties spožuma rezultātu. Vispirms rezultāti tiek filtrēti – ja pie konkrētās N_{bpwm} un N_{blsim} attiecības kadru atjaunošanas biežums ir zemāks par 50 ($R_{fps}(\min) = 50$), tad spožuma vērtība netiek ņemta vērā un tiek nonullēta. Līdzīgi var aplūkot gadījumu ar 25 Hz minimālo filtra vērtību.



5.7. att. Sistēmas relatīvais spožums pie dažādām PWM un $LSIM$ modulējamo bitu vērtībām.

Filtrētie rezultāti ir redzami 5.7b. attēlā un, kā redzams, vairums spožuma rezultātu punkti ir tikuši nonullēti. Tā kā sistēmā tiek definēts viens krāsu toņu dziļums ($N_{b_{pwm}} + N_{b_{lsim}}$), tad iegūtos rezultātus (virsmas formu) nepieciešams sašķēlēt pa diagonāli. Rezultāts pie ($N_{b_{pwm}} + N_{b_{lsim}} = 6$) ir parādīts 5.8. attēlā.

Attēlā uz horizontālās ass ir atliktas modulācijas bitu kombinācijas ($N_{b_{pwm}}, N_{b_{lsim}}$) formā. Uz vertikālās ass ir atliktas relatīvais spožums. Līnija parāda spožuma rezultātus pirms filtrācijas, bet ar rombu atzīmētie punkti parāda spožuma rezultātus pēc filtrācijas. Grafika kreisajā malā ir redzama spožuma vērtība, modulējot ar PWM metodi ($N_{b_{pwm}}, 0$), savukārt labajā malā redzama spožuma vērtība, modulējot ar $LSIM$ metodi ($0, N_{b_{lsim}}$). Pārējās kombinācijas parāda jauktās modulācijas metodes spožuma rezultātus. No grafika redzams, ka ar PWM metodi filtrētais spožums ir nulle, jeb kadru atjaunošanas ātrums bija pārāk zems, savukārt ar $LSIM$ metodi spožums ir 0,28. Jauktās modulācijas metodes lietošana ļauj sasniegt augstāku spožumu par $LSIM$, sasniedzot 0,49 pie kombinācijas (2, 4).



5.8. att. Relatīvā spožuma grafiks dažādām modulācijas metodēm un bitu sadalījumam pie 18 bitu kopējā krāsu dziļuma uz pikseli.

Sistēmā būtu jāizvēlas tā modulācijas metode un bitu kombinācija, kas sniedz augstāko spožumu (tipiski – grafikā visvairāk uz kreiso pusi, bet, kuras nav nulle). Jauktās modulācijas metodes lietošana ļauj sasniegt augstāku sistēmas spožumu par $LSIM$ metodi, ja PWM metode nenodrošina minimālo kadru atjaunošanas ātrumu.

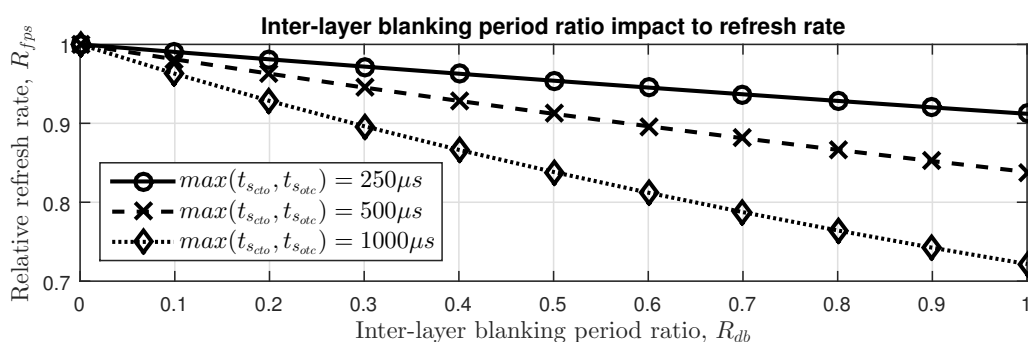
Modulācijas metožu relatīvā spožuma rezultāti un jauktās modulācijas metodes ieguvumi ir apkopoti 5.1. tabulā. Pie 50 Hz minimālās kadru atjaunošanas biežuma vērtības un no trīs līdz astoņi biti uz krāsu gadījumos jauktā modulācijas metode nodrošina 38 % līdz 97 % spožuma pieaugumu. Pie 25 Hz, jauktā modulācijas metode nodrošina 136 % līdz 209 % pieaugumu.

Sistēmas izejas parametrus ietekmē ieejas laika parametri R_{db} un R_{dbs} . Starpslāņu dzēšanas pe-

Jauktās modulācijas metodes ieguvums attiecībā pret *LSIM* un *PWM* pie 50 Hz un 25 Hz filtrētām vērtībām.

biti uz krāsu (bits)	50 Hz fps				25 Hz fps			
	<i>pwm</i>	<i>lsim</i>	<i>mixed</i> (<i>p</i> , <i>l</i>)	ieguv.	<i>pwm</i>	<i>lsim</i>	<i>mixed</i> (<i>p</i> , <i>l</i>)	ieguv.
8	–	–	0,18 (1, 7)	–	–	0,25	0,77 (4, 4)	209 %
7	–	0,28	0,39 (2, 5)	38 %	–	0,28	0,81 (4, 3)	189 %
6	–	0,33	0,44 (2, 4)	36 %	–	0,33	0,87 (4, 2)	165 %
5	–	0,38	0,76 (2, 3)	97 %	–	0,38	0,91 (4, 1)	136 %
4	–	0,47	0,83 (3, 1)	77 %	1	0,47	0,83 (3, 1)	0 %
3	1	0,58	0,68 (2, 1)	0 %	1	0,58	0,68 (2, 1)	0 %

rioda ietekme uz kadru atjaunošanas ātrumu ir redzama 5.9. attēlā. Redzams, ka ietekme ir lineāra un funkcijas slīpums ir atkarīgs no optiskā slēdža pārejas procesa ilguma. Dziļuma dzēšanas perioda (R_{dbs}) ietekme ir līdzīga (tādēļ nav atsevišķi attēlota), taču ar mazāku slīpumu.



5.9. att. Starpslāņu dzēšanas ilguma ietekme uz kadru atjaunošanas ātrumu pie dažādiem optiskā slēdža pārejas procesa ilgumiem.

5.3 Sistēmas modeļa analīzes pārskats

Neietekmējamie parametri

Šajā grupā esošie ieejas parametri modeļa izejas parametrus ietekmē lineāri, tādēļ šie ieejas parametri būtu jāizvēlas pēc iespējas labāki – ātrākais optiskais slēdzis, ātrākais telpiskais gaismas modulators un spēcīgākais gaismas avots.

Ietekmējamie parametri

Šajā grupā esošie ieejas parametri ietekmē izejas parametrus gan lineāri, gan nelineāri. Modulācijas metodes izvēle un laika parametri var tikt uzstādīti prototipa sistēmas darbības laikā, taču daudzplakņu ekrāna uzbūve ir jānofiksē pirms prototipa izveidošanas. Lai varētu pārbaudīt izvirzīto teoriju par dziļuma plakņu skaita ietekmi uz uztveramo 3D attēla kvalitāti, prototipa iekārtā tiks izmantotas 20 dziļuma plaknes.

6 Eksperimentālās iekārtas un modeļa izveidošana

Balstoties uz 2.–5. nodaļā veikto sistēmas modelēšanu un analīzi, šajā nodaļā ir izklāstīta volumetrisko datu pārraides un kopējās sistēmas izveidošana programmējamos loģiskos masīvos (*FPGA*) un eksperimentālā iekārtā pēc 2.2. attēlā redzamās volumetriskās vizualizācijas sistēmas arhitektūras.

6.1 Volumetrisko datu pārraide

Volumetrisko datu pārraide ir nepieciešama, lai varētu pārsūtīt volumetriskos attēlus no to avota uz vizualizācijas sistēmu reālā laikā. Šādas sistēmas uzbūve ir redzama 6.1. attēlā. Datu avotā (datora RAM atmiņā) atrodas trīsdimensionāla pikseļu matrica, kuru ir nepieciešams pārraidīt uz vizualizācijas sistēmu. Trīsdimensionālās pikseļu matricas iegūšana, priekšapstrāde un renderēšana ir veikta atsevišķi un netiek apskatīta šajā disertācijā.

6.1.1 Volumetrisko attēlu datu straumes apraksts

Viens volumetriskais attēls sastāv no trijām telpas asīm (augstums, platums un dziļums) un izšķirtspēja tiek definēta kā to pikseļu reizinājums ($x y z$), piemēram, $(1024 \cdot 768 \cdot 20 = 15,7)$ miljoni volumetrisko pikseļu (vokseļu). Šāda attēla binārais izmērs ir aprēķināms, pareizinot izšķirtspēju ar katra vokseļa krāsu toņu skaitu jeb krāsu dziļumu, kā parādīts izteiksmē:

$$N_{\text{size}} = N_w \cdot N_h \cdot N_{\text{layers}} \cdot N_{\text{bpc}} \cdot N_{\text{colors}} \quad (6.1)$$

kur N_{size} – volumetriskā attēla binārais izmērs.

Viena volumetriskā attēla izmērs ir 377 487 360 biti jeb 45 MiB, ja izšķirtspēja ir $(1024 \cdot 768 \cdot 20)$, trīs pamatkrāsas un astoņi biti uz pamatkrāsu.

Lai sasniegtu reāla laika datu pārraidi, nepieciešams šāda binārā izmēra volumetriskos attēlus pārraidīt ar pietiekoši augstu frekvenci. Datu pārraides kanāla joslas aprēķinam tiek izmantota formula (6.2). Piemēram, 25 volumetrisko kadru pārraidei sekundē nepieciešams datu kanāls ar joslas platumu 9437 Mb/s. Šis pārraides ātrums (25 kadri sekundē) un nepieciešamā josla tiek izvirzīta kā minimālās prasības volumetrisko datu pārraidei.

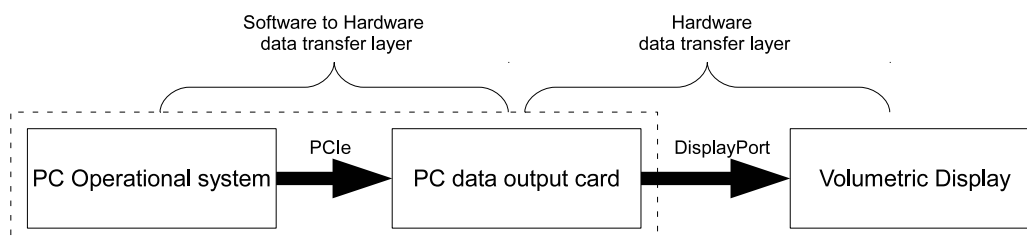
$$N_{\text{bw}} = N_{\text{size}} \cdot R_{\text{fps}} \quad (6.2)$$

kur N_{bw} – nepieciešamais joslas platums reāla laika volumetrisko attēlu pārraidei, biti sekundē;

R_{fps} – attēlu pārsūtīšanas biežums, reizes sekundē.

6.1.2 Datu pārraide no programmatūras līmeņa

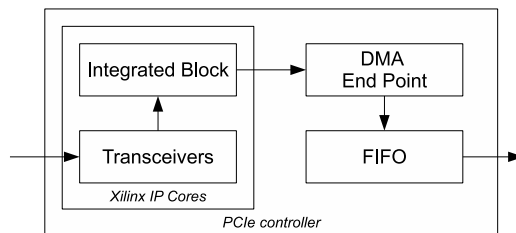
Datu pārraidei no programmatūras kā risinājums ir izvēlēts *Peripheral Component Interconnection express (PCIe)*. *PCIe* ir slāņains datu pārraides standarts, kas sastāv no lietotāju saskarnes, transakcijas, datu savienojuma un fiziskā slāņa. Šī standarta nepieciešamo funkcionalitāti var īstenot ar *FPGA* (*FPGA* ražotāji piedāvā arī cietos *PCIe FPGA* moduļus) un īstenošanai ir lietots *Xilinx Virtex-6* sērijas *FPGA* čips.



6.1. att. Datu pārraides sistēmas uzbūve.

Katra *PCIe* datu līnija ir savienota ar *FPGA* raiduztvērēju (*transceiver*) un *FPGA* iebūvētajā *PCIe Endblock* moduli. *Xilinx* piedāvā lietot *PCIe LogiCORE IP* [60] moduli, kas īsteno dažus no *PCI Express Base Specification Rev 2.0* slāņiem. Šis modulis atbalsta gan pirmās, gan otrās paaudzes *PCIe* standartu.

Šajā gadījumā *Xilinx LogiCORE IP Core* ir uzstādīta atbilstoši *PCIe Gen2* un tā ir sajūgta ar izstrādāto lietotāja saskarnes slāņa moduli, kurā tiek īstenota atmiņas tiešpiekļuves procedūra (*direct memory access; DMA*). Šajā lietotāja saskarnes modulī no *PCIe DMA* datu plūsmas tiek atkodēti volumetriskā attēla dati un ievietoti pirmais iekšā – pirmais ārā (*first in first out; FIFO*) modulī. *FIFO* tiek lietots, lai atdalītu datu plūsmas no *PCIe* uztvērēja daļas un *FPGA DDR3* atmiņas kontroliera. Aprakstītā *FPGA* arhitektūra ir parādīta 6.2. attēlā.



6.2. att. *Xilinx FPGA* īstenotā *PCIe* kontroliera arhitektūra.

Datora operētājsistēmā *PCIe* datu pārraide tiek īstenota sekojoši: vispirms *PCIe* portā iespraustā karte tiek piefiksēta BIOS, tālāk tiek lietota daļa no datora RAM atmiņas (*common buffer*), kurā tiek glabāti volumetriskā attēla dati projām sūtīšanai ar *DMA* procedūru.

Iepriekš sagatavotos volumetriskos attēlus programmatūra ielādē RAM atmiņas apgabalā un speciāli veidoti *Windows* un *Linux PCIe* iekārtas dziņi (*driver*) tiek lietoti, lai sūtītu volumetrisko attēlu straumi uz *FPGA* (tas atrodas *PCIe* portā piespraustā kartē).

PCIe DMA veida datu pārraide sasniedz 56 % efektīvo datu pārraides apjomu attiecībā pret maksimāli iespējamo *PCIe* joslu. Šis samazinājums rodas no *8b/10b* kodēšanas, *DMA* izmantoto *TLP* datu pakešu galvenes (*header*) un *DMA* vadības. Kopā ir sasniegts 11,2 Gb/s datu pārraides joslas platums, kas nodrošina ap 30 volumetrisko attēlu pārraides biežumu sekundē. Šie mērījumi tika veikti ar šādu aparatūru – *Asus P8Z68-V PRO/GEN3* mātesplate, *Intel Core i5-2400* CPU, 8 GB 1,3 GHz *DDR3* RAM, *Xilinx ML605* izstrādes plate *PCIe* portā, *Intel SSD 60 GB HDD*, *Windows 7* un *Linux openSUSE 12.1* operacionālās sistēmās.

6.1.3 Datu pārraide starp aparatūru

Nākamais solis ir izveidot starpiekārtu datu savienojumu – no datorā iespraustās *PCIe* kartes uz volumetrisko vizualizācijas sistēmu. Esošo video pārraides standartu apskats parāda, ka neviens no tiem pa taisno neatbalsta volumetrisko datu pārraidi, taču tos var izmantot kā fiziskos datu nesējus.

Standartu pārskats parāda, ka visplatākā datu pārraides josla ir *HDMI* un *DisplayPort* standartiem. Volumetrisko attēlu pārraidei piemērotākais standarts ir *DisplayPort* jo:

- *DisplayPort 1.2* nodrošina lielāku pārraides joslu (21,6 Gbit/s) [61];
- tam ir elastīga mikropakešu datu pārraides struktūra [62];
- tas atbalsta nestandarta displeju izšķirtspējas;
- tam ir uzstādāmi attēla laika parametri (2D dzēšanas ilgums, priekšimpulss, sinhronizācijas impulss), kas ļauj paaugstināt redzamo datu pārraides apjomu.

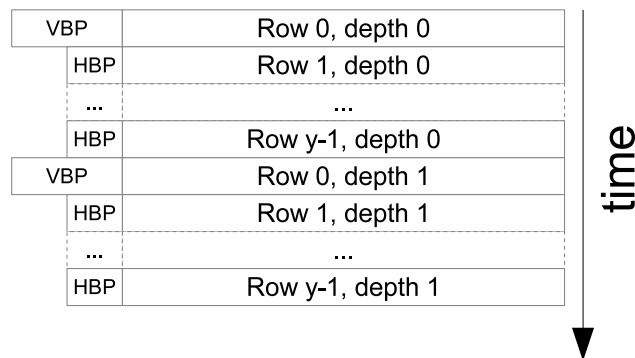
6.1.3.1 Volumetrisko attēlu plūsmas kartēšana

Volumetrisko attēlu plūsmā ir nepieciešams identificēt tekošās dziļuma plaknes kārtas numuru, lai to varētu pareizi attēlot vizualizācijas sistēmā. *DisplayPort* standarts to ļauj veikt šādi:

- katra dziļuma plakne tiek pārraidīta kā atsevišķa attēlu plūsma, izmantojot *DisplayPort 1.2* daudzplūsmu pārraides (*Multi Stream Transfer*) iespēju. Šādi var adresēt līdz 63 dažādām plūsmām;

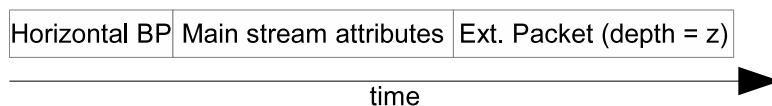
- dziļuma plaknes tiek pārsūtītas secīgi, viena pēc otras, un plaknes kārtas numurs tiek sūtīts speciālā starpkadru datu paketē (*Extension Packet*) pirms katras nākamās dziļuma plaknes;
- dziļuma plaknes tiek mākslīgi sakārtotas vienā lielā 2D attēlā ar nestandarta izšķirtspēju (piemēram, 4095×3840).

Pirmais variants paredz, ka ir nepieciešams izmantot papildus datu paketes ar galvenēm, samazinot efektīvo attēlu pārsūtīšanas biežumu, savukārt trešais variants aprūpina datu plūsmas atkodēšanu. Tādēļ datu kartēšanai ir izmantots otrais variants un šim variantam atbilstoši izkārtots volumetriskais attēls *DisplayPort* plūsmā ir parādīts 6.3. attēlā. Tajā ir redzami divi volumetriskā attēla slāņi, katrs ar y rindām.



6.3. att. Volumetriskā attēla kadrēšana *DisplayPort* standartā.

Volumetriskajā vizualizācijas sistēmā ir paredzēta asinhrona datu saņemšana un attēlošana, tādēļ nav nepieciešams pārraidīt vēsturiski garos horizontālās un vertikālās dzēšanas laikus. *DisplayPort* ļauj samazināt horizontālo dzēšanas laiku līdz pieciem cikliem un vertikālo līdz 17 cikliem (papildus ar *Extension Packet* – 26 cikliem). Vertikālā dzēšanas laikā tiek pārraidīta datu pakete ar speciālo informāciju, kuras saturs ir parādīts 6.4. attēlā.



6.4. att. Vertikālā dzēšanas perioda datu paketes sastāvs (26 takts frekvences cikli).

DisplayPort standarta derīgo datu joslu var aprēķināt, izmantojot formulu (6.3). Zinot dzēšanas periodu ilgumu un viena volumetriskā attēla izmēru, var aprēķināt volumetrisko attēlu pārraides biežumu pēc formulas (6.4). *DisplayPort 1.2* spēj pārraidīt ($1024 \times 768 \times 20$) izšķirtspējas, trīs pamatkrāsu un astoņu bitu krāsu dziļumu volumetrisko attēlu aptuveni 45 reizes sekundē.

$$N_{\text{bwDP}} = f_{\text{sym}} N_{\text{lanes}} N_{\text{bitsDP}} = 540 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 8 = 17,28 \text{ Gb/s} \quad (6.3)$$

kur N_{bwDP} – *DisplayPort 1.2* standarta kopējais joslas platums;

f_{sym} – *DisplayPort 1.2* simbolu takts frekvence;

N_{lanes} – *DisplayPort 1.2* datu līniju skaits;

N_{bitsDP} – ciparu signāla platums jeb biti uz vienu datu līniju.

$$R_{\text{fpsDP}} = \frac{N_{\text{bwDP}}}{N_{\text{size}}} \frac{N_w N_h \frac{N_{\text{colors}}}{N_{\text{lanes}}}}{N_w N_h \frac{N_{\text{colors}}}{N_{\text{lanes}}} + N_{\text{blanking}}} = 45,42 \text{ fps} \quad (6.4)$$

kur $\frac{N_{\text{colors}}}{N_{\text{lanes}}}$ – *DisplayPort* koeficients (četri trīs pamatkrāsu pikseli trīs takts frekvences ciklos);

N_{blanking} – dzēšanas simbolu skaits telpiskajā attēlā.

6.1.3.2 Eksperimentu slēgumi

Datu pārraides kanāls vispirms ir īstenots eksperimentāli, izmantojot *FPGA* izstrādātu *DisplayPort* uztvērēja (*RX*) un raidītāja (*TX*) moduli. Tiek izmantoti divi *Xilinx ML605* [63] izstrādes komplekti ar *FMC XM104* [64] meitasplatēm. Šādā slēgumā var pārbaudīt *DisplayPort* lietošanu volumetrisko attēlu pārraidei dažādos veidos – viena kanāla, četru kanālu un noslēgtās cilpas veidā.

Viena kanāla testēšanas slēgums

Viena kanāla *DisplayPort* standarta izveidošanas eksperiments tika veikts, izmantojot *ML605* un *FMC XM104*, saslēdzot divus *FPGA* raiduztvērējus noslēgtā cilpā ar diviem *SMA* kabeļiem. Šādā veidā tika verificēta *DisplayPort* lietošanas iespēja volumetrisko attēlu pārraidei.

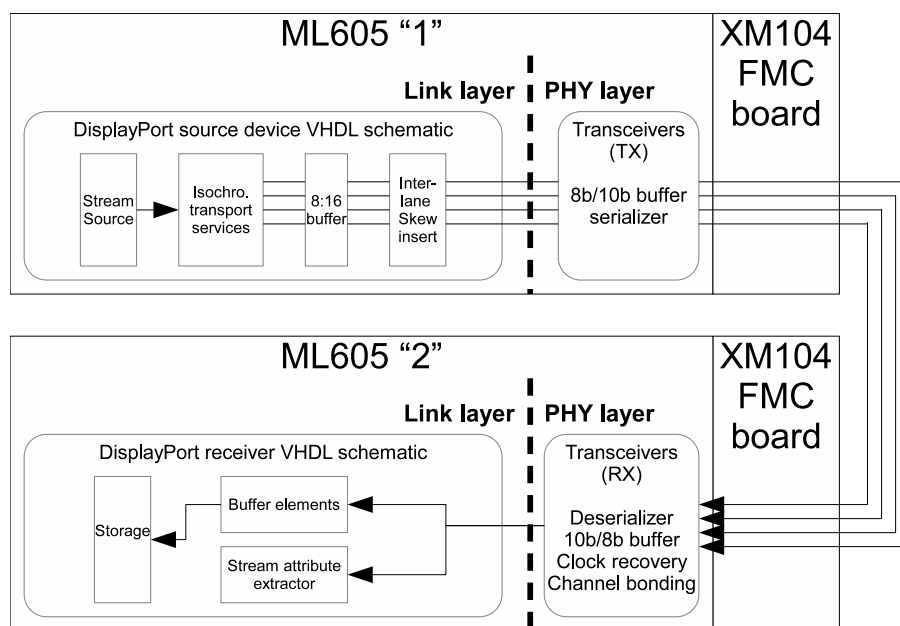
Testa veikšanai tika izveidots *FPGA* modulis (*VHDL* aparatūras apraksta valodā), kas ģenerē volumetriskā 3D attēla plūsmu un kartē atbilstoši *DisplayPort* standartam (ģenerē noteikta izmēra un telpiskā dziļuma volumetrisko attēlu un ievieto horizontālos un vertikālos dzēšanas periodus).

FPGA raiduztvērēji (gan *TX*, gan *RX*) ir uzstādīti šādi – tiek izmantots *8b/10b* un *10b/8b* kodieris, datu serializācija un deserializācija (20 reizes). Sistēmas takts frekvence ir 156,25 MHz.

Izmantojot *ChipScope Logic Analyzer* loģisko analizatoru, tika pārbaudīts, ka *DisplayPort* ir izmantojams volumetrisko attēlu plūsmas pārraidei un dziļuma plaknes kārtas numuru var atkodēt un lietot tālākai datu saglabāšanai.

Četru kanālu testēšanas slēgums

Lai veiktu pilnīgu *DisplayPort* īstenošanas iespēju novērtējumu *FPGA* čipos, tika izveidots pilnu četru kanālu testēšanas slēgums. Tas ir parādīts 6.5. attēlā. Šajā testa slēgumā ir izmantoti divi atsevišķi *ML605* izstrādes komplekti ar *XM104 FMC* meitasplatēm, caur kurām tika saslēgts datu fiziskais savienojums – *CX4* kabelis (četri paralēli kanāli līdzīgi kā *DisplayPort*).



6.5. att. *DisplayPort* četru kanālu testēšanas sistēmas slēgums.

ML605 "1" ir izveidots volumetrisko attēlu straumes ģenerators ar pilniem četriem *DisplayPort* datu kanāliem, kas savienoti ar četriem raiduztvērējiem. Tie ir uzstādīti kā raidītāji (*TX mode*), ar ieslēgtu *8b/10b* buferi un 20 reižu datu serializāciju. *DisplayPort* standartā esošā kanālu datu starpnobīde ir izveidota ar vairākpakāpju reģistriem.

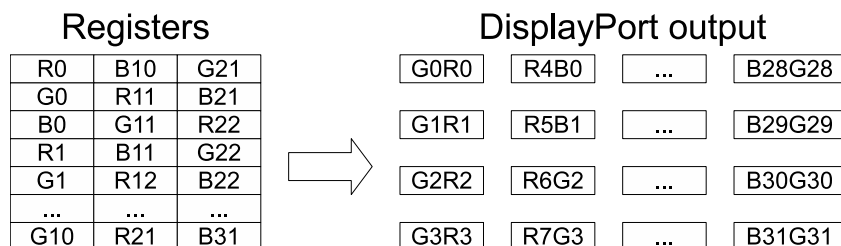
ML605 "2" četri raiduztvērēji ir uzstādīti par uztvērējiem un veic datu paralelizāciju (20 reizes), *10b/8b* buferēšanu, takts signāla atgūšanu un datu līniju savstarpējās nobīdes novākšanu. Šāds raiduztvērēju slēgums īsteno *DisplayPort* standarta fizisko slāni. Papildus šajā *FPGA* ir izveidots uztvērto datu dešifrators, kas atkodē ienākošo *DisplayPort* datu plūsmu un izvelk arī datu plūsmas parametrus un volumetriskā dziļuma kārtas numuru.

Testēšanas slēgums tika pārbaudīts ar *ChipScope Logic Analyzer* loģisko analizatoru un apstiprina, ka *DisplayPort 1.2* ir izmantojams nepieciešamās volumetrisko datu pārraides īstenošanai.

DisplayPort savienošana ar PCIe

PCIe un *DisplayPort* raidītāja apvienošana vienā *FPGA* tiek veikta, atsaistot datu plūsmas ar *DDR3 RAM* atmiņā izveidotu attēla buferi (*frame buffer*).

No *PCIe* kontroliera ārā nākošās datu līnijas platums ir 64 b, *DDR3* kontroliera nepieciešamais datu platums ir 256 b, savukārt izejai uz *DisplayPort* ir 64 b. Viena attēla pikseļa binārais izmērs ir līdz 24 b, un šo datu platumu lielākais kopīgais dalītājs ir 768 b, kurā ietilpst 32 pikseļi. *FPGA* reģistros ir izveidots 768 b masīvs, kurā dati tiek uzglabāti un no kura pikseļu dati tiek kartēti atbilstoši *DisplayPort* plūsmai, kā parādīts 6.6. attēlā.



6.6. att. Pikseļu kartēšana no reģistra uz *DisplayPort* (*R* – sarkanā, *G* – zaļā, *B* – zilā krāsa, *R0* – sarkanās krāsas attēla nultais pikselis, *R31* – sarkanās krāsas attēla 31. pikselis).

6.2 Volumetriskās vizualizācijas sistēmas izveidošana

Volumetriskā vizualizācijas sistēma sastāv no vairākām elektroniskajām platēm:

- galvenā apstrādes plate (kontrolieris) – uz šīs plates atrodas sistēmas vadības kontrolieris, kas uztver volumetrisko datu plūsmu, vada *DLP* projekcijas sistēmu, vada un sinhronizē pārējās elektroniskās plates un moduļus;
- daudzplakņu ekrāna vadības plate – veic sinhronu šķidro kristālu optisko slēdžu vadību ar speciālu sprieguma formu;
- gaismas avotu vadības plate – cietvielu gaismas avotu *LED* vadības plate, kas īsteno nepieciešamo uzstādīto modulācijas metodi.

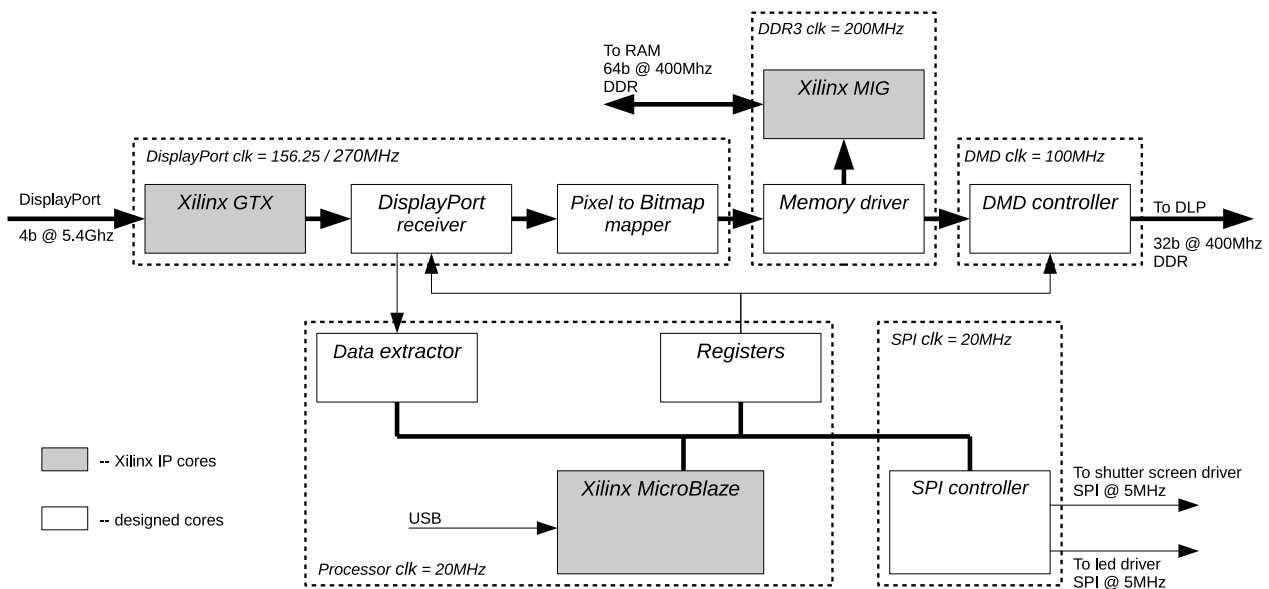
Disertācijā pamatā ir iztīrta kontroliera elementa funkcionalitātes izveidošana un šī elementa galvenās sastāvdaļas ir:

- volumetrisko datu plūsmas ceļš (kritiskā signāla ceļš, *critical signal path*) – ietver *DisplayPort* datu saņēmēju, volumetriskā attēla pārkārtošanu, buferēšanu un izvadi uz projekcijas sistēmu;
- vadības un sinhronizācijas datu padošana uz daudzplakņu ekrāna vadības plati un gaismas avotu vadības plati;
- sistēmas vadība – kopējās vizualizācijas sistēmas vadība tiek veikta kontroles elementā, izmantojot *FPGA* iegulto procesora sistēmu *MicroBlaze*.

Kontroliera elementa *FPGA* iekšējā arhitektūra ir parādīta 6.7. attēlā. Arhitektūra sastāv no autora veidotiem *FPGA* moduļiem un *Xilinx* moduļiem (iekrāsoti pelēkā krāsā). Viss *FPGA* dizains ir sinhrons, papildināts ar speciālu iestatīšanās procedūru. Iegultais procesors (programma rakstīta *C* kodā) ļauj ieslēgt un izslēgt atsevišķus kontroliera arhitektūras elementus.

6.2.1 Kritiskā signāla ceļš

Ar kritiskā signāla ceļu apzīmē volumetrisko datu plūsmu, kura ir jāpārvada no uztvērēja daļas uz attēlu buferi (izveidots ārējā *DDR3 RAM*) un no tā līdz projekcijas sistēmai. Kritiskā signāla ceļa izveidošanai ir nepieciešams manipulēt ar bināri platiem signāliem (līdz 256 b) un augstu takts frekvenci ($f_{\max} = 270$ MHz). *DisplayPort* datu saņemšanā kritiskā signāla ceļš strādā ar 17,28 Gbps, *DLP* ielādes laikā – ar 25,6 Gbps. Kritiskā signāla ceļā ir šādi frekvenču apgabali un atbilstošie elementi:



6.7. att. Kontroliera elementa *FPGA* arhitektūra ar atzīmētiem takts signālu frekvenču apgabaliem.

- *DisplayPort* apgabals – *DisplayPort* datu uztvērējs (*Xilinx GTX* raiduztvērēji), *DisplayPort* datu dekodērs (*DisplayPort receiver*) un datu pārveidotājs no pikseļu uz bināro kadru veidu;
- *DDR3* apgabals – *DDR3* atmiņas kontrolieris;
- *DMD* kontroliera apgabals – *DMD* kontrolieris.

Takts frekvenču apgabala šķērsošana noris vairākās vietās, kā redzams iepriekšminētajā attēlā. Kritiskā signāla ceļš šķērso apgabalus, izmantojot *Xilinx Block RAM* bāzētus asinhronos FIFO buferus. Vadības, sinhronizācijas un informatīvie signāli šķērso apgabalus, izmantojot viens-divi reģistru slēgumu [65].

Xilinx GTX raiduztvērēji ir uzstādīti kā *DisplayPort* fiziskais slānis (četri raiduztvērēji, katrs strādā ar ātrumu 3,125 Gbit/s vai 5,4 Gbit/s). Kopējais četrus raiduztvērēju izejas datu signāla platums ir 64 biti, kas tiek padots tālāk uz *DisplayPort* datu dekodēru.

DisplayPort datu dekodērs un pārveidotājs (no pikseļiem uz binārajiem kadriem) veic šādas funkcijas:

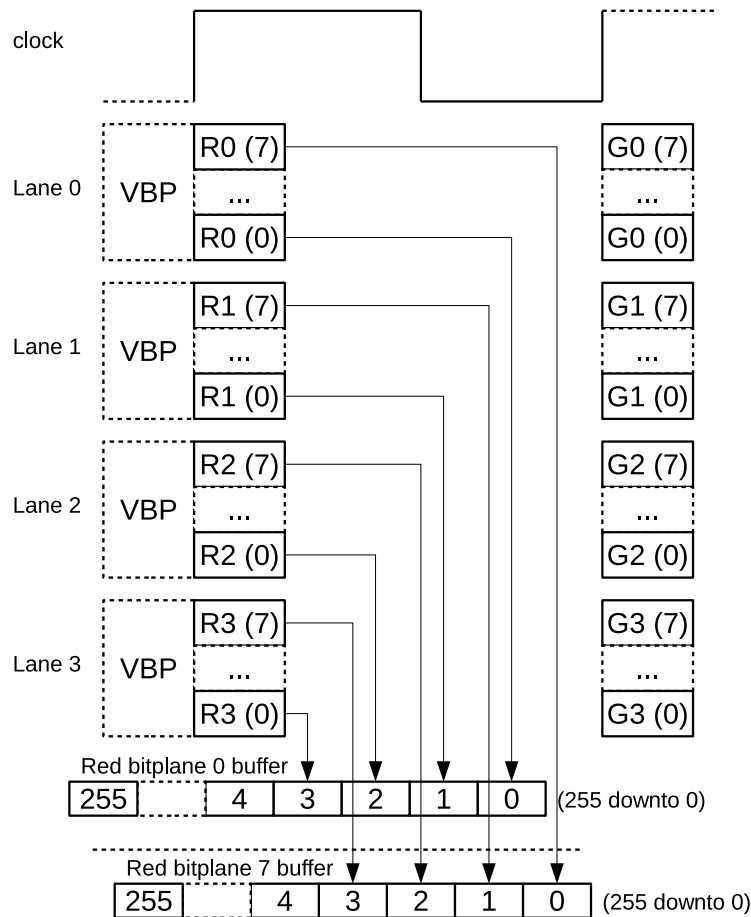
1. Atdala datu paketes (attēla rindas, *HBP*, *VBP*), un atkodē attēlu raksturojošos parametrus no *VBP* datu paketes – izšķirtspēju, tekošo dziļuma plakni, kopējo dziļumu skaitu, krāsu dziļumu.
2. Pārvērš no *DisplayPort* ienākošos pikseļu formas datus uz bināriem kadriem, izmantojot trīs pakāpju buferus un konveijera reģistrus. Šī funkcija ir parādīta 6.8. attēlā un redzams, ka pirmie četri pikseļi tiek sadalīti pa bitiem un katrs pikseļa bits tiek saglabāts atsevišķā reģistrā.
3. No pikseļu formas uz bināro kadru pārveidotajiem volumetriskajiem attēla datiem tiek piekārtota *DDR3* RAM atmiņas adrese atkarībā no tekošās attēla rindas un dziļuma.

6.2.2 Digital Light Processing saskarnes kontrolieris

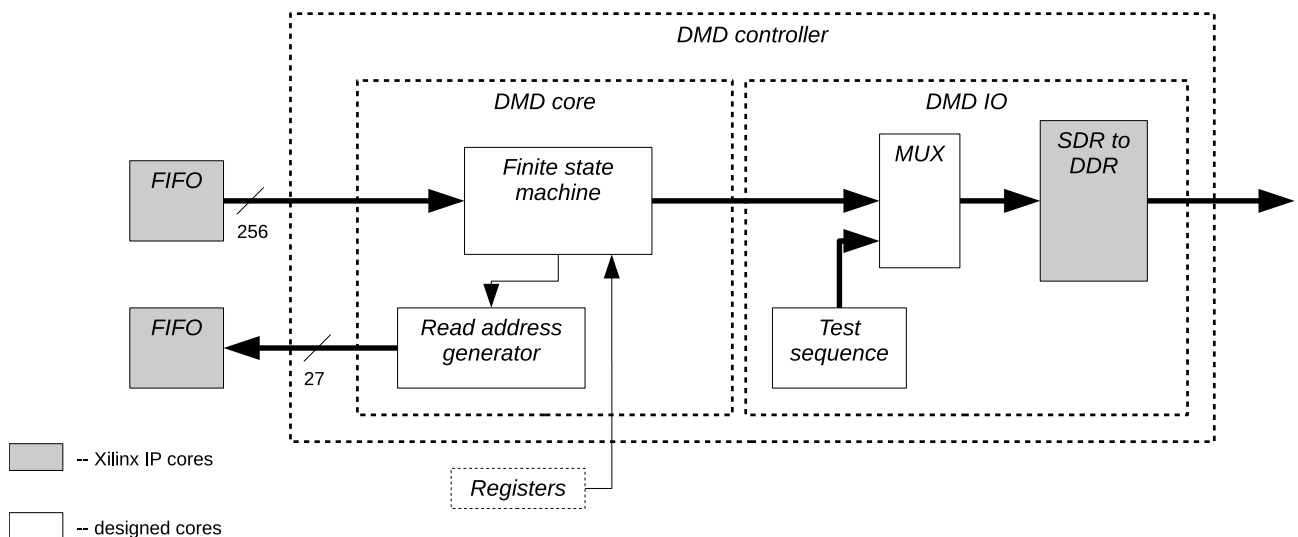
Izvēlēta telpiskā gaismas modulatora *DLP7000* mikroshēmojums (*chipset*) tiek vadīts caur *DLPC410* integrēto shēmu, kura atbalsta 32 b platu datu līniju un 400 MHz *DDR* takts signālu, kopā 25,6 Gbps datu joslu. Šī ciparu datu saskarne tiek īstenota ar kontroliera arhitektūras elementu *DMD Controller*. Šī moduļa iekšējā arhitektūra ir parādīta 6.9. attēlā un sastāv no galīgo stāvokļu automāta (*finite state machine*), volumetrisko kadru bufera lasīšanas adreses ģeneratora un *DLPC410* testa datu sekvences ģeneratora.

DMD Controller īsteno šādu algoritmu:

1. Gaidīšanas stāvoklī gaida sākšanas komandu no iegultā procesora.
2. Pēc komandas saņemšanas tiek nolāsti šī moduļa vadības un kontroles reģistri (izvēlēta modulācijas metode, datu ielādes variants, krāsu dziļums, krāsu skaits) un tiek palaists kadru bufera lasīšanas adreses ģenerators.



6.8. att. Pikseļa formas datu pārveidošana uz bināriem kadriem.



6.9. att. DMD Controller elementa iekšējā arhitektūra.

3. Balstoties uz izvēlēto modulācijas metodi, DMD Controller vajadzīgajos momentos nolasa sagatavotos volumetriskos binārā kadra datus no FIFO un ielādē tos DLP. Atbilstošajos momentos tiek padotas iestatīšanas (reset) komandas uz DLP, kā arī tiek padoti sinhronizācijas impulsi uz daudzplakņu ekrāna vadības plati un cietvielu gaismas avota plati.

DMD Controller modulis atbalsta un spēj vadīt DLP projekcijas sistēmu līdz 77 volumetriskajiem kadriem sekundē, kam atbilstošais 2D kadru atjaunošanas biežums būtu $20 \cdot 77 = 1540$ Hz.

6.2.3 Vizualizācijas sistēmas kontroliera vadība

Vizualizācijas sistēmas kontroliera vadība ir īstenota, izmantojot *Xilinx MicroBlaze MCS* iegulto procesoru. Tas spēj iestatīt un ieslēgt/izslēgt pārējos kontroliera moduļus, iestatīt darbības parametrus un veikt dažādas specifiskas funkcijas (piemēram, uzzīmēt pirmā dziļuma slāņa grafisku izvēlni, attēlot noklusētu volumetrisko attēlu, ja datu pārraide nav aktīva, īstenojot noteiktas secības moduļu palaišanas un apstādināšanas procedūras).

Sistēmas vadības parametru vērtību nolasīšana un ierakstīšana, kā arī funkciju izsaukšana ir iespējama attālināti, izmantojot USB–UART savienojumu. Uz tā pamata ir izveidota grafiskā lietotne, kas ļauj aplūkot vizualizācijas sistēmas statusu (temperatūra, izvēlēta modulācijas metode) reālā laikā un pielāgot parametru vērtības.

6.3 Demonstrācijas iekārta

Izveidotais un saražotais eksperimentālās iekārtas prototips (tehnoloģijas demonstrators) ir attēlots 6.10. attēlā – vizualizācijas iekārta ir ievietota 19" 4U izmēra speciālā transportēšanas kastē kopā ar datu avota darba staciju, kas nodrošina volumetriskos datus.

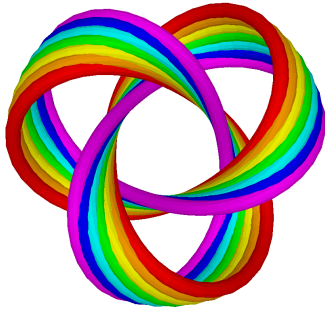


6.10. att. Demonstrācijas iekārta, attēls no SIA *Lightspace Technologies*.

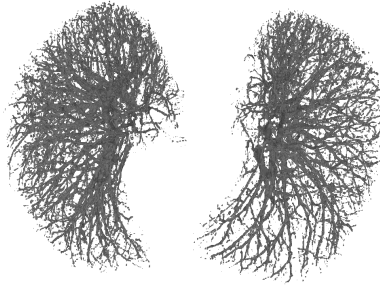
6.4 Vizualizācijas sistēmas darbības parametru novērtējuma tests

Parametru novērtējuma tests tika veikts, lai pārbaudītu matemātiskā modeļa analīzēs rezultātus. Tests tika veikts atbilstoši *ITU Radiocommunication Sector (ITU-R)* rekomendācijai *BT.500-13* [66] – attēla kvalitātes subjektīvās novērtēšanas metodoloģijas. Konkrētā novērtēšanas metode tika izvēlēta no šīs rekomendācijas 10. lpp esošās tabulas ”*Selection of test methods*”, vadoties pēc tā, ka volumetriskās vizualizācijas sistēmas vērtēšanai nav izmantojams cits paraugs (*reference*). Šādā gadījumā ITU-R rekomendē lietot metodes, kas aprakstītas *BT.1082-1* [67] atskaitē, un tika izvēlēta pāru salīdzināšanas metode (*pairwise comparison*).

Testa procedūru veica 25 reāli lietotāji (17 vīrieši, 8 sievietes, eksperti un parasti lietotāji), ar normālu vai koriģētu redzi. *BT.500-13* ir norādīts, ka minimālajam subjektu skaitam būtu jābūt vismaz 15.



(a) Sintezēts un krāsains mezgls.



(b) Plaušu asinsvadu tīkls.



(c) Galvaskauss.

6.11. att. Testā izmantoto volumetrisko attēlu 2D projekcijas.

6.4.1 Metode

Pāru salīdzināšanas metode (aprakstīta *BT.1082-1* atskaitē) paredz, ka subjektam tiek parādīti testa attēlu pāri. Subjekts salīdzina abus pāru attēlus un viennozīmīgi izvēlās vienu no attēliem, atbildot uz iepriekš izvirzītu jautājumu vai kritēriju. Šajā gadījumā tika izmantots jautājums "Kurš attēls ir telpiskāks?" un vērtēts sistēmas modeļa izejas parametrs – 3D kvalitātes novērtējums. Viena parametra analīzei tika sagatavoti vairāki viena testa attēla varianti (katrā variantā analizējamais parametrs ir ar citu vērtību) un subjektam ir jāapskata visu testa attēla variantu savstarpējās pāru kombinācijas. Katra pāra uzvarētājs (izvēlētais attēla variants) tiek piefiksēts rezultātu tabulā jeb frekvenču matricā M . Matricas izmērs ir $t \times t$, kur t ir testa attēla variantu skaits. Pie t variantu skaita subjektam ir jāapskata $N = \frac{t(t-1)}{2}$ attēla variantu pāri.

Frekvenču matricas analīzei ir lietots *Bradley-Terry (BTS)* modelis. Izmantotais *Matlab* kods *BTS* reitinga aprēķināšanai ir balstīts uz *Masaoka K., et al [57]*.

6.4.2 Testa stimulu sagatavošana

Testā tika izmantoti trīs dažādi volumetriskie attēli: sintezēts un krāsains mezgls (6.11a. attēls), plaušu asinsvadu tīkls (6.11b. attēls) un galvaskauss (6.11c. attēls).

Testā tika pārbaudīta trīs dažādu ieejas parametru ietekme uz 3D uztveres vērtējumu un katram parametram tika veikts tests ar minētajiem trijiem volumetriskajiem attēliem. Pārbaudītie parametri:

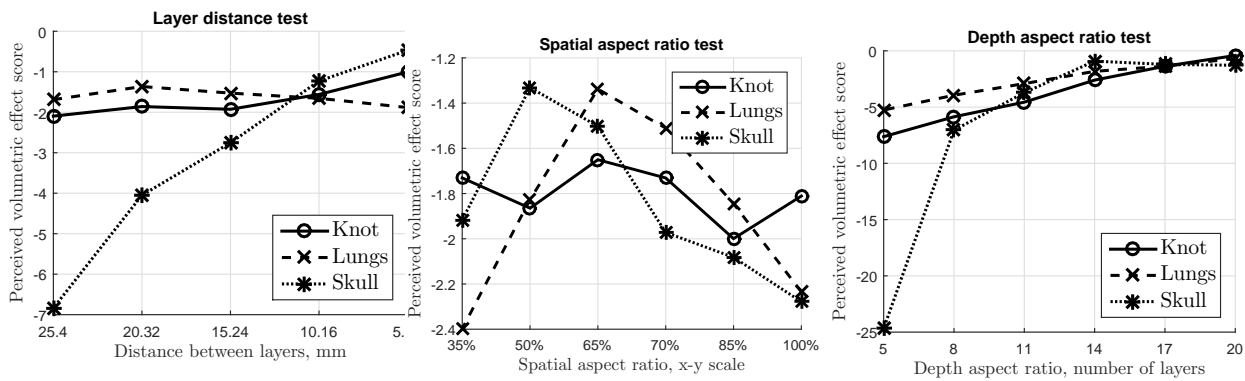
1. Attālums starp dziļuma slāņiem (d_{layers}) – novērtēt daudzplakņu ekrāna starpslāņu attāluma ietekmi. Testa attēlu varianti tika sagatavoti, katru n -to slāni padarot caurspīdīgu.
2. Telpiskā malu attiecība (N_w, N_h) – novērtēt redzamā attēla izmēra ietekmi. Testa attēlu varianti tika sagatavoti, mainot volumetriskā attēla x y izmēru attiecībā pret z asi (tās izmērs paliek nemainīgs).
3. Dziļuma plakņu skaits (N_{layers}) – novērtēt redzamā attēla dziļuma attiecības ietekmi. Testa attēlu varianti tika sagatavoti, mainot kopējo aktīvo dziļumu skaitu, padarot tālākos caurspīdīgus.

Visi volumetrisko attēlu varianti tika sagatavoti iepriekš, un testa subjektiem tika rādīti volumetriskā attēla variantu pāri konkrētajam testējamajam parametram. Volumetriskajiem attēliem nekāda cita papildus apstrāde vai manipulācijas (rotācijas, bīdīšanas) netika veiktas.

6.4.3 Rezultāti un to analīze

6.4.3.1 Attālums starp dziļuma slāņiem

6.12a. attēlā ir redzams *BTS* reitings katram sagatavotajam attēla variantam, mainot šo ieejas parametru. Redzams, ka mezgls un plaušas uzrāda konstantu vērtējumu no -1 līdz -2 visos variantos, taču galvaskausa variantu reitings ir lineāri pieaugošs (rezultāts pieaug, ja attālums starp dziļuma slāņiem samazinās). Šī ieejas parametra tests parāda, ka rezultāti ir atkarīgi ne tikai no parametra, bet arī no konkrētā redzamā volumetriskā attēla. Lietotājiem bija viegli interpretēt galvaskausa attēlu un mainīgā dziļuma slāņu attāluma radītos 3D uztveres kropļojumus.



(a) Attālums starp dziļuma slāņiem.

(b) Telpiskā malu attiecība.

(c) Dziļuma plakņu skaits.

6.12. att. *Bradley-Terry score* reitings trijiem ieejas parametru testiem un trijiem volumetriskajiem attēliem, parādot subjektīvo 3D uztveres novērtējumu.

6.4.3.2 Telpiskā malu attiecība

6.12b. attēlā ir redzams *BTS* reitings katram sagatavotajam attēla variantam, mainot šo ieejas parametru. Reitings rāda, ka variantu klāstā ir lokālais optimums, taču konkrētais optimālais variants ir atkarīgs no volumetriskā attēla. Izņēmums ir sintezētā mezgla attēls, kura reitings neuzrāda izteiktu optimumu. Plaušām optimālais variants ir pie 65 % x y un z attiecības, galvaskausam pie 50 %. Tas parāda, ka testa subjektiem volumetriskais attēls ar minēto malu attiecību likās vislabākais (atbilstošākais sagaidītajam).

Šī parametra testa laikā vairāki subjekti izrādīja grūtības viennozīmīgi izvēlēties vienu no pāra.

6.4.3.3 Dziļuma plakņu skaits

6.12c. attēls parāda šī parametra testa rezultātus un redzams, ka visiem volumetriskajiem attēliem reitings forma ir līdzīga. Galvaskausam uzrāda logaritmisku reitings funkcijas formu pirmajos variantos (5 līdz 8 dziļuma slāņi) ar tam sekojošu lineāru periodu starp 14 un 20 dziļuma slāņiem. Mezgls un plaušas uzrāda līdzīgu lineāri augošu funkcijas formu šajā periodā.

6.5 Nodaļas pārskats

Lietotāju veiktais 3D kvalitātes tests parāda, ka uztveri ietekmē ne tikai konkrētais ieejas parametrs, bet arī pats volumetriskais attēls. Piemēram, ja lietotājs pazīst attēloto objektu, tad viņam ir vieglāk novērtēt 3D uztveres kvalitāti un salīdzināt attēlus ar atšķirīgiem ieejas parametra variantiem.

Telpiskās malu attiecības un dziļuma plakņu skaita testus varētu apvienot (telpiskās malu attiecības testa varianti volumetrisko objektu izstiep dzīlumā, līdzīgi kā plakņu skaita tests saspiež) un iespējams, ka 3D uztveres kvalitātes rezultātos parādītos optimālais punkts. Lietotāju testa laikā izrādītās emocijas liecina, ka optimālais uztveres punkts ir tad, kad objekts sakrīt ar to, kā tas reāli dzīvē izskatās. Šis rezultāts visvairāk bija jūtams testos ar galvaskausu un plaušām.

Dziļuma plakņu skaita tests parāda, ka objektiem, kuri dzīvē ir zināmi, slāņu skaitam un 3D uztveres kvalitātei ir logaritmiska sakarība, taču objektiem, kuri ir mākslīgi sintezēti, parādās lineāra sakarība. Tādā veidā daļēji tiek apstiprināta 4. nodaļā izvirzītā teorija, ka 3D kvalitātes uztvere ir logaritmiski saistīta ar dziļuma plakņu skaitu.

Iespējams, ka situācijās, kad attēlojamais volumetriskais objekts ir skenētu datu rekonstrukcija (piemēram, ultrasonogrāfija), lietotāji vispirms būtu jāapmāca volumetrisko displeja tehnoloģiju lietošanā, līdzīgi kā tiek apmācīti pareizi interpretēt 2D displeja tehnoloģijā attēlotos datus.

Secinājumi

Līdz šim daudzplakņu volumetriskā vizualizācijas tehnoloģija tika attīstīta, lietojot mēģinājumu un eksperimentu metodi (*trial and error*) un veidojot tehnoloģijas demonstrācijas prototipus. Šajā darbā aplūkotās matemātiskās sakarības un modelis ļauj veikt padziļinātu tehnoloģijas darbības analīzi, kā arī veikt parciālās optimizācijas uzdevuma risināšanu kādam no izejas parametriem, pārējos turot noteiktās robežās.

Tehnoloģijas analīze parāda, ka ir nepieciešama gaismas modulācijas metode, kas spēj nodrošināt augstu spožumu un noteiktu krāsu dziļumu pie kāda minimālā kadru atjaunošanās biežuma. Ar telpisko gaismas modulatoru parasti lietotā binārā impulsa platuma modulācija nenodrošina minimālo kadru atjaunošanas biežumu pie $1024 \times 768 \times 20$ izšķirtspējas un 8 b pamatkrāsu dziļuma. Otra zināmā metode – gaismas avota intensitātes modulācijas metode – nenodrošina pietiekoši augstu spožumu. Pētījumu gaitā izveidotā jaunā modulācijas metode piedāvā kompromisu starp abām pārējām metodēm, nodrošinot augstāku spožumu nekā *LSIM*. Darbā apskatīta šīs jauktās modulācijas metodes izmantošana daudzplakņu volumetriskai tehnoloģijai, taču tā var tikt lietota arī citiem mērķiem, kur nepieciešama augsta ātruma gaismas modulācija.

Tehnoloģijas izveidošana reālā, eksperimentālā iekārtā ir izaicinājums, jo nepieciešams apvienot vienā kontrolierī gan telpiskā gaismas modulatora vadību, gan volumetrisko datu pārraides kanāla uztvērēju. *FPGA* integrētajā shēmā salīdzinoši īsā laikā var izveidot šādus algoritmus un veikt to verifikāciju un prototipēšanu reālā iekārtā. Eksperimentālajā iekārtā ir veiksmīgi izveidots volumetrisko datu pārraides kanāls, kas pietrūkst daudzu citu volumetrisko tehnoloģiju demonstrētajos prototipos.

Ar izstrādāto un izveidoto eksperimentālo iekārtu var veikt dažādus testus un pārbaudes, lai apstiprinātu sistēmas modeļa analīzē izvirzītās idejas un teorijas. Ar reāliem iekārtas lietotājiem tika veikts novērtēšanas tests, kas ļāva saņemt lietotāju atsauksmes par darbības parametriem (vokseļu blīvumu un dziļuma plakņu skaitu). Rezultāti parāda, ka eksistē logaritmiskas formas sakarība starp 3D kvalitātes uztveri un dziļuma plakņu skaitu un pie 1024×768 izšķirtspējas ($400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ fiziskā izmēra), 17 līdz 20 dziļuma plaknes nodrošina augstu 3D kvalitātes uztveri. Testa rezultāti arī parāda, ka lietotāji deva priekšroku volumetriskajam attēlam, kura proporcijas ir vislīdzīgākās tādām pašām reālam objektam.

Kopumā disertācija parāda šī brīža nozares situāciju, veikto pētījumu un izveidošanas aktualitāti, volumetriskās sistēmas ieejas un izejas parametrus un to matemātiskās sakarības, kas veido sistēmas modeli. Izveidotā daudzplakņu volumetriskās vizualizācijas tehnoloģijas demonstrācijas iekārta tiek izmantota, lai pārbaudītu konkrētu lietojumu iespējas un ieliktu pamatu jau uzlabotas un lietojumam pielāgotas iekārtas projektēšanai.

Literatūra

- [1] Geng J. Three-dimensional display technologies. In *Adv. Opt. Photon.* 2013. vol. 5, no. 4, pp. 456–535.
- [2] Zhao Y., Wei Y., Cui X., Qu L., Liu L., and Wang Y. 3D display technology in medical imaging field. In *Medical Imaging Physics and Engineering (ICMIPE)*, 2013 IEEE International Conference on. pp. 210–214.
- [3] Lu L., Chen C., and Cheng W. Medical image visualization using true 3D display technology. In *Complex Medical Engineering, 2007. CME 2007. IEEE/ICME International Conference on*. pp. 914–918.
- [4] Shen R., Boulanger P., and Noga M. MedVis: A Real-Time Immersive Visualization Environment for the Exploration of Medical Volumetric Data. In *BioMedical Visualization, 2008. MEDIVIS '08. Fifth International Conference*. pp. 63–68.
- [5] <http://www.philips.com/newscenter>. Philips and RealView Imaging conclude world's first study to evaluate live 3D holographic imaging in interventional cardiology. Bloom-Baglin, R., Klink, S., Kaufman, A.
- [6] marketsandmarkets.com. Volumetric Display Market by Component (Projector, Motor & Position Sensor), Technology (DLP and LCOS), Display Type (Swept and Static), Application (Medical, Aerospace & Defense and Oil & Gas), Geography - Global Trend & Forecast to 2015 - 2020. Report Code: SE 3541, June 2015.
- [7] Osmanis I., Osmanis K., and Valters G. Multi-planar volumetric real time three-dimensional display and method of operation. September, 2015. Patent application number PCT/IB2015/057484.
- [8] Osmanis K. Optimum driving conditions study for Digital Micromirror Devices. In *Electronics Conference (BEC), 2012 13th Biennial Baltic*. pp. 61–64.
- [9] Osmanis K., Valters G., and Osmanis I. Development of digital uncompressed 3D image transfer using DisplayPort 1.2 video standard for volumetric 3D imaging applications. In *3D Imaging (IC3D), 2012 International Conference on*. pp. 1–5.
- [10] Osmanis K., Valters G., and Osmanis I. 3D volumetric display design challenges. In *NORCHIP, 2013*. pp. 1–4.
- [11] Osmanis K., Valters G., and Osmanis I. Light budget study for a multiplanar volumetric 3D display. In *3D Imaging (IC3D), 2013 International Conference on*. pp. 1–5.
- [12] Osmanis K., Valters G., and Osmanis I. 3D Volumetric Display Concept. In *electronic displays 2014*. pp. 1–5.
- [13] Osmanis K., Valters G., Osmanis I., and Misans P. PCIe and DisplayPort Based High Speed Volumetric 3D Video Output Card Implementation in FPGA. In *Electronics Conference (BEC), 2014 14th Biennial Baltic*. pp. 1–4.
- [14] Osmanis K. and Osmanis I. Real-Time Volumetric 3D Imaging Technology. In *Biophotonics*. April, 2016. vol. 23, pp. 30–33.
- [15] Langhans K., Bahr D., Bezcny D., Homann D., Oltmann K., Oltmann K., Guill C., Rieper E., and Ardey G. FELIX 3D display: an interactive tool for volumetric imaging. 2002.
- [16] Gong X., Kirk M., Napoli J., Stutsman S., Zusag T., Khelashvili G., and Chu J. Application of a 3D volumetric display for radiation therapy treatment planning I: quality assurance procedures. In *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2009. vol. 10, no. 3.
- [17] Favalora G. Volumetric 3D Displays and Application Infrastructure. In *Computer*. 2005. vol. 38, no. 8, pp. 37–44.
- [18] Holliman N., Dodgson N., Favalora G., and Pockett L. Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis. In *Broadcasting, IEEE Transactions on*. 2011. vol. 57, no. 2, pp. 362–371.

- [19] Hong J., Kim Y., Choi H.J., Hahn J., Park J.H., Kim H., Min S.W., Chen N., and Lee B. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues. In *Appl. Opt.* 2011. vol. 50, no. 34, pp. H87–H115.
- [20] <https://www.toshiba.co.jp/worldwide/about/company/healthcare.html>. Toshiba. Healthcare Systems & Services Group. Hyper Viewer, a glasses-free 3D medical display.
- [21] <http://www.tmvse.com/Products-and-Services/Voxar-3D-Workstation/>. Toshiba. Voxar 3D Workstation.
- [22] <http://www.3dicon.net/>. 3DIcon. Tomorrow's Innovation Today. Patented glass-free 360 3D display technology.
- [23] <http://www.realviewimaging.com/>. Realview - Interactive live Holography for Medical Imaging Applications.
- [24] <http://www.holografika.com/>. Holographic display technology.
- [25] <http://burton-jp.com/en/product.htm>. Burton Inc. True 3D Display Aerial Burton.
- [26] <https://angel.co/voxon/>. Voxon Voxiebox – World's First 3D holographic PC.
- [27] <http://www.holoxica.com/>. Holoxica – holographic 3D visualization technologies.
- [28] <http://www.zebraimaging.com/>. Zebra Imaging – 3D holographic prints and displays.
- [29] <https://www.leia3d.com/>. LEIA 3D – deliver holographic experiences.
- [30] <http://www.technologyreview.com/news/539836/a-3-d-display-for-your-car/>. Metz Rachel, July 30, 2015. A 3-D Display for Your Car. MIT Technology Review.
- [31] American Association of Physicist in Medicine. Assessment of Display Performance for Medical Imaging Systems. One Physics Ellipse. Year 20015. College Park, MD 20740-3846, https://www.aapm.org/pubs/reports/OR_03.pdf.
- [32] Carrein G. 10 reasons to use a medical display system. White paper. BARCO, 2006. http://www.barco.com/barcview/downloads/10_reasons_to_use_a_medical_display_system.pdf.
- [33] Haidekker M. *Advanced Biomedical Image Analysis*. Wiley, 1st ed. 2010.
- [34] Braspenning R., Brouwer E., and de Haan G. Visual quality assessment of lenticular based 3D-displays. In *Signal Processing Conference, 2005 13th European*. pp. 1–4.
- [35] Osmanis K. Philips Research hosts Lightspace 3D volumetric display. Meeting report. Unpublished. July 3rd, 2015.
- [36] Osmanis K. GE Vingmed hosts Lightspace 3D volumetric display. Meeting report. Unpublished. August July 5th, 2015.
- [37] Armitage D. *Introduction to Microdisplays*. Wiley, 1st ed. 2006.
- [38] Bleha W.P. D-ILA Projector Technology: The Path to High Resolution Projection Displays. JVC North America R&D Center. <https://www.rose-hulman.edu/~ahmed/D-ILA2.pdf>.
- [39] Texas Instruments. DLP7000 DLP 0.7 XGA 2X LVD Type A DMD. DLPS026C. Rev. C. 2015.
- [40] Texas Instruments. DLP System Optics. Application Report DLPA022, July 2010. <http://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf>.
- [41] Hornbeck L.J. Digital Light Processing TM for high brightness, high-resolution applications. In *Proc. SPIE, Projection Displays III*. pp. 27–40.
- [42] Zollers M. Using Software to Validate Assumptions in Projector Design. In *Photonics Spectra*. 2007. vol. 41, no. 12.
- [43] Gegenfurtner K.R. *Color Vision: From Genes to Perception*. Cambridge University Press, CA. 2001.
- [44] Taylor A.E.F. *Illumination Fundamentals*. Lightning Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180 USA. 2000.
- [45] Hornbeck L.J. *Projection displays and MEMS: timely convergence for a bright future*. 1995.

- [46] Cirstaldi D., Pennisi S., and Pulvirenti F. *Liquid Crystal Display Drivers*. Springer Netherlands, 1st ed. 2009.
- [47] Brennesholtz M.S. and Stupp E.H. *Projection Displays*. Wiley Publishing, 2nd ed. 2008.
- [48] Dudley D., Duncan W., and Slaughter J. *Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications – DLP Products New Applications*. Texas Instruments Inc., Post Office Box 869305, Plano, Texas 75265.
- [49] Urbanus P. and Sampsell J. *DMD architecture and timing for use in a pulse width modulated display system*. 1994. US Patent 5,278,652.
- [50] McKnight D. *Method and apparatus for displaying grey-scale or color images from binary images*. 1998. US Patent 5,767,828.
- [51] <http://ieeexplore.ieee.org>. IEEE Xplore, Digital Library.
- [52] Thorlabs. *Optical Shutter Specification*. http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=927.
- [53] Texas Instruments. *DLP Products & Memos, Advanced Light Control*. <http://www.ti.com/llds/ti/dlp/advanced-light-control/products.page>.
- [54] Marshall K.L., Haddock J., Bickel N., Singel D., and Jacobs S.D. *Angular-scattering characteristics of ferroelectric liquid-crystal electro-optical devices operating in the transient-scattering and the extended-scattering modes*. In *Appl. Opt.* 1999. vol. 38, no. 8, pp. 1287–1294.
- [55] Park G., Aum T.S., Kwon J.H., Park J.H., Kim B.K., and Shin J.K. *Characterization and Modeling Light Scattering in Diffuser Sheets*. In *Journal of the Korean Physical Society*. 2009. vol. 54, no. 1, pp. 44–48.
- [56] Tsushima Y Komine K S.Y.H.N. *Higher resolution stimulus facilitates depth perception: MT+ plays a significant role in monocular depth perception*. In *Scientific Reports*. 2014. vol. 4, pp. 1–5.
- [57] Masaoka K., Nishida Y., Sugawara M., Nakasu E., and Nojiri Y. *Sensation of Realness From High-Resolution Images of Real Objects*. In *Broadcasting, IEEE Transactions on*. 2013. vol. 59, no. 1, pp. 72–83.
- [58] Nur G., Dogan S., Arachchi H., and Kondo A. *Impact of depth map spatial resolution on 3D video quality and depth perception*. In *3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, 2010. pp. 1–4.
- [59] Sullivan A. *Multi-planar volumetric display system and method of operation using three-dimensional anti-aliasing*. 2002. US Patent 6,377,229.
- [60] Xilinx. *LogiCORE IP Virtex-6 FPGA Integrated Block v2.5 for PCI Express, DS800*. 2012.
- [61] A. K. *DisplayPort Ver.1.2 Overview*. DisplayPort Developer Conference, Westin Taipei. 2010.
- [62] VESA. *VESA DisplayPort Standard, Version 1, revision 1a*. Video Electronics Standards Association, 860 Hillview Court, Suite 150, Milpitas, CA 95035.
- [63] Xilinx. *ML605 Hardware User Guide, UG534 (v1.6)*. 2011.
- [64] Xilinx. *FMX XM104 Connectivity Card User Guide, UG536 (v1.1)*. 2010.
- [65] Stavinov E. *100 Power Tips For FPGA Designers*. CreateSpace, Paramount, CA. 2011.
- [66] ITU-R. *Recommendation BT.500-13. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*. January, 2012.
- [67] ITU-R. *Report BT.1082-1. Studies toward the unification of picture assessment methodology*. 1990.