

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Dragomir M. El Mezeni

**LOKALNI OPERATOR ZA
REPRODUKCIJU SLIKA ŠIROKOG
DINAMIČKOG OPSEGA UZ OČUVANJE
DETALJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Dragomir M. El Mezeni

**LOCAL TONE MAPPING OPERATOR
FOR DETAIL PRESERVING
REPRODUCTION OF HIGH DYNAMIC
RANGE IMAGES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Mentor:

dr Lazar Saranovac, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Milan Prokin, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Miodrag Popović, redovni profesor u penziji,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Marko Barjaktarović, docent,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Jelena Popović-Božović, docent,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: _____

supruzi Jasni
roditeljima i baki

ZAHVALNICA

Najpre bih hteo da se zahvalim kolegama iz odeljenja Intela u Beogradu sa kojima sam radio tokom niza godina na problemima vezanim za razvoj i implementaciju različitih algoritama digitalne obrade slike na mobilnim uređajima. Tokom rada na ovim projektima rodila se i ideja lokalnog operatora za redukciju dinamičkog opsega koji je predmet ove disertacije. Posebnu zahvalnost dugujem Nemanji Toniću, Stojanu Rakiću i Aleksandru Šutiću sa kojima sam najviše sarađivao tokom izrade ovog projekta. Njihovi komentari, sugestije i dugačke diskusije koje smo vodili su mi omogućili da značajno unapredim polaznu ideju algoritma. Aleksandru Beriću i Rene De Greef-u dugujem zahvalnost jer su mi omogućili da svoje istraživanje sprovedem u odeljenju Intela u Beogradu. Takođe, želeo bih da se zahvalim svom mentoru prof. dr. Lazaru Saranovcu na podršci i strpljenju tokom dugog perioda izrade ove disertacije kao i kolegama sa katedre za elektroniku.

Najveću zahvalnost ipak dugujem svojoj porodici a pogotovo supruzi Jasni bez čije podrške bi bilo nemoguće prebroditi sve teške periode kojih je bilo na pretek tokom dugog niza godina rada na ovoj disertaciji.

Naslov: LOKALNI OPERATOR ZA REPRODUKCIJU SLIKA ŠIROKOG DINAMIČKOG OPSEGA UZ OČUVANJE DETALJA

Rezime

Opseg osvetljaja koji se javlja u prirodnim scenama uveliko prevazilazi mogućnosti standardnih uređaja za snimanje i reprodukciju slike. Ljudski vizuelni sistem je evoluirao, tako da omogući efikasno funkcionisanje i percepciju detalja u uslovima velike promene osvetljaja. Kako bi se omogućila što realnija reprodukcija slika i video sadržaja, potrebno je obezbediti mogućnost snimanja i reprodukcije što šireg dinamičkog opsega osvetljaja. Razvoj tehnika za snimanje je napredovao i danas postoji mogućnost snimanja celokupnog dinamičkog opsega osvetljaja scene korišćenjem standardnih senzora. Razvoj displeja je međutim napredovao sporije i većina displeja koji su danas u upotrebi ima skroman dinamički opseg osvetljaja. Operator za redukciju dinamičkog opsega predstavlja ključnu komponentu sistema za reprodukciju scena širokog dinamičkog opsega (HDR), na standardnim displejima nižeg dinamičkog opsega (LDR).

Operatori za redukciju dinamičkog opsega HDR slika se mogu podeliti na globalne i lokalne operatore. Globalni operatori su jednostavniji, robusniji i mogu se lakše kontrolisati, ali imaju tendenciju potiskivanja detalja. Lokalni operatori omogućavaju superiorniji kvalitet slike u pogledu reprodukcije detalja, po cenu povećane kompleksnosti i teže kontrole. Takođe, nijedan od analiziranih lokalnih operatora nema mogućnost nezavisnog podešavanja različitih aspekata izlazne slike.

U okviru ove disertacije je predloženo rešenje lokalnog operatora za reprodukciju HDR slika, koje kombinuje dobre osobine lokalnih i globalnih operatora. Operator je projektovan sa ciljem da se predloži robusno i fleksibilno rešenje, koje svoju primenu može naći u različitim uređajima široke namene. Zbog toga je predloženi operator baziran na dekompoziciji na bazni sloj i sloj detalja, pri čemu se redukcija dinamičkog opsega postiže globalnim mapiranjem baznog sloja. Predložen je fleksibilan postupak ove globalne redukcije dinamičkog opsega, kojim se postiže robusnost za najrazličitije tipove ulaznih slika. Takođe, omogućeno je nezavisno podešavanje različitih aspekata izlazne scene poput osvetljaja, oštine, lokalnog kontrasta, odnosa lokalnog i globalnog kontrasta i zasićenosti boja.

Performanse predloženog operatora su testirane na velikoj bazi HDR slika i upoređene sa 7 različitih operatora za redukciju dinamičkog opsega, korišćenjem 9 objektivnih metrika kvaliteta. Testovi su sprovedeni tako, što je za svaku sekvencu, svakom od operatora dodeljivan rang, u zavisnosti od rezultata odgovarajuće metrike. Operatoru koji je postigao najbolje rezultate, dodeljivan je rang 1, dok je operatoru koji je postigao najlošije rezultate, dodeljivan rang 8. Testiranja su pokazala da predloženi operator ima najbolje karakteristike po pitanju kvaliteta izlazne slike. Prosečan rang koji je ostvaren na celoj bazi i po svim metrikama je 2.74, dok prvi naredni operator ima rang 3.96. Kako bi se poboljšale performanse operatora, za scene sa ekstremnim vrednostima osvetljaja, predložena je automatska korekcija parametra osvetljaja. Uvođenjem ove korekcije, robusnost predloženog operatora se značajno poboljšava, tako da je sada ostvareni rang na celoj bazi HDR slika 1.84, dok prvi sledeći operator ima rang 4.15.

Nakon toga je predložena temporalna kontrola, kojom se omogućava primena operatora za reprodukciju HDR videa. Operatori koji se koriste za mapiranje HDR videa, obično se projektuju ili sa ciljem temporalne adaptivnosti ili sa ciljem temporalne koherentnosti. Temporalna adaptivnost podrazumeva da se operator prilagođava trenutnom osvetljaju scene, tako da se u svakom trenutku postigne što bolji prostorni kontrast. Temporalna koherentnost podrazumeva očuvanje poretka osvetljaja između frejmova video sekvence, odnosno očuvanje temporalnog kontrasta, u procesu redukcije dinamičkog opsega. Prostorni i temporalni kontrast se ne mogu postići istovremeno. Predložena kontrola omogućava da se pomoću istog operatora, promenom parametra adaptacije, postigne maksimalni prostorni kontrast, maksimalni temporalni kontrast ili neki odnos između ova dva. Pokazano je da se korišćenjem ovakve temporalne kontrole, predloženi operator može prilagoditi, tako da daje rezultate slične temporalno adaptivnim ili temporalno koherentnim operatorima.

Na kraju je analizirana mogućnost efikasne implementacije velikih filtara osetljivih na ivice, koji predstavljaju najzahtevniji deo predloženog operatora. Analizirane su performanse algoritma brzog vođenog filtra, koji se bazira na izračunavanju većine operacija u decimiranom domenu. Predloženo je unapređenje osnovne formulacije brzog vođenog filtra, pri čemu se kvalitet aproksimacije povećava za 21dB u proseku.

Predložena je hardverska realizacija ovog algoritma, kojom se omogućava procesiranje

video rezolucije 1920×1080 , brzinom od 60 frejmova po sekundi, na FPGA čipu nižeg cenovnog ranga. Postojeće hardverske arhitekture vođenog filtra, koje omogućavaju ovakve performanse, su ASIC tipa. Takođe je pokazano da predloženo rešenje ima manje zauzeće memorijskih resursa i značajno manju potrošnju u odnosu na postojeća hardverska rešenja.

Fleksibilnost operatora koja se ogleda u mogućnosti nezavisne kontrole različitih aspekata izlazne slike i robusnost koja je demonstrirana na velikoj bazi HDR slika, kvalifikuje predloženi operator za upotrebu u različitim proizvodima široke namene. Fleksibilna temporalna kontrola omogućava upotrebu ovog operatora u reprodukciji HDR videa. Pri tom je moguće postići, temporalnu koherentnost ili temporalnu adaptivnost, različitim podešavanjima kontrolnog bloka. Efikasna hardverska arhitektura unapređenog brzog vođenog filtra otvara mogućnost za primenu ovog operatora u namenskim sistemima male potrošnje.

Ključne reči: lokalni operator za reprodukciju hdr slika, operator za reprodukciju hdr videa, temporalna koherentnost, vođeni filter, brzi vođeni filter

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Elektronika

UDK broj: 621.3

Title: LOCAL TONE MAPPING OPERATOR FOR DETAIL PRESERVING REPRODUCTION OF HIGH DYNAMIC RANGE IMAGES

Abstract

Light intensity variations in natural scenes greatly exceed the capabilities of standard imaging and display devices. The human visual system has evolved to deal with these lighting conditions and enable efficient perception of details. In order to enable realistic reproduction of natural images and video, it is necessary to develop techniques and devices for capturing and reproduction of the high dynamic range content. Capturing techniques have evolved and now it is possible to capture entire dynamic range of the scene using standard sensors. The development of displays, however, has progressed more slowly and most of the displays that are used today exhibit modest dynamic range capabilities. Tone mapping operator is a key component that enables reproduction of the high dynamic range (HDR) images on the low dynamic range (LDR) displays.

Tone mapping operators can be divided in two main categories: global and local operators. Global operators are simple, robust, and easier to control, but they tend to suppress details. Local operators, provide superior image quality in terms of detail reproduction, at the cost of increased complexity and more difficult control. Also, none of the analyzed local operators has the ability to independently adjust different aspects of the output image appearance.

In this thesis, we present local tone mapping operator, which combines the good features from both categories. The operator is designed to offer a robust and flexible solution that can be used in wide variety of applications. To enable this, we use decomposition of the input image to the base and detail layers, and reduce dynamic range by applying global tone mapping on the base layer. We propose a flexible method for the dynamic range reduction of the base layer, which achieves robust operation for wide variety of input images. Also, it is possible to independently adjust different aspects of the output image appearance such as brightness, sharpness, local contrast, trade-off between local and global contrast, and saturation of colors.

The performance of the proposed operator has been tested on the large HDR image database and results are compared with 7 different state-of-the-art tone mapping operators using 9 objective image quality metrics. The tests were conducted in such a way that each tone mapping operator was assigned a rank, ranging from 1 to 8, where 1 corresponds to the best performing operator regarding objective quality metric. The tests showed that the proposed tone mapping operator has the best performance regarding image quality. The average ranking achieved across all input images, and all objective metrics of the proposed operator was 2.74 while the second best operator achieved ranking of 3.96. In order to improve operator's performance for the scenes with extreme illumination conditions, automatic correction of the brightness parameter value is proposed. With this correction, the robustness of the proposed operator is significantly improved, and achieved ranking rises to 1.84 while the second best operator achieved ranking of 4.15.

Next, temporal control of the local tone mapping operator is proposed, in order to enable its usage for the HDR video reproduction. Video HDR tone mapping operators are usually designed with the goal of achieving either temporal adaptivity or temporal coherency. Temporal adaptivity means that operator adjusts its parameters in order to achieve maximal spatial contrast. Temporal coherency means that operator tries to preserve brightness relations between different frames in the video sequence, which represents temporal contrast, during the process of tone mapping. This is due to inability to simultaneously achieve both spatial and temporal contrast. Proposed temporal control was designed in such way to enable different tradeoffs between temporal and spatial contrast using the same tone mapping operator. That means that, just by different tuning of control block, proposed operator can achieve temporally adaptive or temporally coherent behavior. This was verified using available HDR video database and several operators that are designed for different target applications.

Finally, different possibilities for the efficient implementations of edge aware filters are analyzed, and the algorithm of fast guided filter was chosen as the best solution. Efficient implementation of the edge-aware filters is essential since it represents the most demanding part of the proposed tone mapping operator. Approximation quality of the fast guided filter is analyzed and improvement of the original algorithm is proposed. This improvement increase approximation quality by 21dB on average.

Improved algorithm was implemented on the low cost FPGA chip and it achieves real time performance of 60fps when processing 1080p video. From the currently available hardware solutions, only those implemented in ASIC were able to provide such high throughput. Proposed hardware architecture also uses less memory and logic resources, and have significantly lower power consumption when compared to the existing solutions.

Flexibility and ease of tuning along with the demonstrated robustness qualifies the proposed operator for the usage in wide variety of applications. Flexible temporal control enables its usage in HDR video applications. Both temporal coherency and temporal adaptivity can be achieved, just by different tuning of the proposed control block. Efficient hardware architecture of the fast guided filter opens the ability to use this operator in the low power embedded solutions.

Keywords: local tone mapping operator, video hdr tone mapping, temporal coherency, guided filter, fast guided filter

Scientific area: Electrical and Computer Engineering

Scientific subarea: Electronics

UDC number: 621.3

SADRŽAJ

1 UVOD	1
1.1 PERCEPCIJA SCENE I DINAMIČKI OPSEG	1
1.2 VIZUELNI SISTEM ČOVEKA	4
1.2.1 Struktura oka	4
1.2.2 Struktura mrežnjače.....	6
1.2.3 Adaptacija na promenu osvetljaja.....	7
1.3 SNIMANJE SLIKA ŠIROKOG DINAMIČKOG OPSEGA.....	12
1.3.1 Modifikacija arhitekture piksela za HDR.....	13
1.3.2 Modifikacija LDR senzora za HDR.....	17
1.3.3 Korišćenje LDR senzora za akviziciju HDR scene.....	23
1.4 REPRODUKCIJA SLIKA ŠIROKOG DINAMIČKOG OPSEGA	36
1.4.1 Standardne tehnologije displeja	36
1.4.2 Tehnologija HDR displeja.....	41
1.4.3 Reprodukcijska HDR sadržaja na LDR displejima	44
2 OPERATORI ZA REPRODUKCIJU HDR SLIKA.....	46
2.1 GLOBALNI OPERATORI	50
2.2 LOKALNI OPERATORI	59
2.2.1 Operatori zasnovani na lokalnom nivou adaptacije	60
2.2.2 Operatori zasnovani na dekompoziciji.....	71
2.2.3 Retineks operatori	75
2.2.4 Gradijentni operatori	77
2.2.5 Operatori zasnovani na modelu percepcije boja.....	79
2.2.6 Ostali operatori	83
2.3 DISKUSIJA.....	85
3 LOKALNI OPERATOR – ELTM.....	87
3.1 OPIS ALGORITMA	87
3.1.1 Dekompozicija	89
3.1.2 Adaptacija dinamičkog opsega u logaritamskom domenu.....	94
3.1.3 Procesiranje detalja	99

3.1.4 Popravka kontrasta u linearnom domenu	103
3.1.5 Kreiranje izlazne slike u boji.....	111
3.2 PODEŠAVANJE IZGLEDA IZLAZNE SLIKE	113
3.3 KOREKCIJA OSVETLJAJA ZA EKSTREMNE SCENE.....	115
3.4 REZULTATI	117
3.4.1 Evaluacija kvaliteta operatora za reprodukciju HDR slika	117
3.4.2 Rezultati poređenje ELTM-a sa postojećim metodama.....	120
4 PRIMENA ELTM-A U VIDEO SEKVENCAMA	130
4.1 PROBLEM REDUKCIJE DINAMIČKOG OPSEGA VIDEO SEKVENCI	130
4.2 POSTOJEĆI OPERATORI ZA REPRODUKCIJU HDR VIDEO.....	133
4.3 TEMPORALNA KONTROLA ELTM OPERATORA.....	136
4.4 REZULTATI	146
5 ANALIZA UBRZANJA I HARDVERSKA REALIZACIJA VOĐENOG FILTRA VELIKIH DIMENZIJA.....	160
5.1 EFIKASNE REALIZACIJE FILTARA OSETLJIVIH NA IVICE.....	162
5.2 OPIS ALGORITMA VOĐENOG FILTRA	170
5.3 OPIS ALGORITMA UNAPREĐENOG BRZOG VOĐENOG FILTRA.....	172
5.4 ANALIZA PERFORMANSI UNAPREĐENOG BRZOG VOĐENOG FILTRA	176
5.4.1 Uticaj veličine filtra na kvalitet aproksimacije	177
5.4.2 Uticaj regularizacionog parametra vođenog filtra na kvalitet aproksimacije	180
5.4.3 Brzina izvršavanja	181
5.5 HARDVERSKA ARHITEKTURA UNAPREĐENOG BRZOG VOĐENOG FILTRA	182
5.5.1 Decimirani boks filteri	184
5.5.2 Interni boks filteri.....	186
5.5.3 Aproksimacija funkcije $x/(x+1)$	188
5.5.4 Interpolacioni modul	190
5.5.5 Memorija za kašnjenje.....	194
5.6 REZULTATI	195
5.6.1 Uticaj interne bitske širine na kvalitet aproksimacije.....	195
5.6.2 Zauzeće memorije.....	197
5.6.3 Protok	201

5.6.4 Zauzeće logičkih resursa i registara	202
5.6.5 Disipacija snage	204
5.7 POREĐENJA I DISKUSIJA	206
6 ZAKLJUČAK	210
LITERATURA	215
7 PRILOZI	229
PRILOG 1 SLIKE KORIŠĆENE PRI TESTIRANJU ELTM-A.....	230

SPISAK TABELA

TABELA 3.1 UTICAJ PARAMETARA ELTM ALGORTIMA NA SVOJSTVA IZLAZNE SLIKE ...	113
TABELA 3.2 POREĐENJE RAZLIČITIH OPERATORA KORIŠĆENJEM FSITM ^B _TMQI METRIKE. ELTM JE BEZ KOREKCIJE OSVETLJAJA.....	122
TABELA 3.3 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA NA OSNOVU FSITM ^B -TMQI METRIKE. ELTM JE BEZ KOREKCIJE OSVETLJAJA.....	124
TABELA 3.4 POREĐENJE RAZLIČITIH OPERATORA KORIŠĆENJEM FSITM ^B -TMQI METRIKE. ELTM JE SA KOREKCIJOM OSVETLJAJA.	124
TABELA 3.5 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA NA OSNOVU FSITM ^B -TMQI METRIKE. ELTM JE SA KOREKCIJOM OSVETLJAJA.	126
TABELA 3.6 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA ZA RAZLIČITE METRIKE KVALITETA. ELTM JE BEZ KOREKCIJE OSVETLJAJA.....	126
TABELA 3.7 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA ZA RAZLIČITE METRIKE KVALITETA. ELTM JE SA KOREKCIJOM OSVETLJAJA.	127
TABELA 3.8 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA USREDNJEN PO RAZLITIM METRIKAMA KVALITETA. ELTM JE BEZ KOREKCIJE OSVETLJAJA.	127
TABELA 3.9 PROSEČAN RANG RAZLIČITIH OPERATORA USREDNJEN PO RAZLITIM METRIKAMA KVALITETA. ELTM JE SA KOREKCIJOM OSVETLJAJA.	127
TABELA 4.1 BRZINA ODZIVA IIR FILTRA ZA SVAKI OD PARAMETARA KOJI SE KONTROLIŠE	143
TABELA 5.1 ZAUZEĆE RESURSA PO KOMPONENTAMA NA CYCLONE V FPGA ČIPU	204
TABELA 5.2 DISIPACIJA SNAGE PO DOMENIMA TAKTA NA CYCLONE V FPGA ČIPU	205
TABELA 5.3 DISIPACIJA SNAGE PO KOMPONENTAMA NA CYCLONE V FPGA ČIPU	205
TABELA 5.4 POREĐENJE POSTOJEĆIH HARDVERSKIH RELIZACIJA VOĐENOG FILTRA	207

SPISAK SLIKA

SLIKA 1.1 SLIKA ŠIROKOG DINAMIČKOG OPSEGA [2].	2
SLIKA 1.2 DINAMIČKI OPSEG VIZUELNOG SISTEMA ČOVEKA I DOSTUPNIH DISPLEJA [1].	3
SLIKA 1.3 STRUKTURA OKA [3].	5
SLIKA 1.4 STRUKTURA MREŽNJACE [3].	6
SLIKA 1.5 OSETLJIVOST ČEPIĆA I ŠTAPIĆA ZA RAZLIČITE NIVOE ADAPTACIJE [2].	9
SLIKA 1.6 ODZIV FOTORECEPTORA NA PROMENU OSVETLJAJA U OKOLINI NIVOA ADAPTACIJE (LEVO) I FAMILIJA ODZIVA FOTORECEPTORA PRILIKOM PROMENE NIVOA ADAPTACIJE (DESNO) [2].	10
SLIKA 1.7 OSETLJIVOST FOTORECEPTORA ZA RAZLIČITE NIVOE ADAPTACIJE [4].	10
SLIKA 1.8 MODIFIKOVANA LOGARITAMSKA I STEPENA PERCEPCIJA SJAJNOSTI [5].	12
SLIKA 1.9 STANDARDNI CMOS SENZOR	14
SLIKA 1.10 SENZOR U VREMENSKOM DOMENU SA VIŠESTRUKIM OČITAVANJEM [7]	15
SLIKA 1.11 SENZOR SA LOGARITAMSKOM KARAKTERISTIKOM I STRUJNIM PROCESIRANJEM [8]	16
SLIKA 1.12 SENZOR SA LOGARITAMSKOM KARAKTERISTIKOM I NAPONSKIM PROCESIRANJEM [9]	17
SLIKA 1.13 SENZOR SA PROSTORNO VARIJABILNOM EKSPOZICIJOM [10]	19
SLIKA 1.14 KOBINOVANJE SVE SENZORA SA BAJEROVIM MOZAIKOM. SLIKA IZ [11].	20
SLIKA 1.15 SVE MOZAIK SA DVE RAZLIČITE EKSPOZICIJE [11]	21
SLIKA 1.16 SENZOR SA ADAPTIVNOM KONTROLOM EKSPOZICIJE [12]	22
SLIKA 1.17 PROBLEM KVANTIZACIJE PRILIKOM SNIMANJA HDR SCENE KORIŠĆENJEM LDR SENZORA [13].	23
SLIKA 1.18 SET OD 16 RAZLIČITO EKSPONIRANIH LDR SLIKA KOJE SU KORIŠĆENE ZA SNIMANJE CELOKUPNOG OSVETLJAJA SCENE [14].	24
SLIKA 1.19 NAJBOLJE EKSPONIRANA LDR SLIKA A), VREDNOSTI OSVETLJAJA SCENE	

DOBIJENE REKONSTRUKCIJOM IZ NIZA LDR SLIKA B), HDR SLIKA MAPIRANA U OPSEG VREDNOSTI LDR MONITORA UZ OČUVANJE DETALJA C) (KORIŠĆEN JE ALGORITAM PREDSTAVLJEN U DISERTACIJI).....	24
SLIKA 1.20 PROBLEM “DUHOVA” KOJI NASTAJE USLED LOKALNOG KRETANJA NA SCENI [16].	28
SLIKA 1.21 PROBLEM OKLUZIJE KOJI NASTAJE USLED LOKALNOG KRETANJA NA SCENI [13].	29
SLIKA 1.22 ESTIMACIJE NELINEARNE FUNCKIJE ODZIVA KAMERE [14]. SLIKE PREUZETE IZ [2].	32
SLIKA 1.23 ESTIMACIJE NELINEARNE FUNCKIJE ODZIVA KAMERE, KORIŠĆENJEM POLINOMIJALNOG MODELA [17]. SLIKE PREUZETE IZ [2].	33
SLIKA 1.24 KORIŠĆENJE KUMULATIVNIH HISTOGRAMA ZA ODREĐIVANJE KARAKTERISTIČNIH TAČAKA [18]. SLIKE PREUZETE IZ [2].	34
SLIKA 1.25 IZVORI ŠUMA PRILIKOM AKVIZICIJE DIGITALNE FOTOGRAFIJE [13].	36
SLIKA 1.26 STRUKTURA PLAZMA DISPLEJA. IZVOR SLIKE WIKIPEDIA.	37
SLIKA 1.27 PRINCIP RADA LCD DISPLEJA [2].	38
SLIKA 1.28 STRUKTURA LED I OLED DISPLEJA. SLIKA PREUZETA SA: WWW.FLATPANELSHD.COM.	40
SLIKA 1.29 LOKALNA KONTROLA POZADINSKOG OSVETLJENJA. SLIKA PREUZETA SA: WWW.BIT-TECH.NET	42
SLIKA 1.30 POSTUPAK DUALNE MODULACIJE HDR DISPLEJA. SLIKA PREUZETA SA: HDR.SIM2.IT.	43
SLIKA 1.31 PROCESIRANJE UNUTAR HDR DISPLEJA SA DUALNOM MODULACIJOM. SLIKA PREUZETA SA: HDR.SIM2.IT.	43
SLIKA 1.32 REŠAVANJE PROBLEMA “RASIPANJA” SVETLOSTI NA OKOLNE PIKSELE. SLIKA PREUZETA SA: HDR.SIM2.IT.	44
SLIKA 2.1 BROJ I VRSTA OBJAVLJENIH OPERATORA ZA REPRODUKCIJU HDR SLIKA U PRETHODNIH 20 GODINA [20].	50

SLIKA 2.2 OPTIMIZACIONI PRISTUP PROBLEMU REDUKCIJE DINAMIČKOG OPSEGA [27]....	56
SLIKA 2.3 PRINCIP RADA BILATERALNOG FILTRA [35].	66
SLIKA 2.4 POREĐENJE PROSTORNE MASKE VOĐENOG I BILATERALNOG FILTRA [40].....	69
SLIKA 2.5 OTPORNOST NA INVERZIJU GRADIJENATA BILATERALNOG I VOĐENOG FILTRA PRILIKOM POJAČANJA DETALJA [40].	70
SLIKA 2.6 POJAVA HALO ARTEFAKATA KOD LOKALNIH FILTARA OSETLJIVIH NA IVICE U PRISUSTVU JAKE TEKSTURE [40].	71
SLIKA 2.7 REPRODUKCIJA HDR SLIKA KORIŠĆENJEM MODELA PERCEPCIJE BOJA [2].	80
SLIKA 2.8 BLOK DIJAGRAM ICAM06 OPERATORA [58].	82
SLIKA 3.1 BLOK DIJAGRAM ELTM ALGORITMA [69].....	88
SLIKA 3.2 VREDNOSTI OSVETLJAJA SCENE U LOGARITAMSKOM DOMENU	90
SLIKA 3.3 REZULTAT DEKOMPOZICIJE LOGARITAMSKOG OSVETLJAJA SCENE KORIŠĆENJEM VOĐENOG FILTRA.....	93
SLIKA 3.4 HISTOGRAMI LOGARITAMSKE VREDNOSTI BAZNOG SLOJA PRE A) I POSLE B) POSTUPKA ADAPTACIJE DINAMIČKOG OPSEGA.	96
SLIKA 3.5 HISTOGRAMI LOGARITAMSKE VREDNOSTI BAZNOG SLOJA U USLOVIMA POGREŠNE NORMALIZACIJE TIP A PRE ADAPTACIJE DINAMIČKOG OPSEGA A) I NAKON ADAPTACIJE ZA SLUČAJEVE BEZ KOMPENZACIJE OFSETA B) I SA KOMPENZACIJOM OFSETA B).	98
SLIKA 3.6 HISTOGRAMI LOGARITAMSKE VREDNOSTI BAZNOG SLOJA U USLOVIMA POGREŠNE NORMALIZACIJE TIP B PRE ADAPTACIJE DINAMIČKOG OPSEGA A) I NAKON ADAPTACIJE ZA SLUČAJEVE BEZ KOMPENZACIJE OFSETA B) I SA KOMPENZACIJOM OFSETA B).	99
SLIKA 3.7 REPRODUKCIJA HDR SCENE KORIĆENJEM LINEARNOG SKALIRANJA I GAMA KOREKCIJE A) I ELTM ALGORITMA B).	101
SLIKA 3.8 REZULTATI PROSTORNO UNIFORMNOG C) I PROSTORNO VARIJABILNOG D) POJAČANJA DETALJA KORIŠĆENJEM PROSTORNO VARIJABILNE KOREKCIJE POJAČANJA B). REZULTAT PROCESIRANJA PODRAZUMEVANIM PARAMETRIMA ALGORITMA A). 102	

SLIKA 3.9 HISTOGRAM BAZNOG SLOJA U LINEARNOM DOMENU NAKON ADAPTACIJE DINAMIČKOG OPSEGA U LOGARITAMSKOM DOMENU.....	104
SLIKA 3.10 HISTOGRAM BAZNOG SLOJA NAKON POPRAVKA KONTRASTA LOGARITAMSKOM FUNKCIJOM.....	105
SLIKA 3.11 PROCES POPRAVKE KONTRASTA BAZNOG SLOJA LOGARITAMSKOM FUNKCIJOM U LINEARNOM DOMENU. PLAVOM BOJOM JE PRIKAZAN ULAZNI HISTOGRAM, DOK SU CRVENOM BOJOM PRIKAZANI KORŠĆENA LOGARITAMSKA FUNKCIJA I IZLAZNI HISTOGRAM.	106
SLIKA 3.12 PROCES POPRAVKE KONTRASTA BAZNOG SLOJA MODIFIKOVANOM LOGARITAMSKOM FUNKCIJOM U LINEARNOM DOMENU. PLAVOM BOJOM JE PRIKAZAN ULAZNI HISTOGRAM, DOK SU ZELENOM BOJOM PRIKAZANI KORŠĆENA LOGARITAMSKA FUNKCIJA I IZLAZNI HISTOGRAM. INICIJALNA LOGARITAMSKA FUNKCIJA JE PRIKAZANA CRVENOM BOJOM.....	107
SLIKA 3.13 FINALNI IZGLED MODIFIKOVANE LOGARITAMSKE FUNKCIJE ZA POPRAVKU KONTRASTA KOJA SE PRILAGOĐAVA OPSEGU VREDNOSTI ULAZA. IZLAZNI OPSEG FUNKCIJE JE OGRANIČEN ČIME SE OSTAVLJA DOVOLJNO PROSTORA ZA RESTAURACIJU DETALJA.	109
SLIKA 3.14 HISTOGRAM BAZNOG SLOJA NAKON POPRAVKE KONTRASTA A), KAO I HISTOGRAMI IZLAZNE LUMINANSE NAKON REDUKCIJE DINAMIČKOG OPSEGA B) I C). U PRIMERU C) JE NA DETALJE PRIMENJENA PROSTORNO VARIJABILNA KOREKCIJA POJAČANJA.	111
SLIKA 3.15 IZGLED LDR SLIKE NAKON REDUKCIJE DINAMIČKOG OPSEGA POMOĆU LINEARNOG SKALIRANJA I GAMA KOREKCIJE A) I KORIŠĆENJEM ELTM OPERATORA B).....	112
SLIKA 3.16 PROMENA SVOJSTVA IZLAZNE SLIKE PROMENOM ODGOVARAJUĆIH PARAMETARA ALGORITMA. PRVI RED PREDSTAVLJA PROMENU OSVETLJAJA KOJA SE POSTIŽE PROMENOM PARAMETRA P . DRUGI I TREĆI RED DEMONSTRIRAJU KONTROLU NAD LOKALNIM KONTRASTOM I OŠTRINOM SLIKE PROMENOM ODGOVARAJUĆIH PARAMETARA POJAČANJA. POSLEDNJI RED DEMONSTRIRA PROMENU PRIORITETA IZMEĐU LOKALNOG I GLOBALNOG KONTRASTA.	114

SLIKA 3.17 EFEKAT KOREKCIJE OSVETLJAJA ZA RAZLIČITE TIPOVE SLIKA	117
SLIKA 3.18 POREĐENJE IZLAZNIH SLIKA NAJBOLJE RANGIRANIH OPERATORA. S LEVA NA DESNO PIKAZANI SU REZULTATI SLEDEĆIH OPERATORA: REINHARD [25], FATTAL [55], iCAM06 [58] I ELTM [69] SA KOREKCIJOM OSVETLJAJA.	128
SLIKA 4.1 PROSEČNA VREDNOST OSVETLJAJA POJEDINAČNIH FREJMOVA PRE (NARANDŽASTO) I POSLE (PLAVO) REDUKCIJE DINAMIČKOG OPSEGA PRIMENOM ELTM OPERATORA BEZ TEMPORALNE KONTROLE PARAMETARA.	137
SLIKA 4.2 PROMENA VREDNOSTI POJEDINAČNIH PARAMETARA ELTM ALGORITMA TOKOM VREMENA U ODSUSTVU TEMPORALNE KONTROLE ALGORITMA.	138
SLIKA 4.3 TEMPORALNA KONTROLA PARAMETARA ELTM ALGORITMA.	139
SLIKA 4.4 BLOK DIJAGRAM ELTM ALGORITMA SA VEZAMA KA KONTROLNOM BLOKU.	142
SLIKA 4.5 PROMENA VREDNOSTI POJEDINAČNIH PARAMETARA ELTM ALGORITMA TOKOM VREMENA PRE (PLAVO) I NAKON (CRVENO) UVOĐENJA TEMPORALNE KONTROLE..	144
SLIKA 4.6 PROSEČNA VREDNOST OSVETLJAJA IZLAZNIH FREJMOVA PRE (PLAVO) I POSLE (CRVENO) UVOĐENJA TEMPORALNE KONTROLE PARAMETARA ELTM ALGORITMA.	145
SLIKA 4.7 UTICAJ STEPENA ADAPTACIJE NA VREDNOST PARAMETRA OFSETA.	146
SLIKA 4.8 UTICAJ STEPENA ADAPTACIJE NA PROSEČNI OSVETLJAJ VIDEO SEKVENCE. ...	146
SLIKA 4.9 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEO, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR VIRTUAL EXPOSURE TM [46].	148
SLIKA 4.10 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEO, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR TIME-DEPENDENT TM [97].	149
SLIKA 4.11 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEO, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR CONE MODEL TM [99].	149
SLIKA 4.12 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEO, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR RETINA MODEL TM [101].	150
SLIKA 4.13 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEO, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR LOCAL ADAPTATION TM [98].	150

SLIKA 4.14 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEOA, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR COLOR APPEARANCE TM [100].	151
SLIKA 4.15 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEOA, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR DA-TM [27].	151
SLIKA 4.16 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEOA, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR TC-TM [93].	152
SLIKA 4.17 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEOA, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR ELTM ZA SLUČAJ POTPUNE ADAPTACIJE $\psi_A=1$	152
SLIKA 4.18 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI I PROSEČNI OSVETLJAJ LDR VIDEOA, <i>HALLWAY</i> SEKVENCE, ZA OPERATOR ELTM ZA SLUČAJ PARCIJALNE ADAPTACIJE $\psi_A=0.3$	153
SLIKA 4.19 PROSEČNA VREDNOST OSVETLJAJA IZLAZNIH FREJMOVA DOBIJENIH MAPIRANJEM <i>HALLWAY</i> HDR SCENE (NARANDŽASTO) POMOĆU DA-TM OPERATORA I ELTM OPERATORA ZA SLUČAJ POTPUNE ADAPTACIJE $\psi_A=1$	154
SLIKA 4.20 PROSEČNA VREDNOST OSVETLJAJA IZLAZNIH FREJMOVA DOBIJENIH MAPIRANJEM <i>HALLWAY</i> HDR SCENE (NARANDŽASTO) POMOĆU TC-TM OPERATORA I ELTM OPERATORA ZA SLUČAJ PARCIJALNE ADAPTACIJE $\psi_A=0.3$	155
SLIKA 4.21 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI <i>HALLWAY</i> SEKVENCE ZA DA-TM (LEVO) I ELTM ZA $\psi_A=1$ (DESNO).	156
SLIKA 4.22 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI <i>HALLWAY</i> SEKVENCE ZA TC-TM (LEVO) I ELTM ZA $\psi_A=0.3$ (DESNO).	157
SLIKA 4.23 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI <i>HALLWAY</i> SEKVENCE ZA MPF-TM (LEVO) I ELTM ZA $\psi_A=0.3$ (DESNO).	157
SLIKA 4.24 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI <i>EXHIBITION AREA</i> SEKVENCE ZA DA-TM (LEVO) I ELTM ZA $\psi_A=1$ (DESNO).	158
SLIKA 4.25 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI <i>EXHIBITION AREA</i> SEKVENCE ZA TC-TM (LEVO) I ELTM ZA $\psi_A=0.3$ (DESNO).	158
SLIKA 4.26 KARAKTERISTIČNI FREJMOVI IZ RAZČITITIH VIDEO SEKVENCI PREDSTAVLJENIH U [108] I KORIŠĆENIH U [20]. PRIKAZANI SU REZULTATI NAKON PROCESIRANJA ELTM OPERATOROM.	159

SLIKA 5.1 ODREĐIVANJE SUME PIKSELA UNUTAR PRAVOUGAONOG REGIONA KORIŠĆENJEM INTEGRALNIH SUMA.....	165
SLIKA 5.2 ODREĐIVANJE HISTOGRAMA LOKALNIH REGIONA SLIKE KORIŠĆENJEM INTEGRALNIH HISTOGRAMA [113].	166
SLIKA 5.3 BLOK DIJAGRAM ALGORITMA VOĐENOG FILTRA (GF) [40]	172
SLIKA 5.4 BLOK DIJAGRAM ALGORITMA BRZOG VOĐENOG FILTRA (FGF) [117].....	173
SLIKA 5.5 BLOK DIJAGRAM ALGORITMA UNAPREĐENOG BRZOG VOĐENOG FILTRA (iFGF) [118]	174
SLIKA 5.6 SLIKE KORIŠĆENE PRILIKOM ANALIZE KVALITETA APROKSIMACIJA FGF I iFGF	176
SLIKA 5.7 KVALITET APROKSIMACIJE PRI PROMENI VELIČINE FILTRA ZA SLIKU <i>STATUA</i>	178
SLIKA 5.8 KVALITET APROKSIMACIJE PRI PROMENI VELIČINE FILTRA ZA SLIKU <i>DEVOJČICA</i>	178
SLIKA 5.9 KVALITET APROKSIMACIJE PRI PROMENI VELIČINE FILTRA ZA SLIKU <i>SELO</i>	179
SLIKA 5.10 KVALITET APROKSIMACIJE ZA KONSTANTAN DECIMACIONI FAKTOR $S=25$	179
SLIKA 5.11 UTICAJ PROMENE REGULARIZACIONOG PARAMETRA NA KVALITET APROKSIMACIJE ZA $K=7$ I RAZLIČITE DECIMACIONE FAKTORE.....	180
SLIKA 5.12 VREME IZVRŠAVANJA RAZLIČITIH VERZIJA VOĐENOG FILTRA U ZAVISNOSTI OD VELIČINE INTERNOG FILTRA K , ZA KONSTANTNU VREDNOST DECIMACIONOG FAKTORA $S=25$	181
SLIKA 5.13 VREME IZVRŠAVANJA ORIGINALNOG (FGF) I UNAPREĐENOG (iFGF) BRZOG VOĐENOG FILTRA U ZAVISNOSTI OD VELIČINE INTERNOG FILTRA K , ZA KONSTANTNU VREDNOST DECIMACIONOG FAKTORA $S=25$	182
SLIKA 5.14 HARDVERSKA ARHITEKTURA iFGF-A ZA SLUČAJ $I \equiv P$. TRI RAZLIČITA TAKT DOMENA SU OZNAČENA RAZLIČITIM BOJAMA.	182
SLIKA 5.15 GRAFIČKI PRIKAZ PROCESA IZRAČUNAVANJA DECIMIRANOG BOKS FILTRA	184
SLIKA 5.16 HARDVERSKA ARHITEKTURA DECIMIRANOG BOKS FILTRA. RAZLIČITE BOJE OZNAČAVAJU RAZLIČITE DOMENE TAKTA.....	185

SLIKA 5.17 HARDVERSKA ARHITEKTURA INTERNOG BOKS FILTRA.	187
SLIKA 5.18 HARDVERSKA ARHITEKTURA BLOKA ZA APROKSIMACIJU FUNKCIJE $x/(x+1)$	190
SLIKA 5.19 HARDVERSKA ARHITEKTURA INTERPOLACIONOG MODULA.....	191
SLIKA 5.20 ORGANIZACIJA PROCESIRANJA TOKOM HORIZONTALNE INTERPOLACIJE KOJOM SE OBEZBEĐUJE KONSTANTAN PROTOK NA IZLAZU.	192
SLIKA 5.21 HARDVERSKA ARHITEKTURA 1D INTERPOLACIONOG MODULA.	193
SLIKA 5.22 KVALITET APROKSIMACIJE U ODNOSU NA ORIGINALNU REALIZACIJU VOĐENOG FILTRA.	196
SLIKA 5.23 KVALITET APROKSIMACIJE U ODNOSU REALIZACIJU UNAPREĐENOG BRZOG VOĐENOG FILTRA SA POKRETNOM TAČKOM. ULAZNI PIKSELI SU IZ OPSEGA OD 0 DO 255.	197
SLIKA 5.24 ZAUZEĆE MEMORIJSKIH RESURSA U FUNKCIJI OD ŠIRINE ULAZNE SLIKE ZA FILTAR VELIČINE 35x35 I DECIMACIONIM FAKTOROM $S=7$	198
SLIKA 5.25 VELIČINA INTERNE MEMORIJE (BEZ MEMORIJE ZA KAŠNJENJE) ZA 1080P VIDEO U FUNKCIJI FAKTORA DECIMACIJE S ZA RAZLIČITE VELIČINE INTERNOG FILTRA K	199
SLIKA 5.26 VELIČINA MEMORIJE U FUNKCIJI DECIMACIONOG FAKTORA S ZA 1080P VIDEO I VELIČINU INTERNOG FILTRA $K=5$	199
SLIKA 5.27 VELIČINA MEMORIJE U FUNKCIJI VELIČINE INTERNOG FILTRA K ZA 1080P VIDEO I DECIMACIONI FAKTOR $S=7$	200
SLIKA 5.28 VELIČINA MEMORIJE ZA 1080P VIDEO U FUNKCIJI FAKTORA DECIMACIJE S ZA RAZLIČITE VELIČINE INTERNOG FILTRA K	200
SLIKA 5.29 PROTOK iFGF HARDVERSKOG BLOKA ZA RAZLIČITE FAKTORE DECIMACIJE S I VELIČINE INTERNOG FILTRA K NA CYCLONE V FPGA ČIPU.	201
SLIKA 5.30 ZAUZEĆE LOGIČKIH RESURSA NA CYCLONE V FPGA ČIPU ZA RAZLIČITE KONFIGURACIJE PARAMETARA S I K	202
SLIKA 5.31 ZAUZEĆE REGISTARA NA CYCLONE V FPGA ČIPU ZA RAZLIČITE KONFIGURACIJE PARAMETARA S I K	203

SLIKA 5.32 HARDVERSKA ARHITEKTURA iFGF-A ZA SLUČAJ $I \neq P$. TRI RAZLIČITA TAKT DOMENA SU OZNAČENA RAZLIČITIM BOJAMA. ELEMENTI KOJI SU DODATI U ODNOSU NA SLUČAJ $I \equiv P$ S OZNAČENI ŽUTOM BOJOM.	206
---	-----

SPISAK PRILOGA

PRILOG 1 SLIKE KORIŠĆENE PRI TESTIRANJU ELTM-A	230
--	-----

1 UVOD

1.1 Percepcija scene i dinamički opseg

Dinamički opseg osvetljenosti posmatrane ili snimljene scene, predstavlja odnos intenziteta osvetljenosti najsvetlije i najtamnije tačke na sceni, odnosno slici. U prirodi ovaj odnos može biti jako visok i iznositi i do nekoliko milijardi (između direktne sunčeve svetlosti i oblasti koje se nalaze u dubokoj senci). Vizuelni sistem čoveka evoluirao je tako, da može istovremeno percipirati detalje na sceni, sa dinamičkim opsegom od nekoliko desetina hiljada [1]. Više detalja o vizuelnom sistemu čoveka je dato u odeljku 1.2.

Međutim, današnji standardni uređaji za snimanje, kamere, imaju dinamički opseg od svega nekoliko hiljada. Slika 1.1 predstavlja primer scene, čiji dinamički opseg osvetljaja prevazilazi dinamički opseg kamere. Na slici levo je prikazana ova scena snimljena standardnom kamerom uz korišćenje optimalne ekspozicije. Kako je dinamički opseg kamere ograničen, detalji u svetlim delovima scene su potpuno nestali, dok su detalji u tamnim delovima scene veoma slabo uočljivi. Slika desno predstavlja istu scenu, pri čemu je snimljen celokupan dinamički opseg osvetljaja, a prikaz prilagođen tako da se jasno vide detalji na celoj sceni.



a)

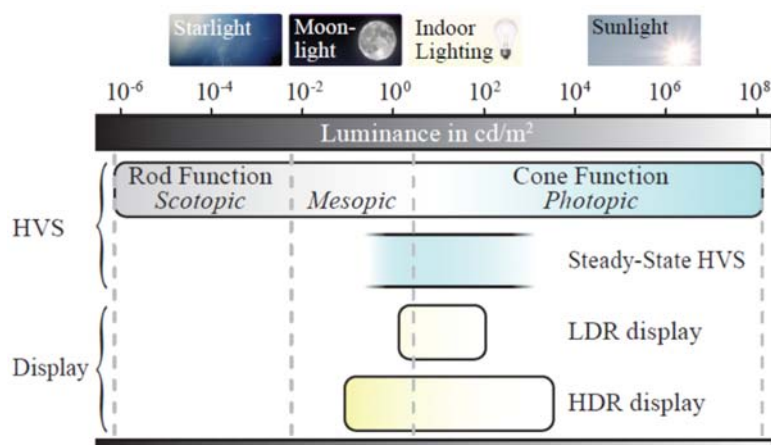
b)

Slika 1.1 Slika širokog dinamičkog opsega [2].

U poslednje vreme, razvijeni su novi senzori i tehnike, koje omogućavaju povećanje dinamičkog opsega snimljene scene. Osnovna ideja predstavlja korišćenje različitog vremena ekspozicije za različite delove scene. Više detalja o tehnikama snimanja slika širokog dinamičkog opsega dato je u odeljku 1.3.

Problem koji se javlja, nakon snimanja celokupnog dinamičkog opsega osvetljaja scene, je prikaz ovakvih slika na standardnim displejima. Naime, standardni displeji, koji su u širokoj upotrebi najčešće imaju dinamički opseg od nekoliko stotina. Zbog toga se oni nazivaju displeji sa uskim dinamičkim opsegom ili LDR displeji (*Low Dynamic Range* - LDR). Za slike i displeje, čiji je dinamički opseg uporediv sa dinamičkim opsegom ljudskog vizuelnog sistema (*Human Visual System* - HVS), ili ga prevazilazi, kaže se da imaju široki dinamički opseg (*High Dynamic Range* - HDR). Slika 1.2 prikazuje dinamički opseg vizuelnog sistema čoveka, u poređenju sa dinamičkim opsegom trenutno dostupnih LDR i HDR displeja. Kako se tehnologija HDR displeja i dalje razvija, i kako je cena postojećih modela veoma visoka, njihova upotreba nije široko

rasprostranjena. Više detalja, o trenutno dostupnim displejima, i njihovom dinamičkom opsegu, je dato u odeljku 1.4.



Slika 1.2 Dinamički opseg vizuelnog sistema čoveka i dostupnih displeja [1].

U poslednje vreme, tehnike snimanja HDR slika su veoma napredovale, čime je stvorena mogućnost snimanja HDR sadržaja korišćenjem standardnih LDR senzora. Masovna produkcija HDR sadržaja, nameće potrebu za njihovom reprodukcijom na LDR displejima. Tehnike koje ovo omogućavaju se nazivaju operatori za reprodukciju HDR slika. Ovi operatori definišu mapiranje ulaznih vrednosti osvetljaja u vrednosti koje se šalju na uređaj za reprodukciju slike, što je najčešće displej. Ovo mapiranje obično predstavlja neku nelinearnu funkciju i može biti prostorno varijabilno. Cilj operatora može biti raznolik i ide od toga da se scena predstavi što realnije, onako kako bi je čovek doživeo u prirodi, do toga da se postigne što bolji subjektivni utisak kod posmatrača. Interesantno je da ova dva zahteva nisu identična i da često dovode do veoma različitih rezultata, odnosno najrealniji prikaz ne proizvodi i najbolji subjektivni utisak. Više detalja o operatorima za reprodukciju slika je dato u glavi 2.

Predmet ove disertacije predstavlja novi lokalni operator za reprodukciju HDR slika, nazvan ELTM. Ideja je bila da se predloži rešenje, koje pored dobre reprodukcije detalja, poseduje robusnost i fleksibilnost. Robusnost podrazumeva da se operator može upotrebiti za reprodukciju najrazličitijih HDR slika, pri čemu je potrebno da konzistentno proizvodi dobre rezultate, za fiksiran set ulaznih parametara. Fleksibilnost podrazumeva da je operator projektovan tako, da se omogući podešavanje različitih aspekata izlazne scene, kako bi se postigao što bolji subjektivni utisak kod posmatrača.

U glavi 3 je detaljno opisan i analiziran predloženi algoritam. Robusnost je testirana na velikoj bazi HDR slika, pri čemu su rezultati upoređeni sa 7 različitih operatora za reprodukciju HDR slika, korišćenjem 9 metrika kvaliteta. Fleksibilnost je takođe demonstrirana, nezavisnim podešavanjem različitih aspekata izlazne scene.

Reprodukcija HDR videa predstavlja poseban izazov, s obzirom da direktna primena operatora za reprodukciju statičnih HDR slika uglavnom izaziva problem treperenja izlazne video sekvence. Zbog toga je u glavi 4 analiziran ovaj problem i predložena je kontrola ELTM-a, koja omogućava njegovu upotrebu u video sekvencama. Predložena kontrola je fleksibilna i omogućava postizanje različitih ciljeva prilikom reprodukcije HDR video sekvence, o čemu će biti više reči u glavi 4.

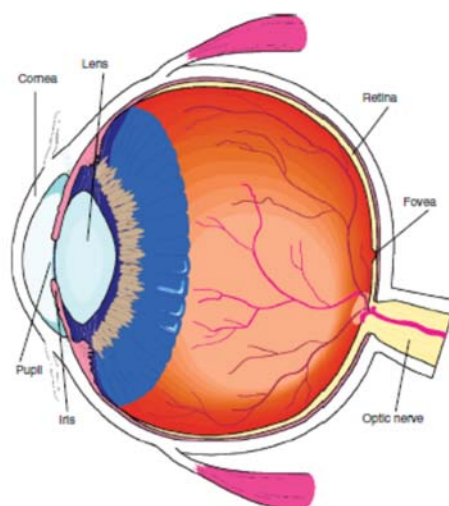
Kako bi se omogućila upotreba ELTM-a u namenskim sistemima smanjene potrošnje, u glavi 5 je predložena efikasna hardverska realizacija velikog filtra osetljivog na ivice. Ovaj filter predstavlja najzahtevniju komponentu ELTM algoritma. Zaključak i smernice za dalji rad su dati u glavi 6.

1.2 Vizuelni sistem čoveka

Vizuelni sistem čoveka se svakodnevno susreće i uspešno rešava problem redukcije širokog dinamičkog opsega osvetljaja scene. Naime, dinamički opseg osvetljaja tipičnih scena sa kojima se susrećemo tokom dana je oko 10^4 a može biti i znatno veći, kao što je na primer scena sa slike Slika 1.1. Interesantno je da je dinamički opseg (odnos signal šum) pojedinačnih nervnih puteva koji vode od oka ka centru za vid u mozgu oko 32 [2], dakle čak manji i od standardnih LDR displeja. Zbog toga je važno upoznati se sa strukturom ljudskog vizuelnog sistema, i načinom funkcionisanja koji omogućava ovu kompresiju dinamičkog opsega osvetljaja scene.

1.2.1 Struktura oka

Struktura oka je prikazana na slici Slika 1.3.



Slika 1.3 Struktura oka [3].

Rožnjača (*cornea*) predstavlja prednju petinu fibrozne opne očne jabučice. Ona je prozračna i služi za prolaz svetlosti, ali osim toga ima i ulogu konveksno-konkavnog sočiva.

Zenica (*pupilla*) predstavlja kružni otvor, kroz koji se svetlost propušta u oko. Širina zenice se može menjati u opsegu od 2-8 mm, skupljanjem i širenjem glatkih mišića, čime se reguliše količina svetlosti koja ulazi u oko.

Sočivo (*lens*) predstavlja providno tkivo, bikonveksnog oblika, čija uloga je fokusiranje svetlosti koja dolazi do oka, tako da ona najvećim delom pada u tačku jasnog vida. Ova tačka predstavlja deo mrežnjače u kojem su skoncentrisani fotoreceptori. Žižna daljina sočiva se menja skupljanjem i širenjem cilijarnih mišića, čime se menja tačka fokusa. Ovaj proces se naziva akomodacija. Vremenom sposobnost cilijarnih mišića slabi, pa samim tim i mogućnost akomodacije što dovodi do „staračke dalekovidosti“.

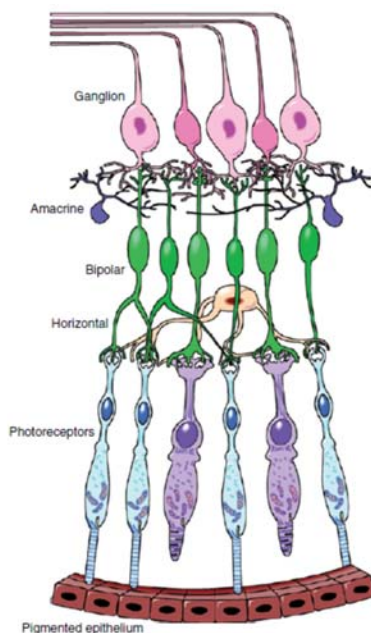
Mrežnjača (*retina*) predstavlja sloj nervnih ćelija, čija je uloga konverzija svetlosti koja dođe do oka u nervne impulse. Unutar mrežnjače se nalazi dva tipa fotoreceptora i to su štapići (*rods*) i čepići (*cones*). Opis strukture mrežnjače i uloge pojedinih ćelija dat je u narednom odeljku.

Tačka jasnog vida (*fovea*) predstavlja deo mrežnjače, u kojem je skoncentrisan najveći broj čepića. Najveći deo svetlosti koji dolazi do oka se pomoću sočiva fokusira upravo na ovaj deo mrežnjače.

Slepa tačka (*blind spot*) predstavlja deo mrežnjače, u kojem optički nerv napušta oko i u ovom delu nema fotorceptora.

1.2.2 Struktura mrežnjače

Struktura mrežnjače je prikazana na slici Slika 1.4.



Slika 1.4 Struktura mrežnjače [3].

Sa donje strane mrežnjače se nalazi sloj pigmentnog epitela (*pigmented epithelium*), čija je uloga da apsorbuje svetlosne zrake i spreči njihovo dalje rasipanje unutar oka. Iznad pigmentnog sloja se nalaze fotorceptori (*photoreceptors*).

Štapići (*rods*), označeni plavom bojom na slici Slika 1.4, predstavljaju fotorceptore koji su aktivni u uslovima slabog osvetljenja i omogućavaju percepciju detalja noću. Postoji samo jedna vrsta štapića i zbog toga nije moguće razlikovati boje pomoću njih. Ima ih oko 115 miliona i uglavnom su raspoređeni po periferiji dok je njihova koncentracija u tački jasnog vida jednaka nuli. Kako bi se povećala osetljivost u uslovima slabog osvetljenja, signali koji potiču od više različitih štapića se sabiraju, čime se smanjuje sposobnost lokalizacije signala, odnosno preciznost u percepciji detalja.

Čepići (*cones*), označeni ljubičastom bojom na slici Slika 1.4, predstavljaju fotorceptore koji su aktivni u uslovima dovoljno jakog svetla i omogućavaju percepciju

detalja tokom većine vremena. Postoje 3 vrste čepića od kojih je svaka osetljiva na određeni deo spektra. Na taj način se pored informacije o intenzitetu dobija i informacija o spektralnom sadržaju svetla koje dolazi do oka, što omogućava percepciju boja. Čepića u oku ima oko 6.5 miliona i oni su uglavnom skoncentrisani u tački jasnog vida, dok je njihova koncentracija van ove oblasti ravna nuli. Signal sa svakog čepića se zasebno vodi ka višim centrima u mozgu, što daje dosta bolju mogućnost percepcije detalja u odnosu na štapiće.

Bipolarne ćelije (*bipolar*) prihvataju signal sa fotoreceptora i prosleđuju ga dalje ka očnom nervu. Postoji više vrsta bipolarnih ćelija i dele se na osnovu toga kojim tipom signala sa fotoreceptora se aktiviraju. Dve velike grupe bipolarnih ćelija predstavljaju ON i OFF ćelije [4]. Prve detektuju prisustvo svetlih delova scene dok se druge aktiviraju u odsustvu pobude sa fotoreceptora i služe za detekciju tamnih delova scene.

Horizontalne (*horizontal*) ćelije omogućavaju podešavanje odziva pojedinih fotoreceptora i bipolarnih ćelija u zavisnosti od stanja okolnih ćelija. Na taj način se uvodi prostorna zavisnost i omogućava detekcija različitih obrazaca u vidnom polju. Na primer, jedna od uloga horizontalnih ćelija je pojačavanje signala koji se značajnije razlikuje od signala koji dolazi sa okolnih ćelija. Na taj način je omogućena bolja percepcija detalja na sceni.

Bipolarne ćelije su povezane sa ganglijskim ćelijama (*ganglion*), koje služe za detekciju kompleksnijih obrazaca u vidnom polju. Signal koji dolazi do ganglijskih ćelija se vodi do centra za vid u mozgu, putem očnog nerva.

Amakrine (*amacrine*) ćelije omogućavaju horizontalnu povezanost susednih ganglijskih i bipolarnih ćelija. Njihova uloga nije još razjašnjena ali se veruje da su zadužene za adaptaciju na promenljive uslove osvetljaja tokom različitih delova dana [4].

1.2.3 Adaptacija na promenu osvetljaja

Vizuelni sistem čoveka uspešno funkcioniše u veoma širokom spektru osvetljenja, kao što je prikazano na slici Slika 1.2. Postavlja se pitanje, koji mehanizmi omogućavaju ovako širok spektar funkcionisanja, s obzirom da je dinamički opseg pojedinačnih fotoreceptora dosta uži.

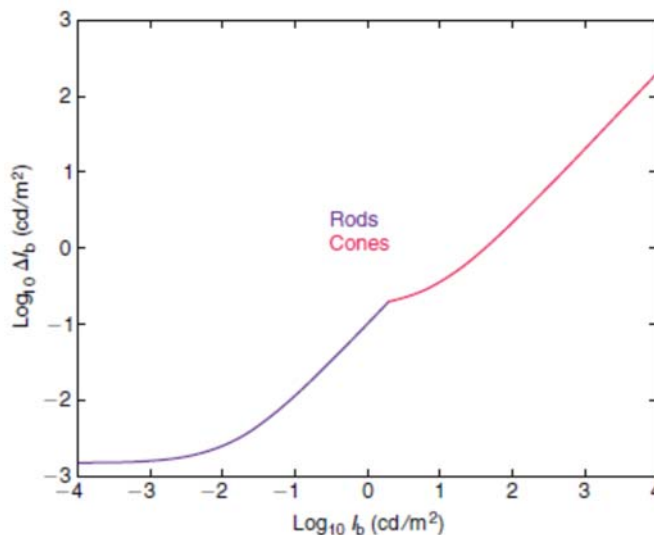
Količina svetla koja dopire do unutrašnjosti oka se može regulisati skupljanjem i

širenjem zenica. S obzirom na to da se širina zenica menja u opsegu od 2 do 8 mm, maksimalna promena količine svetla koja dolazi do oka je oko 16. Ova adaptacija svakako nije dovoljna da omogući funkcionisanje u veoma različitim svetlosnim uslovima.

Fotoreceptori, čepići i štapići, imaju mogućnost adaptacije, odnosno promene osetljivosti u odnosu na srednji nivo osvetljaja posmatrane scene. Osetljivost fotoreceptora je najveća u tamnim uslovima, čime se omogućava percepcija jako malih varijacija u osvetljaju, odnosno percepcija detalja u tami. U svetlim uslovima, osetljivost fotoreceptora opada, čime se izbegava ulazak u zasićenje pri većim varijacijama osvetljaja. Na ovaj način se omogućava percepcija detalja na svetlim scenama. Klasičan eksperiment kojim se meri osetljivost vizuelnog sistema u zavisnosti od nivoa adaptacije (srednji osvetlaj scene) predstavlja eksperiment sa „jedva primetnim razlikama“ (JND – *Just Noticeable Difference*). Postavka eksperimenta je takva da se posmatraču prikaže uniformno osvetljena pozadina intenziteta I_b , na koju se on adaptira. Potom se u centralnom delu na koji se posmatrač fokusira emituje stimulus čiji se osvetlaj razlikuje za ΔI od intenziteta pozadine. Najmanja razlika koju posmatrač može da uoči označava se sa ΔI_b i predstavlja „jedva primetnu razliku“ za nivo adaptacije I_b . Pokazuje se da je u veoma velikom opsegu nivoa adaptacije, odnos intenziteta pozadine i „jedva primetne razlike“ konstantan. Ovaj zakon se naziva Weber-ov zakon i može se iskazati kao:

$$\frac{\Delta I_b}{I_b} = k \quad (2.2.1)$$

Na slici Slika 1.5 je prikazana zavisnost „jedva primetnih razlika“ za različite nivoe adaptacije. Dijagram je prikazan u logaritamskom domenu pri čemu izraz (2.2.1) predstavlja pravu jediničnog nagiba. Na slici Slika 1.5 se takođe može uočiti kako osetljivost čepića prestaje da raste ispod određenog nivoa adaptacije. Međutim, tada njihovu ulogu preuzimaju štapići, koji su znatno osetljiviji i omogućavaju percepciju detalja za male vrednosti osvetljaja.



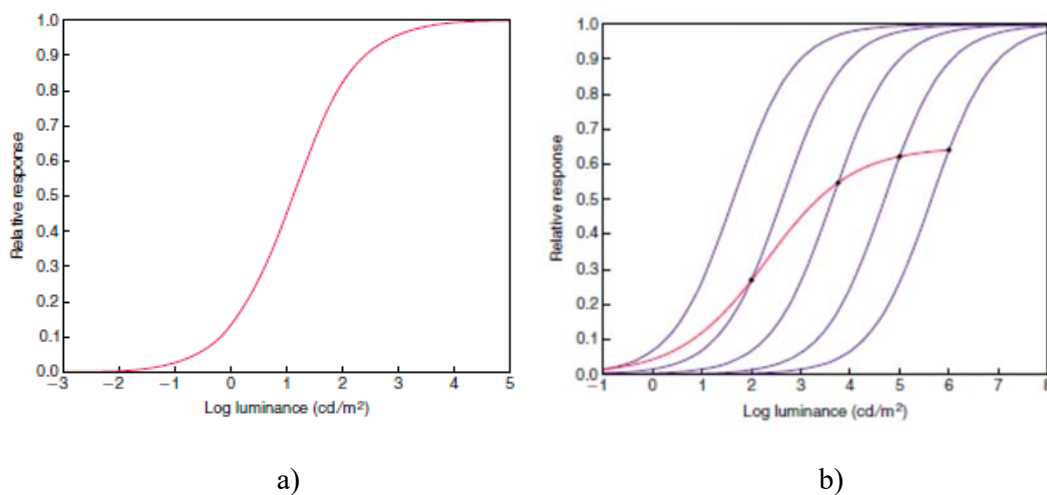
Slika 1.5 Osetljivost čepića i štapića za različite nivoe adaptacije [2].

Na slici Slika 1.6 a) je prikazan odziv jedne fotoreceptorske ćelije za različite nivoe osvetljaja. Pokazuje se da intenzitet odziva logaritamski zavisi od intenziteta pobudnog osvetljaja u opsegu od 3-4 log jedinice, što je veoma malo u odnosu na celokupni opseg funkcionisanja ljudskog vizuelnog sistema [2]. Međutim, takođe se pokazuje da se prilikom dužeg izlaganja fotoreceptora određenom intenzitetu svetla, ćelija adaptira i kriva odziva se pomera, tako da se postigne što bolji odziv na intenzitete svetla oko ovog nivoa adaptacije. Slika 1.6 b) pokazuje promenu odziva fotoreceptora za različite nivoe adaptacije. Interesantno je, da je oblik krive odziva isti za sve nivoe adaptacije i da se samo pomera u levo ili desno u zavisnosti od srednjeg nivoa osvetljaja. Tačke na slici Slika 1.6 b) označavaju različite nivoe adaptacije. Ljubičaste krive predstavljaju odzive fotoreceptora za različite nivoe adaptacije, dok crvena kriva označava vrednost odziva za srednji nivo osvetljaja u stacionarnom stanju.

Odziv fotoreceptora se može opisati Naka-Rushton jednačinom [2]:

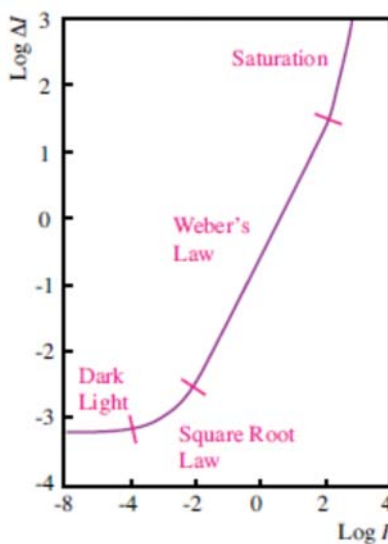
$$\frac{R}{R_{\max}} = \frac{I^n}{I^n + \sigma_b^n} \quad (2.2.2)$$

gde je $R \in [0, R_{\max}]$ relativni odziv fotoreceptora, I intenzitet svetlosne pobude, σ_b konstanta koja zavisi od stepena adaptacije i definiše poziciju krive odziva, a n predstavlja parametar osetljivosti i kreće se u opsegu između 0.7 i 1.0.



Slika 1.6 Odziv fotoreceptora na promenu osvetljaja u okolini nivoa adaptacije (levo) i familija odziva fotoreceptora prilikom promene nivoa adaptacije (desno) [2].

Slika 1.7 detaljnije prikazuje zavisnost „jedva primetnih razlika“ u odnosu na različite opsege osvetljaja.



Slika 1.7 Osetljivost fotoreceptora za različite nivoe adaptacije [4].

Primećuje se da Weber-ov zakon važi u opsegu od 3-4 log jedinice. Za osvetljaje veće od ove granice nagib krive naglo raste, što znači da sistem ulazi u zasićenje, odnosno mogu se detektovati samo jako velike promene osvetljaja. Za osvetljaje manje od granice od koje počinje da važi Weber-ov zakon, vrednost „jedva primetnih razlika“ je

proporcionalna kvadratnom korenu srednjeg osvetljaja. Ova zavisnost je poznata i kao *de Vries-Rose* zakon [4]:

$$\frac{\Delta I_b}{\sqrt{I_b}} = k \quad (2.2.3)$$

Za jako male vrednosti osvetljaja vrednost „jedva primetne razlike“ ostaje konstantna bez obzira na dalje smanjenje srednje osvetljenosti. U ovom opsegu se može reći da je fotoreceptor adaptiran na tamu. Kako bi se i ovaj slučaj modelovao izraz (2.2.1) se može modifikovati tako da uključuje konstantu I_0 koja modeluje neuralni šum u odsustvu pobude [4]:

$$\frac{\Delta I_b}{I_b + I_0} = k \quad (2.2.4)$$

Ako se konstanta k u izrazu (2.2.1) zameni sa $k = \frac{1}{k'} \cdot dR_b$ gde dR_b označava priraštaj sjajnosti, koja predstavlja subjektivni osećaj osvetljenosti scene, dobija se izraz [4]:

$$dR_b = k' \frac{dI_b}{I_b} \quad (2.2.5)$$

Integraljenjem obe strane dobija se Fechner-ov zakon, po kome je percepcija osvetljenosti scene logaritamske prirode:

$$R_b = k' \cdot \log(I_b) + C \quad (2.2.6)$$

Konstanta C se postavlja tako, da je vrednost sjajnosti za minimalnu pobudu, koju je moguće detektovati, jednaka nuli. Ako se usvoji da je minimalna pobuda zapravo jednaka vrednosti neuralnog šuma I_0 dobija se izraz [4]:

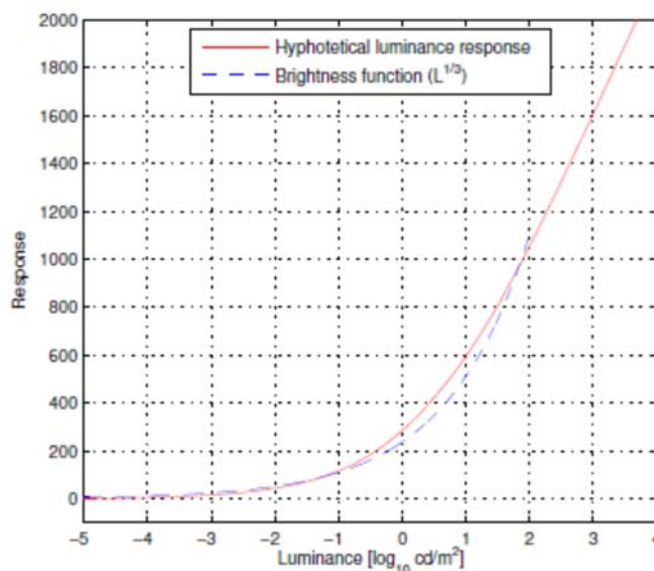
$$R_b = k' \log\left(\frac{I_b}{I_0}\right) \quad (2.2.7)$$

Krive zavisnosti „jedva primetnih razlika“ dobijene su za vrednosti pobuda osvetljaja koje izazivaju prag u percepciji. Izrazi (2.2.6) i (2.2.7) su izvedeni pod pretpostavkom da ova zavisnost važi i za širi opseg vrednosti osvetljaja koje su veće od ovog praga pobude. Eksperimentalno je pokazano, da ova hipoteza ne stoji i da je bolji model za percepciju osvetljaja u stvari Stevens-ov stepeni zakon koji je dat izrazom:

$$R_b = k(I_b - I_0)^n \quad (2.2.8)$$

Parametar n označava osetljivost i eksperimentalno je pokazano da je vrednost ovog parametra za percepciju sjajnosti 0.33 [4].

Problem sa izrazom (2.2.7) je što se u stvarnosti parametar k' menja sa promenom osvetljaja, prostorne učestanosti i još nekih parametara [5]. Jednostavna popravka ovog izraza je uključivanje funkcije osetljivosti koja modeluje varijacije parametra k' . Na taj način je dobijena crvena kriva sa slike Slika 1.8 [5]. Može se uočiti da se ova kriva dosta dobro poklapa sa plavom isprekidanom krivom koja je dobijena pomoću izraza (2.2.8) korišćenjem stepena 0.33.



Slika 1.8 Modifikovana logaritamska i stepena percepcija sjajnosti [5].

1.3 Snimanje slika širokog dinamičkog opsega

Dinamički opseg kamera je ograničen pragom šuma sa donje strane i zasićenjem senzorskih elemenata sa gornje strane. Kod standardnih digitalnih kamera ovaj dinamički opseg iznosi oko 10^3 , što nije dovoljno da se snimi celokupni dinamički opseg prirodnih scena koji iznosi oko 10^4 . Ovaj problem se može prevazići na jedan od tri načina:

- 1) Modifikacija arhitekture piksela za HDR

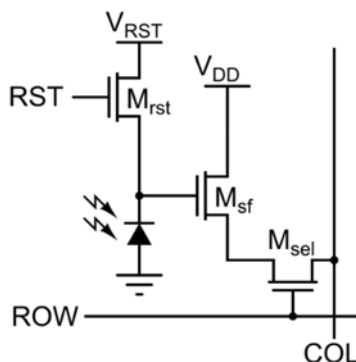
- 2) Modifikacija arhitekture senzora za HDR
- 3) Korišćenje postojećih senzora i softverskih metoda za snimanje HDR scene

Sva tri pristupa će biti opisana u tekstu koji sledi. Poslednji pristup je svakako i najinteresantniji pošto omogućava korišćenje postojećeg hardvera i već je našao široku primenu u najrazličitijim komercijalnim uređajima, uključujući i mobilne telefone.

1.3.1 Modifikacija arhitekture piksela za HDR

Velika većina senzora koji su danas u upotrebi spada u jednu od dve klase CCD (*Charge Coupled Device*) i CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Iako su na početku CCD senzori bili apsolutno dominantni, s obzirom na bolje karakteristike osetljivosti i otpornost na šum, poslednjih godina situacija se potpuno preokrenula. Naime, kako se tehnologija CMOS senzora usavršavala, njihove karakteristike su postale uporedive sa CCD sensorima uz jednu veliku prednost, a to je mnogo bolja mogućnost integracije u standardnom CMOS tehnološkom procesu. Zbog toga je u ovom odeljku fokus uglavnom na CMOS sensorima.

Šema standardnog 3T CMOS piksela je prikazana na slici Slika 1.9. Aktiviranjem M_{rst} tranzistora, puni se kapacitivnost fotodiode, što predstavlja početno stanje senzora. Početak akvizicije označava deaktiviranje RST signala. Pod uticajem svetlosti dolazi do pražnjenja kapacitivnosti fotodiode, a samim tim i do pada napona na njoj. Konstantan intenzitet svetla proizvodi konstantnu struju pražnjenja diode, što dovodi do linearnog pada napona na gejt tranzistora M_{sf} . Prilikom očitavanja piksela, aktivira se tranzistor M_{sel} i vrednost napona diode se prenosi na liniju kolone. Napon koji se detektuje na odgovarajućem pikselu, je linearno proporcionalan jačini svetla, kojem je taj piksel bio izložen.



Slika 1.9 Standardni CMOS senzor.

Dinamički opseg CMOS senzora je sa donje strane ograničen strujom curenja fotodiode koja se naziva i tamna struja (*dark current*), pošto se javlja u odsustvu bilo kakve svetlosne pobude. Ova struja ograničava preciznost CMOS senzora odnosno minimalnu razliku osvetljaja koju ovaj tip senzora može da detektuje. Sa gornje strane dinamički opseg je ograničen kapacitetom fotodiode. Maksimalni intenzitet svetla koji je moguće detektovati za zadato vreme ekspozicije je onaj usled kojeg se potpuno isprazni kapacitivnost fotodiode.

Dinamički opseg se može proširiti tako što se pikseli očitavaju više puta tokom ekspozicije. Na taj način se postiže da, pikseli na koje pada intenzivnije svetlo, budu očitani posle kraćeg vremena, pre nego što uđu u zasićenje. Dok se ekspozicija za piksele koji se nalaze u tamnom delu scene može produžiti tako da se signal na njima izdigne iznad praga šuma. Višestruko očitavanje senzora je moguće ostvariti i sa standardnim CMOS pikselima, pošto je sam proces čitanja nedestruktivan.

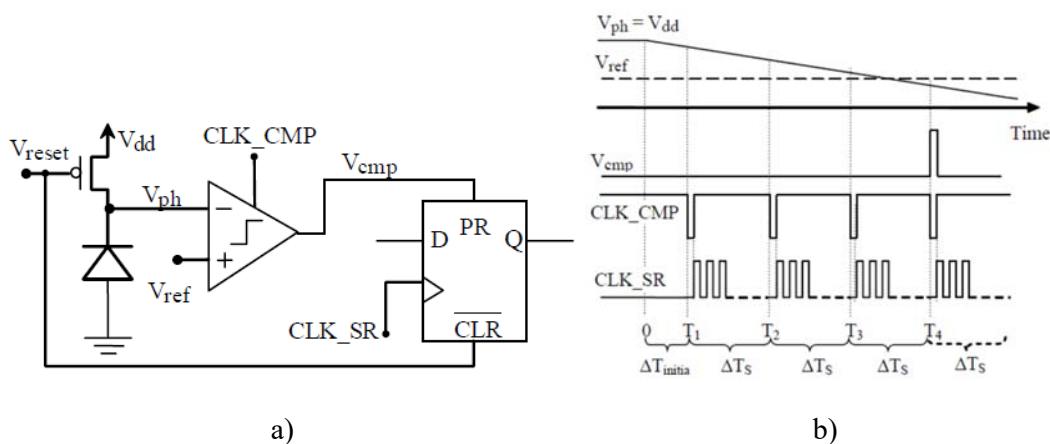
Problem koji se javlja kod višestrukog očitavanja standardnog CMOS senzora je efikasnost i brzina u prenosu analognih signala napona, kao i brzina kojom se može uraditi konverzija. Ovo može značajno uticati na brzinu rada samog senzora odnosno na broj slika koji je moguće snimiti u jedinici vremena.

Postoje različiti načini [6] da se prevaziđe problem zasićenja preeksponiranih piksela. Jedan od metoda je selektivno resetovanje piksela, koji se približe zasićenju. U ovim realizacijama je potrebno unutar svakog piksela integrisati komparator, kojim se proverava da li je napon fotodiode pao ispod određenog praga. U slučaju da je ovo ispunjeno, fotodiode se resetuje čime se omogućava detekcija detalja iznad nivoa

osvetljenosti koji dovodi piksel do zasićenja.

Jedan od načina da se ubrza procesiranje unutar senzora je integracija AD konverzije unutar svakog piksela. Osnovna ideja koja se koristi u ovim sensorima je, da je struja fotodiode uglavnom konstantna tokom vremena ekspozicije, tako da se napon na fotiodiodi menja linearno sa vremenom. Informacija o jačini svetla se sada dobija iz vremena potrebnog da napon na fotiodiodi padne od napona napajanja do nekog predefinisano referentnog napona. Vreme se konvertuje u digitalni podatak korišćenjem brojača. Ovakvi senzori se nazivaju i senzori koji rade u vremenskom domenu.

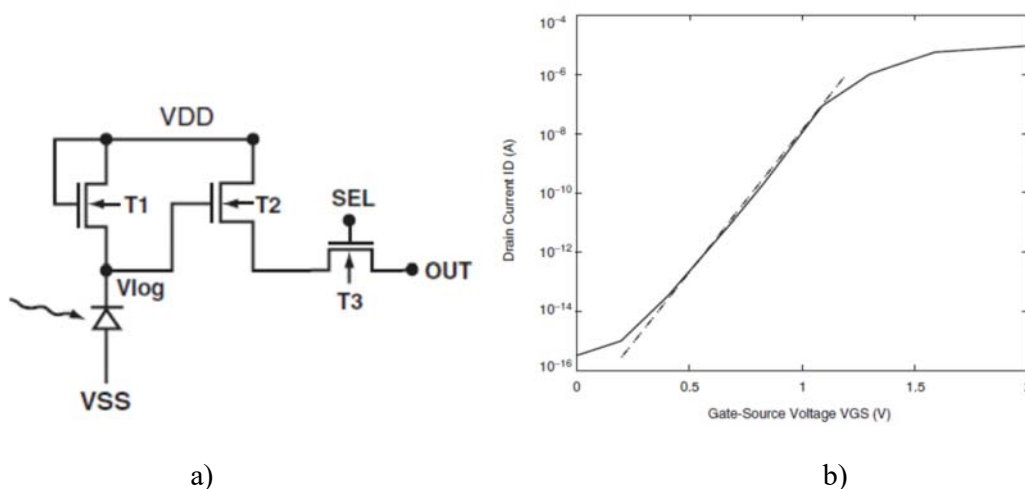
Integracija komparatora i brojača unutar svakog piksela, znatno smanjuje faktor ispunjenosti senzora. Zbog toga su se pojavile ekonomičnije realizacije, od kojih je jedna, opisana u [7], prikazana na slici Slika 1.10. Korišćenjem sinhronog komparatora, omogućava se globalna detekcija stanja svih piksela na senzoru, odnosno informacija da li je vrednost napona na odgovarajućoj fotiodiodi pala ispod vrednosti praga. Očitavanje je omogućeno između dva aktiviranja komparatora, pri čemu se za proces očitavanja koristi D flip flop, koji je povezan sa ostalim D flip flopovima u pomerački registar. Brojači kojima se obavlja proces AD konverzije se kontrolišu očitanim signalima, ali ne moraju biti integrisani unutar pojedinačnih piksela. U slučaju da neki od piksela uđe u zasićenje moguće je resetovati odgovarajuću fotiodiodu i nastaviti proces integracije.



Slika 1.10 Senzor u vremenskom domenu sa višestrukim očitavanjem [7].

Senzori sa procesiranjem u vremenskom domenu, omogućavaju veliku brzinu rada i proširen dinamički opseg, ali i dalje daju digitalne vrednosti, koje su linearno povezane

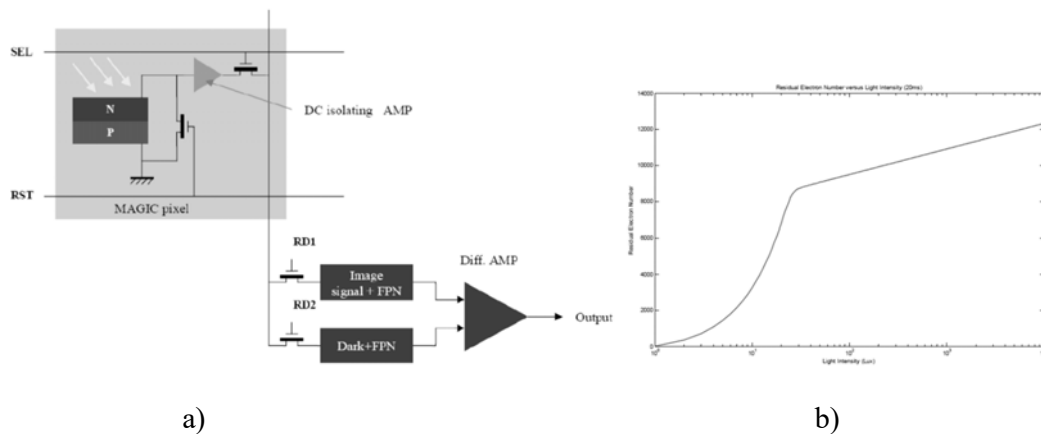
s jačinom svetla koje pada na senzor. U odeljku 1.2.3 su analizirani mehanizmi adaptacije ljudskog vizuelnog sistema, pri čemu je pokazano da je odziv na promenu osvetljaja logaritamske, odnosno stepene prirode. Zbog toga je u procesu diskretizacije za niske nivoe osvetljaja potrebno uzeti dosta mali korak, kako bi vrednost „jedva primetnih razlika“ bila unutar jednog LSB-a. S druge strane, ako se isti korak koristi za veće osvetljaje, zbog smanjene osetljivosti ljudskog vizuelnog sistema, veliki broj digitalnih vrednosti će predstavljati istu sjajnost. Zbog toga bi bilo dobro da, ukoliko je senzor namenjen za snimanje scene onako kako je percipira čovek, sam senzor ima karakteristiku koja imitira osetljivost na osvetljaj ljudskog vizuelnog sistema. Korak u ovom smeru su senzori sa logaritamskom karakteristikom osetljivosti. U senzoru čija struktura je prikazana na slici Slika 1.11 a) [8], ideja je da se koristi potpražni režim tranzistora T1. U ovom režimu napon između gejta i sorsa tranzistora logaritamski zavisi od struje drejna, što je prikazano na slici Slika 1.11 b). Ova struja zapravo predstavlja struju pražnjenja fotodiode i linearno je srazmerna jačini svetla koje pada na senzor. Dakle napon koji se očitava iz svakog piksela ima logaritamsku zavisnost od jačine svetlosti koja pada na senzor, čime se aproksimira karakteristika ljudskog vizuelnog sistema. Ovim je omogućeno postizanje širokog dinamičkog opsega uz upotrebu AD konvertora niske rezolucije (na primer 8 bita), pošto je sam proces kompresije ugrađen u karakteristiku senzora.



Slika 1.11 Senzor sa logaritamskom karakteristikom i strujnim procesiranjem [8].

Problemi sa prethodno opisanim senzorom, koji su navedeni u [9], ogledaju se u povećanom šumu koji se sada, pored tamne struje, ogleda i u struji curenja tranzistora

T1, koji radi u potpraznom režimu. Povećanje šuma može dosta narušiti osetljivost senzora i smanjiti dinamički opseg sa donje strane karakteristike. Logaritamska karakteristika senzora dodatno pojačava ovaj šum. Strukturirani šum (FPN – *Fixed Pattern Noise*) koji se javlja u ovakvim senzorima, a koji je posledica varijabilnosti procesa, varira i u zavisnosti od jačine osvetljaja i temperature, tako da ga je dosta teško kompenzovati. Zbog toga je u [9] predložen novi senzor, sa logaritamskom karakteristikom, prikazan na slici Slika 1.12 a), koji koristi merenje napona na diodi u otvorenom kolu. Ovaj napon se menja logaritamski u odnosu na struju koja je linearna funkcije osvetljenosti senzora. Najveća razlika u odnosu na prethodno rešenje je odsustvo tranzistora koji radi u potpraznom režimu, koji je i bio najveći uzrok problema i prelazak sa strujnog na naponsko procesiranje, odnosno merenje napona na diodi u otvorenom kolu. Kako bi se dodatno smanjio uticaj šuma, umesto standardne 3T strukture, koristi se 4T struktura piksela, sa dodatnim transfer tranzistorom kojim se izoluje fotodioda od dela za očitavanje. Na slici Slika 1.12 b) je prikazana zavisnost broja generisanih elektrona, u linearnoj skali, od jačine svetla koje pada na senzor, u logaritamskoj skali. Pokazuje se da je za male osvetljaje ova karakteristika približno linearna čime se izbegava pojačanje šuma, dok je za veće osvetljaje logaritamska čime se postiže kompresija dinamičkog opsega.



Slika 1.12 Senzor sa logaritamskom karakteristikom i naponskim procesiranjem [9].

1.3.2 Modifikacija LDR senzora za HDR

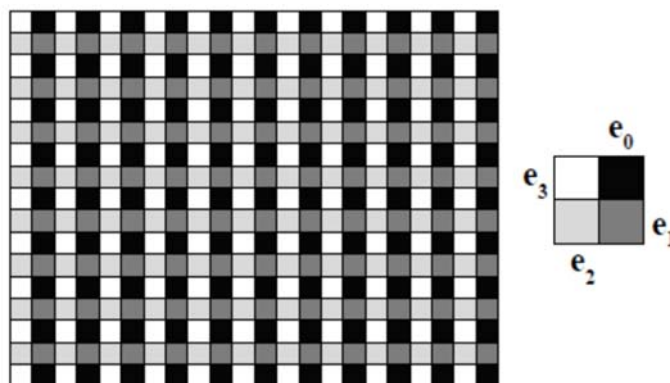
Najčešća ideja za snimanje širokog dinamičkog opsega scene, koja je pomenuta i u prethodnom odeljku, je snimanje višestrukih ekspozicija iste scene. Kratke

ekspozicije omogućavaju da se snime vrednosti jako osvetljenih piksela pre nego što uđu u zasićenje, dok duge ekspozicije omogućavaju slabo osvetljenim pikselima da generišu signal koji je dovoljno jači od nivoa šuma. Višestruko očitavanje senzora ili rad u vremenskom domenu pružaju navedenu funkcionalnost, ali zahtevaju izmenu strukture samog senzora.

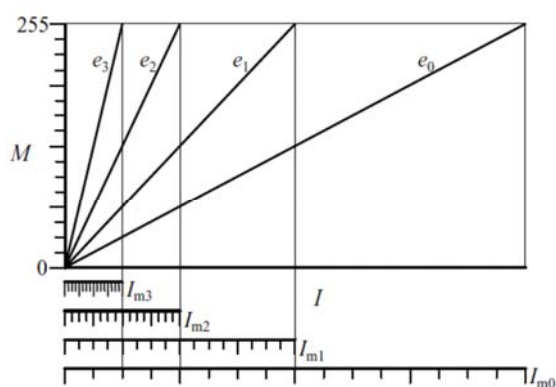
Sličan efekat je moguće postići korišćenjem standardnih senzora i eksternih elemenata, koji se postavljaju uz senzor i koji omogućavaju istovremeno snimanje više različitih ekspozicija iste scene. Slika 1.13 prikazuje jedno od prvih rešenja u ovom pravcu, koje je predstavljeno u [10]. Ideja je da se preko CMOS ili CCD senzora postavi prostorno varijabilna transmittivna rešetka koja se sastoji od neutralnih filtara i čija je struktura prikazana na slici Slika 1.13 a). Na ovaj način se postiže snimanje različitih ekspozicija istih delova scene, kontrolom jačine svetla koje pada na senzor, umesto promenom vremena ekspozicije. Zbog toga se ovi senzori nazivaju senzorima sa prostorno varijabilnim ekspozicijama – SVE (*Spatially Varying Exposure*). Ukoliko je neki deo scene osvetljen jakom svetlošću, pikseli koji odgovaraju delovima sa najvećom transmittivnošću (e_3 i e_2) će verovatno biti zasićeni. Međutim, pikseli koji odgovaraju slabijim ekspozicijama (e_1 i e_0) će u ovom slučaju najverovatnije sadržati informaciju o detaljima. Povećanje dinamičkog opsega ovakvog senzora direktno zavisi od odnosa ekspozicija, odnosno transmittivnosti filtara u mozaiku. U radu [10] korišćeni su odnosi $e_0:e_1:e_2:e_3$ 1:4:16:64 čime se dinamički opseg senzora povećava 64 puta.

Na slici Slika 1.13 b) je prikazana karakteristika za svaki od piksela u mozaiku ukoliko se za kvantizaciju koristi 8 bita. Oдавde se recimo vidi da se za intenzitete svetla koji su manji od I_{m_3} najbolja preciznost dobija iz senzorskog elementa e_3 , pošto je osetljivost na niske intenzitete svetla tu najveća. Za osvetljaje većih intenziteta ovaj senzorski element će biti zasićen, pa samim tim i neupotrebljiv, zbog čega se za rekonstrukciju koristi informacija iz ostalih elemenata. Kombinovana karakteristika odziva nakon rekonstrukcije na celom podržanom dinamičkom opsegu, prikazana na slici Slika 1.13 c). Ona pokazuje da iako je za svaki od senzorskih elemenata korišćena uniformna kvantizacija od 8 bita, rekonstruisana slika predstavlja neuniformno kvantizovane osvetljaje koji se mogu predstaviti sa ukupno 10 bita. Pri tome je za niske vrednosti osvetljaja korišćen manji korak, dok su veći osvetljaji grublje kvantizovani. Ovo je svakako pogodna karakteristika kojom se postiže ušteda u broju bita a u skladu je sa

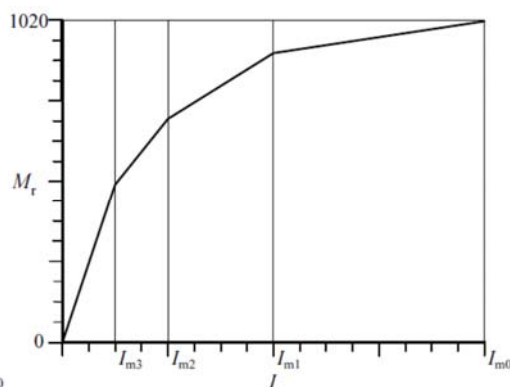
ljudskom percepcijom „jedva primetnih razlika“.



a)



b)



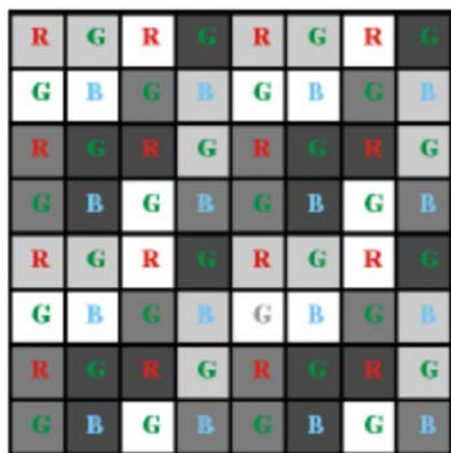
c)

Slika 1.13 Senzor sa prostorno varijabilnom ekspozicijom [10].

Problem sa prethodno opisanim rešenjem je 4 puta smanjena prostorna rezolucija. U [10] su opisana dva načina za postizanje pune rezolucije iz ovakvog mozaika. Prvi uključuje prosto usrednjavanje prostornom maskom dimenzija 2x2, dok drugi pristup uključuje nešto složeniji postupak interpolacije, koji daje bolje karakteristike u okolini ivica.

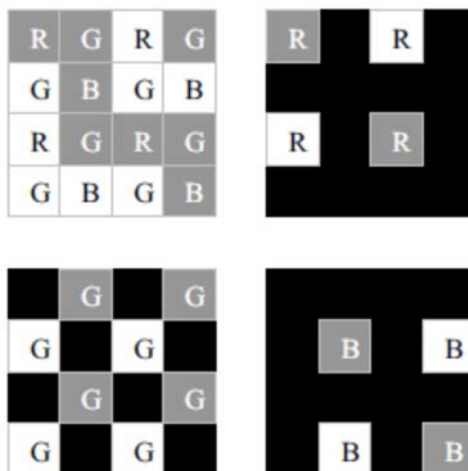
Problem smanjene prostorne rezolucije je posebno uočljiv ako se opisani pristup koristi za akviziciju slika u boji, gde se koristi Bajerov mozaik. Naime, sam Bajerov mozaik podrazumeva da se slika u boji snima tako što se iznad senzorskih elemenata postavlja mozaik filtara R, G i B kojima se izdvajaju odgovarajuće komponente spektra. Međutim, na ovaj način se gubi prostorna rezolucija pošto svaki piksel snima samo jedan deo spektra i potrebno je primeniti posebne metode za rekonstrukciju

(*demosaieking*) kako bi se dobile R, G i B slike pune rezolucije. Iako deluje da se ovaj problem može rešiti običnom interpolacijom nedostajućih informacija, problem nastaje kod oštih prelaza i ivica i ogleda se u curenju boja. Problem rekonstrukcije je dodatno zakomplikovan uvođenjem prostorno varijabilne transmitivne maske kod SVE senzora, što je prikazano na slici Slika 1.14. Sada su pikseli koji pripadaju istim ekspozicijama i istim komponentama boje dosta udaljeni i postoji mnogo više informacija koje je potrebno rekonstruisati. Naravno, komponente mozaika koje pripadaju istoj komponenti boje ali različitoj ekspoziciji se mogu kombinovati, s obzirom da predstavljaju isti osvetljaj scene. Problem nastaje kada su senzorski elementi koji odgovaraju ekstremnim ekspozicijama e_0 i e_3 zasićeni što je čest slučaj u tamnim i svetlim delovima scene.



Slika 1.14 Kombinovanje SVE senzora sa Bajеровim mozaikom. Slika iz [11].

Kako bi se olakšao proces rekonstrukcije slike sa SVE senzora u boji u [11] je predložen novi mozaik koji omogućava istovremeno snimanje 2 ekspozicije ali značajno smanjuje udaljenost između isto eksponiranih piksela, što je i prikazano na slici Slika 1.15. Ovim se proces rekonstrukcije znatno pojednostavljuje.

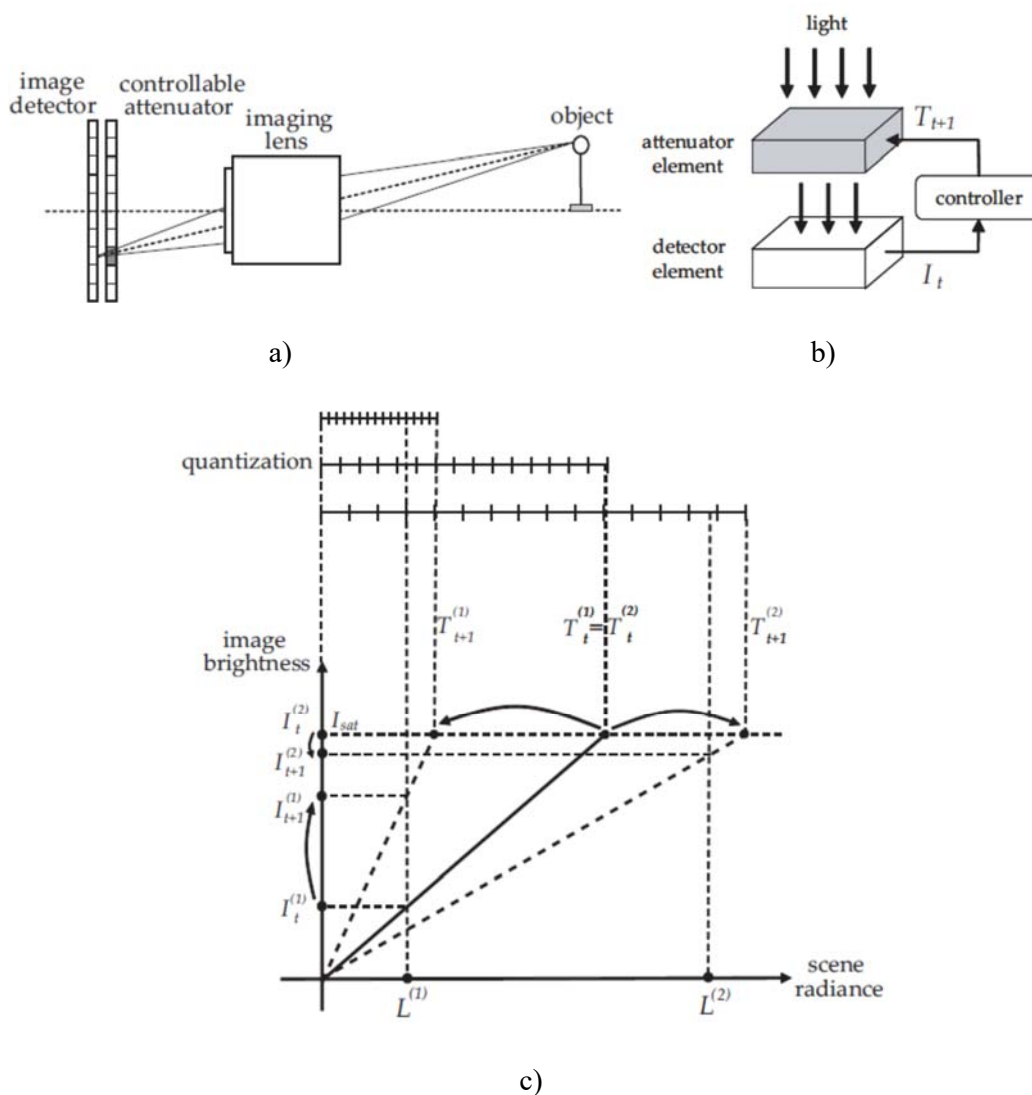


Slika 1.15 SVE mozaik sa dve različite ekspozicije [11].

Prethodno opisana rešenja podrazumevaju transmitivnu rešetku unapred zadate strukture koja se ne može menjati u toku vremena. Problem ovog pristupa je značajno smanjenje prostorne rezolucije u regionima sa ekstremnim vrednostima osvetljaja. Naime, u svetlim delovima scene jedino će pikseli koji se nalaze ispod filtera najmanje transmitivnosti nositi informaciju o detaljima dok će ostali pikseli biti zasićeni. Na ovaj način je, u tim delovima scene, rezolucija SVE senzora smanjena 4 puta za rešenje opisano u [11] i čak 16 puta za rešenje opisano u [10].

Postavlja se pitanje da li je moguće adaptivno menjati karakteristike filtera u zavisnosti od jačine svetla. Cilj je da se, na primer, u svetlim delovima scene smanji transmitivnost za sve piksele u Bajеровom mozaiku. Na taj način se izbegava zasićenje, a ne smanjuje se prostorna rezolucija senzora. Jedno ovakvo rešenje je predstavljeno u [12] i prikazano na slici Slika 1.16. Ideja je da se uz senzor postavi rešetka prostornog svetlosnog modulatora (SLM – *Spatial Light Modulator*), čija se transmitivnost može kontrolisati jačinom električnog polja i u opisanom radu je u ovu svrhu korišćen tečni kristal. Kontrola transmitivnosti filtera se obavlja u realnom vremenu na osnovu vrednosti snimljenih piksela, a u cilju postizanja što optimalnije ekspozicije. Na slici Slika 1.16 c) je prikazana promena ekspozicije za svetle i tamne piksele. Puna linija predstavlja ekspoziciju u trenutku t dok su isprekidane linije ekspozicije u trenutku $t+1$. Za piksel koji je osvetljen jačinom svetla $L^{(1)}$ inicijalna ekspozicija je dala odziv $I_t^{(1)}$. Kako je ovaj odziv dosta mali, korak kvantizacije koji je korišćen u ovoj ekspoziciji je neprimereno veliki. Zbog toga je u narednom koraku transmitivnost filtera povećana

čime se nagib prave eksponiranosti povećao, odnosno korak kvantizacije se smanjio. U slučaju da je osvetljaj koji se snima previše intenzivan za trenutnu ekspoziciju, na izlazu će se dobiti zasićena vrednost, što je znak da je potrebno smanjiti transmitivnost filtera na toj poziciji.



Slika 1.16 Senzor sa adaptivnom kontrolom ekspozicije [12].

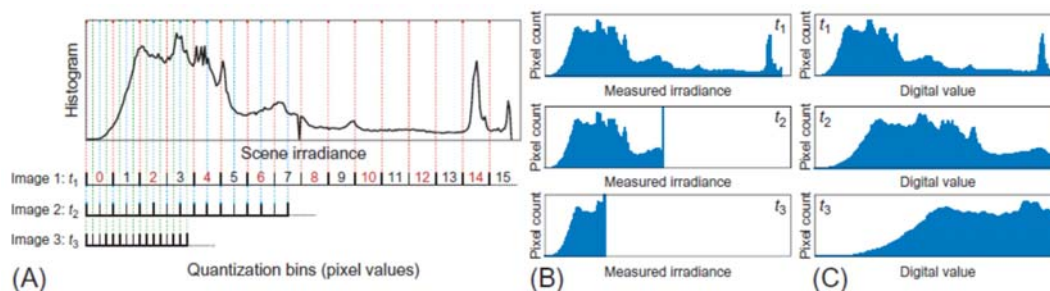
Iako rešava problem gubitka prostorne rezolucije u tamnim i svetlim delovima scene, opisano rešenje je dosta problematično za realizaciju. Naime struktura sa slike Slika 1.16 a) je problematična za integraciju u kamera sitem, pošto se često rešetka svetlosnog modulatora ne poklapa idealno sa rešetkom piksela senzora, što usled difrakcije može dovesti do brojnih artefakata u konačnoj slici. Zbog toga je u prototipu svetlosni

modulator postavljen ispred sočiva kamere. Sada je međutim kontrola otežana pošto svaki element modulatora, zbog rasipanja sočiva, utiče na više piksela senzora.

1.3.3 Korišćenje LDR senzora za akviziciju HDR scene

Iako hardverska rešenja opisana u prethodna dva odeljka predstavljaju budućnost akvizicije HDR scena, danas su i dalje najpopularnije tehnike koje koriste standardne LDR senzore. Ove tehnike se mogu primeniti na sve postojeće LDR uređaje u cilju snimanja celokupnog opsega osvetljaja scene.

Problem snimanja HDR scene pomoću LDR senzora predstavljen je na slici Slika 1.17. Celokupni opseg osvetljaja se može snimiti dovoljno dugačkom ekspozicijom, trajanja t_1 na slici Slika 1.17. Problem je što je u LDR slici, za ovako dugačku ekspoziciju korak kvantizacije prevelik da predstavi detalje u tamnim regionima scene. Važno je napomenuti da ovaj problem ne može biti rešen povećanjem rezolucije AD konvertora, pošto je minimalan korak koji ima smisla koristiti limitiran pragom šuma senzora. Detalje koji se nalaze u tamnijim delovima scene moguće je snimiti povećanjem vremena ekspozicije (vremena t_2 i t_3 na slici Slika 1.17). U ovim slikama će deo scene koji pripada svetlim regionima biti zasićen, dok se ostatak scene kvantizuje korišćenjem dostupnog broja bita. Na taj način je korak osvetljaja koji je predstavlja razliku između dva susedna digitalna podatka znatno manji odnosno detalji u tamnijim regionima scene su bolje predstavljeni. Ovo se može posmatrati i iz ugla da je povećanjem vremena ekspozicije, povećana jačina signala odnosno povećan je odnos signal šum SNR (*Signal to Noise Ratio*).



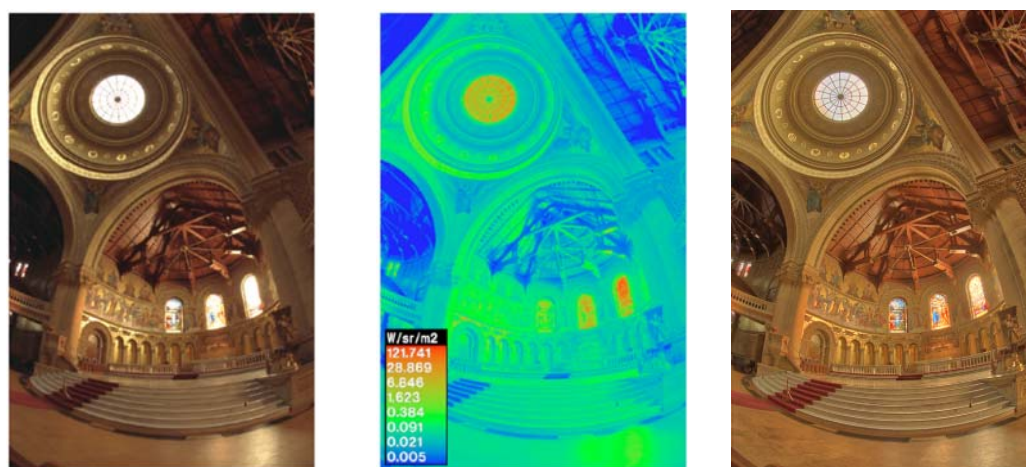
Slika 1.17 Problem kvantizacije prilikom snimanja HDR scene korišćenjem LDR senzora [13].

Slika 1.18 predstavlja skup od 16 različito eksponiranih slika Memorijalne crkve u

Stanfordu, koja je korišćena za eksperimente u jednom od pionirskih radova iz ove oblasti [14]. Slike su snimljene menjanjem ekspozicije u opsegu od 0.001s do 30s. Sunce direktno osvetljava vitraže crkve i zbog toga ova scena ima izuzetno širok dinamički opseg.



Slika 1.18 Skup od 16 različito eksponiranih LDR slika koje su korišćene za snimanje celokupnog osvetljaja scene [14].



a)

b)

c)

Slika 1.19 Najbolje eksponirana LDR slika a), vrednosti osvetljaja scene dobijene rekonstrukcijom iz niza LDR slika b), HDR slika mapirana u opseg vrednosti LDR monitora uz očuvanje detalja c) (korišćen je algoritam predstavljen u disertaciji).

Slika 1.19 a) prikazuje optimalnu LDR ekspoziciju kojom je snimljeno najviše detalja na sceni. Iako je unutrašnjost crkve prilično dobro snimljena, primećuje se da su delovi u senci bez detalja, odnosno da su se utopili u šum, dok su detalji na prozorima nestali, pošto je senzor u tom regionu ušao u zasićenje. Ovo je posledica širokog dinamičkog opsega scene, koji iznosi oko 25000 [14]. Kritični regioni se najbolje mogu uočiti u

mapi osvetljenosti koja je predstavljena na slici Slika 1.19 b). Ovde se vidi da oblasti prozora imaju najveće, dok detalji u drugom delu crkve imaju najmanje vrednosti osvetljaja. Potrebno je naglasiti da, nakon snimanja, nije moguće značajno poboljšati dobijenu LDR sliku, nekim od metodama za popravku kontrasta. Naime, SNR u tamnim regionima LDR slike je dosta nizak, zbog koraka kvanitizacije i šuma senzora, tako da bi isticanje kontrasta u ovim regionima samo pojačalo šum. S druge strane u svetlim regionima senzor je ušao u zasićenje pri čemu su svi detalji odsečeni i nije ih moguće rekonstruisati. Međutim, u skupu ekspozicija predstavljenih na slici Slika 1.18, za svaki region slike moguće je naći bar jednu, a uglavnom i više, ekspozicija na kojima su detalji u tom regionu adekvatno predstavljeni. To znači da ovaj skup LDR ekspozicija sadrži dovoljno informacija za rekonstrukciju kompletne HDR mape osvetljaja scene. U rekonstruisanoj HDR slici, prikazanoj na slici Slika 1.19 b), SNR u svetlim i tamnim regionima je dovoljno visok tako da se mogu uočiti relevantni detalji. Ovo baca novo svetlo na proces kreiranja HDR slike, koji se može posmatrati i kao proces kojim se povećava SNR slike. Kako bi se mapa osvetljaja uspešno prikazala na displeju potrebno je primeniti neki od operatora za reprodukciju HDR slika. Slika 1.19 c) predstavlja HDR scenu na koju je primenjen lokalni operator za reprodukciju HDR slika uz očuvanje detalja. Više detalja o problemu prikaza HDR slika biće dato u narednim odeljcima. Ovde je samo interesantno uporediti slike Slika 1.19 a) i c) po nivou detalja, pogotovo u tamnim i svetlim delovima scene. Uočava se da reprodukovana mapa osvetljaja ima značajno više detalja u tamnim regionima scene, dok je u svetlim regionima u velikoj meri izbegnuto zasićenje, tako da je moguće uočiti detalje na prozorima crkve.

Pitanje koje se u ovom trenutku postavlja je na koji način je moguće od niza LDR slika, različitih ekspozicija, predstavljenih na slici Slika 1.18, rekonstruisati HDR mapu osvetljaja scene, prikazanu na slici Slika 1.19 b).

Posmatrajmo skup od N različito eksponiranih slika iste scene. Označimo ove slike sa Z_i i njihova vremena ekspozicije sa t_i gde $i \in [1, N]$. Neka je osvetljenost scene (iradijansa) jednaka E . Ukoliko je digitalna vrednost $Z_i(p)$ piksela p , linearno srazmerna osvetljenosti $E(p)$ i vremenu ekspozicije t_i , dobija se da za sve nezasićene piksele važi:

$$Z_i(p) = E(p) \cdot t_i \quad (2.3.1)$$

Odavde se lako može odrediti osvetljenost prostim deljenjem izlazne digitalne vrednosti vremenom ekspozicije. Ukoliko je određeni piksel zasićen ili ako je izlazna vrednost suviše zašumljena, pomoću izraza (2.3.1) nije moguće odrediti osvetljenost u toj tački. Međutim, ako je skup LDR slika takav da je svaki deo scene snimljen sa dovoljno velikim odnosom signal šum, za svaku poziciju p postoji slika u skupu, iz koje se može proceniti vrednost osvetljaja na toj poziciji. Kako bi se dobila što bolja procena, potrebno je iskoristi što je moguće više dostupnih LDR slika iz skupa, pri čemu se procene osvetljaja dobijene iz različitih slika usrednjavaju. Procena osvetljaja E je označena sa $\tilde{E}$. Ovaj postupak je definisan izrazom:

$$\tilde{E}(p) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(p) \frac{Z_i(p)}{t_i}}{\sum_{i=1}^N w_i(p)} \quad (2.3.2)$$

gde je $w_i(p)$ težinski faktor za osvetljenost na poziciji p koja je procenjena iz ekspozicije i . Svrha ovog težinskog faktora je da smanji uticaj loših procena, koje su posledice zasićenih piksela ili piksela sa veoma niskim odnosom signal šum.

Iako deluje kao konceptualno veoma jednostavno rešenje u praksi postoji niz problema koje je potrebno rešiti. Najznačajniji problemi koji se javljaju prilikom generisanja HDR slike iz niza LDR slika su:

- 1) Kompenzacija pomeraja kamere i objekata na sceni
- 2) Kompenzacija nelinearnog odziva kamere
- 3) Određivanje težinskih faktora prilikom usrednjavanja

U nastavku će svaki od ovih problema biti posebno opisan.

1.3.3.1 Kompenzacija pomeraja kamere i objekata na sceni

Prvi problem se odnosi na pretpostavku da su merenja dobijena na lokaciji p , u svakoj od ekspozicija, u stvari merenja istog osvetljaja, pri čemu je korišćena različita ekspozicija. Ova pretpostavka je ključna za proces rekonstrukcije koji se realizuje izrazom (2.3.2). Međutim, navedena pretpostavka važi jedino u slučaju da se osvetljaj scene ne menja tokom snimanja, da je kamera idealno statična i da su svi objekti na

sceni idealno statični. U praksi ovi uslovi skoro nikada nisu ispunjeni i potrebno je, pre rekonstrukcije osvetljaja, uraditi poravnanje svih slika, tako da se kompenzuje pomeraj kamere tokom snimanja. Kompenzacija pomeraja se obavlja nekim od algoritama za poravnanje slika. Ovi algoritmi se obično dele u dve grupe u zavisnosti da li koriste ili ne koriste karakteristična obeležja.

Prva grupa algoritama se oslanja na izdvajanje karakterističnih elemenata slike kao što su ivice, ćoškovi i sl. i definisanje obeležja koja su invarijantna u odnosu na translaciju, rotaciju, skaliranje i sl. Nakon toga, se obavlja uparivanje obeležja na dve slike koje se poravnavaju i iz njihovog relativnog položaja se određuje transformaciona matrica. U zavisnosti od modela deformacije koji se koristi algoritmi za poravnanje mogu obavljati kompenzaciju translacionih pomeraja, rotacije ili uključivati afine transformacije.

Druga grupa algoritama obično podrazumeva dosta precizniju procenu pomeraja. Ideja je da se za svaki piksel određuje poseban vektor pomeraja koji dovodi do što boljeg poklapanja dve slike. U ovu grupu spadaju algoritmi koji se baziraju na estimaciji pokreta i optičkom toku (*optical flow*). Kako bi se postigla dobra konvergencija uz izbegavanje lokalnih minimuma i povećanje efikasnosti izračunavanja, ove metode obično koriste hijerarhijski, odnosno multirezolucijski pristup.

Dobar pregled algoritama za poravnanje slika, kao i primer aplikacija u kojima se koriste, može se pronaći u [15].

Iako se algoritmi za poravnanje mogu, u većini slučajeva, uspešno izboriti sa pomerajima kamere, osatju problemi usled lokalnih pomeraja u sceni. Naime, ukoliko se obavi usrednjavanje skupa slika, nakon kompenzacije pomeraja kamere, bez uzimanja u obzir lokalnog kretanja, dobijaju se rezultati prikazani na slici Slika 1.20. Može se uočiti da je, zbog pomeraja objekata prilikom usrednjavanja, došlo do stapanja objekata i pozadine, zbog čega pokretni objekti u rezultujućoj slici deluju providno, kao duhovi, po čemu je ovaj efekat i dobio ime.



a)

b)

c)

Slika 1.20 Problem “duhova” koji nastaje usled lokalnog kretanja na sceni [16].

Postoji više načina za rešavanje problema “duhova” (*deghosting*) i uglavnom se baziraju na jednoj od dve navedene strategije:

- 1) Odbacivanje regiona u kojima je detektovano lokalno kretanje
- 2) Kompenzacija pokreta nastalog usled lokalnog kretanja

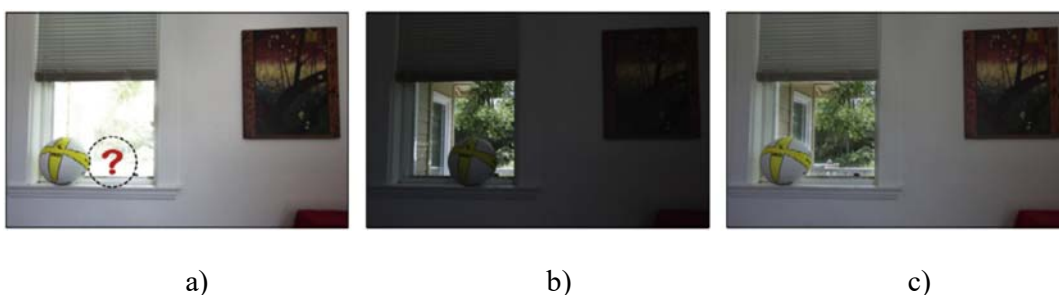
Prva grupa algoritama podrazumeva detekciju lokalnog kretanja i smanjenje težina $w_i(p)$, u izrazu (2.3.2), onim ekspozicijama u kojima je detektovano lokalno kretanje u okolini piksela p . Na taj način se problematični delovi scene isključuju iz usrednjavanja, čime se izbegava problem “duhova”. Algoritmi iz ove grupe su najjednostavniji, međutim imaju lošu osobinu da, usled odbacivanja, ne koriste sve informacije koje su dostupne u snimljenim slikama. Zbog toga, ovi algoritmi, imaju ograničenu mogućnost povećanja odnosa signal šum u scenama u kojima postoji značajnije lokalno kretanje.

Druga grupa algoritama se uglavnom bazira na estimaciji pomeraja za svaki pojedinačni piksel. U ovom slučaju se usrednjavanje ne obavlja po pikselima koji se nalaze na istim prostornim lokacijama u svim ekspozicijama, već se za svaki piksel u referentnoj slici traži, na osnovu vektora pomeraja, odgovarajući piksel u ostalim slikama i onda se on koristi za usrednjavanje. Na taj način se mnogo manje snimljenih piksela odbacuje, čime se poboljšava odnos signal šum rezultujuće slike.

Iako imaju dosta bolje karakteristike u odnosu na algoritme koji su bazirani na odbacivanju, algoritmi bazirani na kompenzaciji lokalnih pokreta ne mogu da se izbore sa problemom okluzije. Okluzija nastaje kada neki delovi referentne scene nisu prisutni u ostalim ekspozicijama, pošto su zaklonjeni pokretnim objektom. Slika 1.21 ilustruje ovaj problem. Ovde su za snimanje širokog dinamičkog opsega scene korišćene dve LDR fotografije. Na duže eksponiranoj slici, prikazanoj na slici Slika 1.21 a) vidi se

unutrašnjost sobe, dok je spoljašnost, pogled kroz prozor, potpuno zasićena. Na kraće eksponiranoj slici, prikazanoj na slici Slika 1.21 b) spoljašnost se vidi dosta dobro. Prilikom kreiranja HDR slike, informacije koje su zasićene na dugo eksponiranoj fotografiji (slika Slika 1.21 a)) bile bi uzete sa kratko eksponirane fotografije (slika Slika 1.21 b)). Međutim, na kratko eksponiranoj fotografiji, veliki deo prozora je zaklonjen loptom, što onemogućava rekonstrukciju osvetljenosti piksela koji se nalaze u tom delu scene (na dugo eksponiranoj fotografiji ovi pikseli su zasićeni, a na kratko eksponiranoj su zaklonjeni pokretnim objektom). Ovaj problem se naziva problem okluzije ili zaklanjanja i značajno otežava, a u nekim slučajevima i onemogućava rekonstrukciju HDR scene u prisustvu lokalnog kretanja.

Detaljan pregled i analiza algoritama kojima se rešava problem rekonstrukcije HDR scene u prisustvu lokalnog kretanja može se naći u [16].



Slika 1.21 Problem okluzije koji nastaje usled lokalnog kretanja na sceni [13].

1.3.3.2 Kompenzacija nelinearnog odziva kamere

Druga pretpostavka, koja je uvedena, je da su vrednosti piksela u LDR slikama linearno srazmerne osvetljaju koje pada na senzor. Naime, iako senzori koji su danas dominantno u upotrebi (CMOS i CCD) generišu signal koji je linearno srazmeran osvetljenosti senzora, proizvođači kamera transformišu ovaj signal nekom nelinearnom funkcijom, pre nego što generišu finalne vrednosti izlaznih piksela. Razlog za ovako nečim može se pronaći u odeljku 1.2.3, odnosno u nelinearnosti odziva ljudskog vizuelnog sistema na promenu osvetljaja. Naime, u tamnim regionima scene, zbog adaptacije na niži nivo osvetljaja, ljudsko oko može da uoči manje promene nego u svetlim delovima scene. Zbog toga je potrebna vrednost koraka kvantizacije mnogo manja u tamnim nego u svetlim delovima scene. Kako bi se postigao što bolji kvalitet na izlazu, korišćenjem uniformne kvantizacije sa što manjim brojem bita (obično 8 u

standardnim sistemima), izlazne vrednosti piksela se transformišu nelinearnom funkcijom, koja ima oblik stepena ili logaritamske funkcije. Drugi razlog je popravka kontrasta, kako bi se postigao što bolji subjektivni utisak finalne slike. Upravo ovaj drugi razlog kao i potreba za diferenciranjem na tržištu, dovodi do toga da različiti uređaji koriste različitu nelinearnu funkciju. Pri tome, proizvođači kamera, kako bi se zaštitili od konkurencije, obično kriju koju funkciju koriste za transformaciju linearnih piksela u nelinearne vrednosti pre kvantizacije. Uključivanjem nelinearne funkcije $f()$ u izraz (2.3.1) dobija se:

$$Z_i(p) = f(E(p) \cdot t_i) \quad (2.3.3)$$

Zbog toga je sada, pre rekonstrukcije HDR scene, potrebno „linearizovati“ vrednosti piksela u LDR slikama, primenom inverzne funkcije odziva kamere $f^{-1}()$, čime se izraz (2.3.2) transformiše u:

$$\tilde{E}(p) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(p) \frac{f^{-1}(Z_i(p))}{t_i}}{\sum_{i=1}^N w_i(p)} \quad (2.3.4)$$

Sada se postavlja pitanje, na koji način se može na osnovu skupa LDR slika, različitih ekspozicija, proceniti funkcija nelinearnog odziva kamere.

Ovde je potrebno uočiti da, prilikom snimanja osvetljaja scene, za vrednosti piksela u linearnom domenu, pre primene nelinearne funkcije odziva kamere, važi princip reciprociteta između intenziteta osvetljaja i dužine trajanja ekspozicije. Naime, ista vrednost linearnog piksela se može dobiti u slučaju k puta manjeg intenziteta osvetljaja, ako se vreme snimanja poveća k puta. Ovo tvrđenje sledi direktno iz izraza (2.3.1). Zbog toga je, ukoliko nije poznata apsolutna vrednost ekspozicije za svaku sliku, već samo relativni odnos ekspozicija, vrednosti osvetljenosti moguće rekonstruisati do na multiplikativnu konstantu.

Jedan od prvih postupaka esitmacije nelinearne funkcije odziva kamere, predložen je u [14] i prikazan je na slici Slika 1.22. Naime, ideja je da se na svakoj od slika odabere određeni broj pogodnih piksela, čija se digitalna vrednost posmatra kroz sve slike iz skupa. Pogodni su oni pikseli, koji se nalaze u što uniformnijem regionu, pošto je

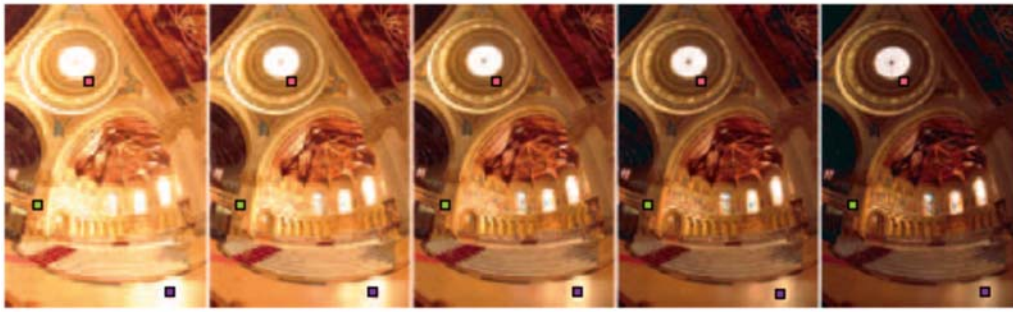
pretpostavka da se u ovim regionima osvetljaj scene ne menja kroz ekspozicije. Takođe, bitno je odabrati piksele sa što raznovrsnijim vrednostima osvetljaja, kako bi se rekonstruisalo što više delova nelinearne funkcije odziva kamere. Na slici Slika 1.22 a) prikazano je pet različito eksponiranih LDR slika i označena su tri pogodno odabrana piksela (crveni, zeleni i plavi). Digitalne vrednosti za ova tri piksela, kroz svih pet ekspozicija, prikazane su na slici Slika 1.22 b). Pošto se pretpostavlja da se intenzitet osvetljaja E ne menja tokom snimanja, jedina razlika koja dovodi do promene digitalne vrednosti je promena vremena ekspozicije. Odnos između ekspozicija slika iz skupa je poznat i može se iskoristiti za iscrtavanje dijagrama prikazanog na slici Slika 1.22 b). Ovde je interesantno uočiti da skup vrednosti za svaki od piksela, kroz različite ekspozicije, predstavlja jedan deo nelinearne funkcije odziva kamere. Posmatranjem više piksela različitih osvetljaja, mogu se snimiti različiti delovi ove funkcije. Problem koji sada nastaje je taj, da s obzirom da nisu poznate apsolutne vrednosti osvetljaja scene, nije poznato na koji način se ovi delovi nelinearne funkcije uklapaju u jedinstvenu celinu. Kako bi rešili ovaj problem, autori u [14] su predložili optimizacioni postupak, kojim se određuju konačni odbirci inverzne funkcije $f^{-1}()$. Invertovanjem funkcije odziva kamere i primenom logaritma na obe strane jednačine (2.3.3) dobija se:

$$g(Z_i) = \ln f^{-1}(Z_i) = \ln E + \ln t_i \quad (2.3.5)$$

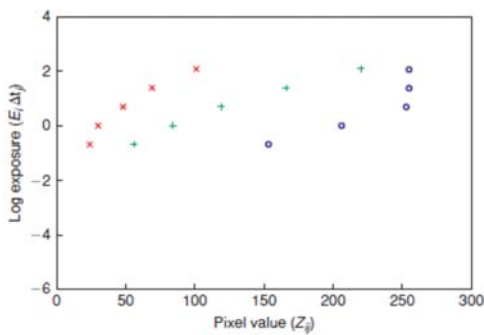
Funkcija koja je korišćena u optimizacionom procesu u [14] definisana je kao:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{p \in Z_i} \left[g(Z_i(p)) - \ln E(p) - \ln t_i \right]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{\min}+1}^{Z_{\max}-1} g''(z)^2 \quad (2.3.6)$$

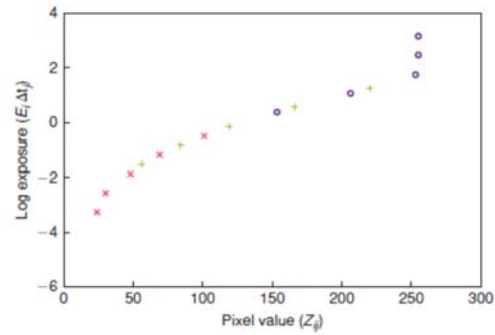
Cilj autora u [14] je bio da odrede diskretnu funkciju odziva kamere za konačan skup digitalnih vrednosti $z \in [Z_{\min}, Z_{\max}]$. Drugi član u izrazu (2.3.6) nameće uslov da izlazna funkcija $g()$ bude glatka. Kako je definisana kriterijumska funkcija kvadratna, problem se svodi na problem najmanjih kvadrata i lako se rešava. Konačni oblik krive $g()$ nakon optimizacije prikazan je na slici Slika 1.22 c).



a)



b)



c)

Slika 1.22 Estimacija nelinearne funkcije odziva kamere [14]. Slike preuzete iz [2].

Analitički oblik funkcije odziva kamere, može se odrediti ako se uvedu neke dodatne pretpostavke. Naime, autori u [17] su analizirali inverzne nelinearne funkcije odziva za veliki broj različitih kamera i zaključili su da ove funkcije nemaju egzotične oblike, kao i da se mogu veoma dobro predstaviti polinomijalnim funkcijama oblika:

$$f^{-1}(M) = \sum_{n=0}^N c_n M^n \quad (2.3.7)$$

Ako se posmatraju pikseli na lokaciji p u dve susedne ekspozicije q i $q+1$ i ako se posmatra izraz (2.3.3) dobija se da važi [17]:

$$\frac{f^{-1}(Z_q(p))}{f^{-1}(Z_{q+1}(p))} = \frac{E(p) \cdot t_q}{E(p) \cdot t_{q+1}} = R_{q,q+1} \quad (2.3.8)$$

gde je $R_{q,q+1}$ odnos vremena ekspozicije dve susedne slike iz skupa. Zamenom izraza (2.3.7) u (2.3.8) dobija se:

$$\frac{\sum_{n=0}^N c_n Z_q(p)^n}{\sum_{n=0}^N c_n Z_{q+1}(p)^n} = R_{q,q+1} \quad (2.3.9)$$

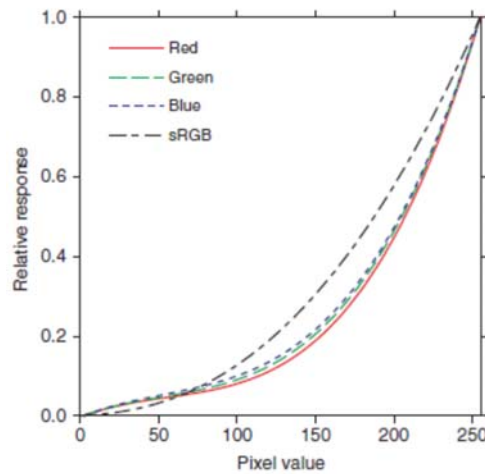
Kriterijumska funkcija koja se koristi pri optimizaciji u [17] je definisana kao:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \sum_{p \in Z_i} \left[\sum_{n=0}^N c_n Z_i(p)^n - R_{i,i+1} \sum_{n=0}^N c_n Z_{i+1}(p)^n \right]^2 \quad (2.3.10)$$

Koeficijenti traženog polinoma se nalaze rešavanjem sistema linearnih jednačina koji proizilazi iz zahteva [17]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_n} = 0 \quad (2.3.11)$$

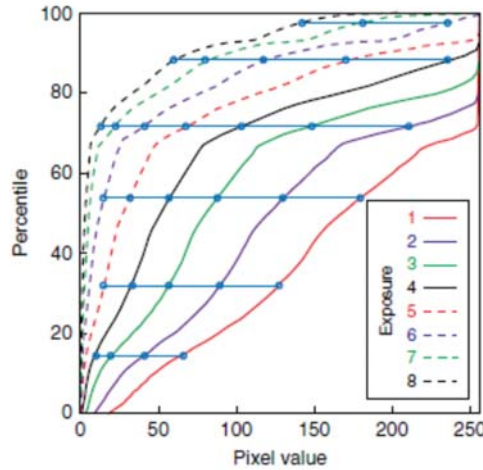
Slika 1.23 prikazuje inverzne nelinearne funkcije odziva dobijene korišćenjem polinomijalnog modela.



Slika 1.23 Estimacija nelinearne funkcije odziva kamere, korišćenjem polinomijalnog modela [17]. Slike preuzete iz [2].

Postupak izbora pogodnih tačaka koje se koriste prilikom estimacije nelinearnog odziva kamere, može značajno uticati na kvalitet estimacije. Takođe, greške usled nedovoljno dobrog poravnanja LDR slike ili usled lokalnih pomeraja, mogu dovesti do pogrešnih odbiraka, koji mogu narušiti proces estimacije. Kako bi se ovi problemi izbegli, a sam proces estimacije učinio efikasnijim, autori u [18] su predložili da se umesto pojedinačnih piksela posmatraju kumulativni histogrami. Na ovaj način se suzbijaju

problem koji mogu nastati lošim odabirom kandidata, kao i uticaji pomeraja kamere ili lokalna kretanja objekata. Ovaj postupak je prikazan na slici Slika 1.24 i može se koristiti u kombinaciji sa bilo kojim prethodno opisanim postupkom estimacije.



Slika 1.24 Korišćenje kumulativnih histograma za određivanje karakterističnih tačaka [18]. Slike preuzete iz [2].

1.3.3.3 Određivanje težinskih faktora prilikom usrednjavanja

Nakon poravnanja slika i estimacije inverzne nelinearne funkcije odziva kamere, može se proceniti osvetljaj u svakoj tački scene težinskim usrednjavanjem (2.3.4). Ostalo je još da se odrede težinski faktori $w_i(p)$. Svrha ovih težinskih faktora je da se potisnu procene osvetljenosti koje unose veliku grešku, kako zbog zasićenja, tako i zbog velikog uticaja šuma. Debevec i Malik su u svom pionirskom radu [14] primetili, da se najveća greška unosi kod vrednosti koje se nalaze na krajevima opsega, kvantizovanog digitalnog signala. Previše velike vrednosti se približavaju zasićenju, dok je kod malih vrednosti dominantan uticaj šuma. Zbog toga su predložili jednostavnu funkciju, koja najveće težine daje onim digitalnim vrednostima koje se nalaze na sredini opsega i linearno opada ka krajevima:

$$w(p) = \begin{cases} p - Z_{\min} & , p \leq \frac{1}{2}(Z_{\min} + Z_{\max}) \\ Z_{\max} - p & , p > \frac{1}{2}(Z_{\min} + Z_{\max}) \end{cases} \quad (2.3.12)$$

Autori u [17] su predložili, da se veće težina dodeljuju pikselima kod kojih je promena nelinearna funkcije kamere najveća, odnosno gde je funkcija najosetljivija. U ovim

digitalnim vrednostima signal je najviše istaknut, pa je samim tim i odnos signal šum najveći. U skladu sa tim su definisali težine pri usrednjavanju kao:

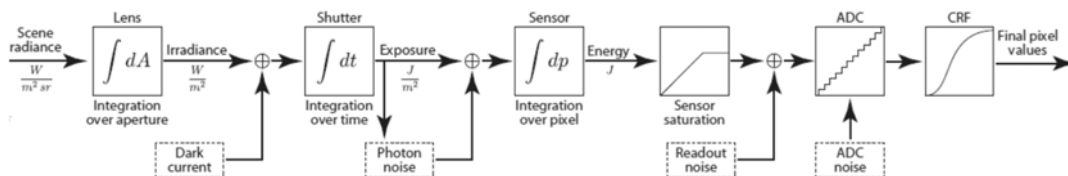
$$w(p) = \frac{g(p)}{g'(p)} \quad (2.3.13)$$

Interesantno je primetiti iz izraza (2.3.13), da se veće težine daju većim vrednostima piksela, pošto je tu uticaj šuma manji. Međutim, kako se približava kraju opsega i kako funkcija odziva kamere ulazi u zasićenje, inverzna funkcija postaje vertikalna a njen izvod jako veliki, što smanjuje težine pikselima u ovom regionu.

Uticaj različitih tipova šuma, koji se dodaju tokom akvizicije slike, na određivanje težina prilikom rekonstrukcije HDR osvetljaja scene, detaljno je analiziran u [19]. Proces akvizicije digitalne slike sa izvorima šuma prikazan je slici Slika 1.25.

Šumovi koji se javljaju tokom akvizicije digitalne slike su sledeći:

- **Šum sačme fotona** (PSN – *Photon Shot Noise*) koji se javlja kao posledica statističke prirode dolaska fotona na senzor. Ovaj proces prati Poasonovu raspodelu. To znači da je varijansa jednaka srednjem broju prikupljenih fotona. Odnosno, ukoliko je srednji broj prikupljenih fotona za vreme ekspozicije t_i $X_i = E \cdot t_i$, dobija se da je odnos signal šum jednak $\sqrt{X_i}$, odnosno što je veći signal to je veći i odnos signal šum.
- **Šum sačme tamne struje** (DCSN – *Dark Current Shot Noise*) se javlja kao posledica elektrona koji nisu generisani prijemom fotona već kao posledica termalne energije. Količina ovih fotona, a samim tim i jačina šuma, zavise od vremena ekspozicije, temperature senzora i sl.
- **Šum očitavanja senzora** predstavlja zbirni naziv za šum koji unose elektronska kola, kao što su pojačavači signala, AD konvertor i sl.
- **Prostorna neuniformnost osetljivosti senzora** (PRNU – *Photo Response Non Uniformity*) predstavlja šum koji se javlja kao posledica prostornih varijacija osetljivosti piksela na senzoru.
- **Prostorna neuniformnost tamne struje** (DCNU – *Dark Current Non Uniformity*) predstavlja šum koji se javlja kao posledica prostornih varijacija karakteristika senzora koje dovode do varijacije vrednosti tamne struje.



Slika 1.25 Izvori šuma prilikom akvizicije digitalne slike [13].

Uzimajući u obzir sve ove izvore šuma kao i njihov intenzitet, autori u [19] su formulisali statistički model, koji omogućava da se odrede težine koje obezbeđuju optimalnu rekonstrukciju po kriterijumu maksimalne verodostojnosti. Kako sam statistički model zahteva poznavanje velikog broja parametara o karakteristikama same kamere, autori u [19] su predložili način za njihovu estimaciju na osnovu dostupnih merenja.

1.4 Reprodukcija slika širokog dinamičkog opsega

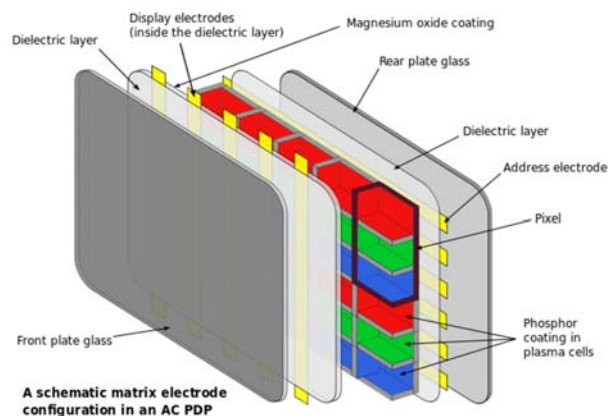
U prethodnom odeljku predstavljen je detaljan pregled dostupnih tehnika za akviziciju osvetljaja HDR scene. Logično pitanje koje se sada nameće je, na koji način je moguće prikazati dobijene HDR slike, odnosno kakve su karakteristike trenutno dostupnih displeja po pitanju dinamičkog opsega. Ovaj odeljak je podeljen u tri celine. Najpre će biti predstavljene tehnologije displeja koje su danas u širokoj upotrebi, poput LCD, LED, OLED, plazma displeja i sl. Biće analizirane njihove karakteristike po pitanju reprodukcije dinamičkog opsega slike. U drugom delu će biti predstavljene nove tehnologije koje omogućavaju značajno proširenje dinamičkog opsega displeja. U trećem delu se uvodi pojam operatora za reprodukciju HDR slika na LDR displejima uz očuvanje detalja. Detaljan pregled ovih operatora je dat u poglavlju 2.

1.4.1 Standardne tehnologije displeja

Prvi displeji koji su se pojavili i ušli u širu upotrebu početkom 20 veka bili su displeji sa katodnom cevi (CRT – *Cathode Ray Tube*). Ovi displeji koriste fokusirani elektronski snop, kojim se skenira površina presvučena fosforom. Fosfor ima sposobnost da apsorbuje elektrone i emituje fotone. Korišćenjem različitih vrsta fosfora, koji emituju fotone u različitim delovima spektra (crvena, zelena, plava), može se generisati slika u boji. Po pitanju dinamičkog opsega, CRT displeji nemaju problem u

prikazivanju tamnih delova scene i mogu proizvesti dosta „duboku“ crnu boju, pošto u slučaju kada se određeni deo displeja ne gađa elektronima nema ni emisije fotona, odnosno taj deo displeja ostaje crn. Međutim, CRT displeji imaju problem sa maksimalnom sjajnošću. Naime, fosfor ima tu osobinu da degradira svoje karakteristike ukoliko je dugo izložen velikim energijama (svetli delovi scene). Takođe, povećanje energije elektronskog snopa dovodi do povećane količine X zračenja, koje je veoma štetno. Iz tog razloga je maksimalna osvetljenost CRT displeja ograničena na reda 100 cd/m^2 .

Plazma displeji takođe koriste fosfor za generisanje fotona, međutim umesto fokusiranog elektronskog snopa koriste jone plemenitog gasa za pobudu fosfora. Struktura plazma displeja je prikazana na slici Slika 1.26.

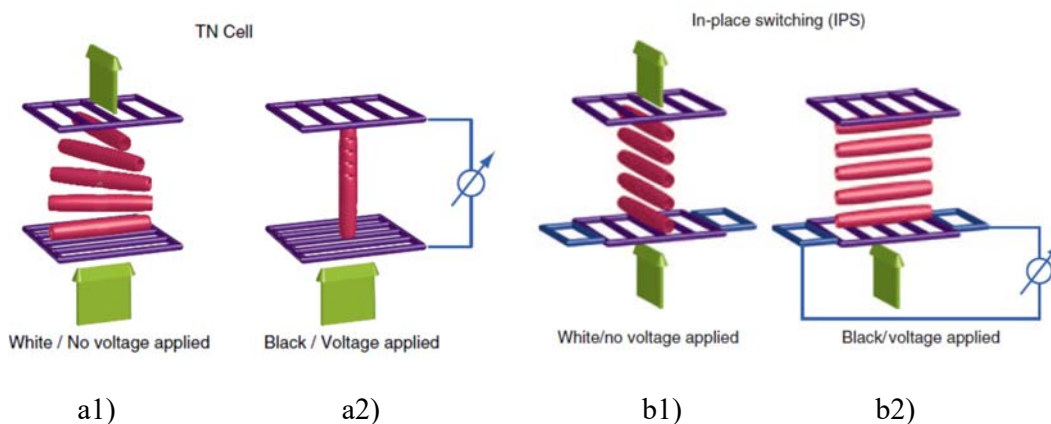


Slika 1.26 Struktura plazma displeja. Izvor slike Wikipedia.

Svaki piksel se sastoji od tri ćelije koje su presvučene različitim vrstama fosfora (crveni, zeleni i plavi) i unutar kojih se nalazi neki plemeniti gas. Kada se primeni napon na krajeve ćelije, dolazi do jonizacije gasa. Ovi joni se sudaraju sa zidovima ćelije presvučene fosforom koji emituju fotone. Iako mogu proizvesti dosta „duboku“ crnu boju, nivo crne je ipak nešto viši nego kod CRT displeja. Naime, u stacionarnom stanju, elektrode se nalaze na nekom konstantnom potencijalu, koji treba da obezbedi bržu jonizaciju gasa, pa samim tim i reakciju displeja. S druge strane kako kod plazma displeja nema usmerenog snopa elektrona koji dovode do X zračenja, maksimalni osvetljaj plazma displeja se može povećati u odnosu na CRT i kreće se oko $200\text{-}500 \text{ cd/m}^2$. Ipak, problem degradacije karakteristike fosfora ostaje [2], što čini ove displeje

ne tako dobrim rešenjem za prikaz HDR scena.

Tehnologija displeja koja je danas apsolutno dominantna je tehnologija zasnovana na tečnom kristalu (LCD – *Liquid Crystal Display*). Ova tehnologija je bazirana na molekulima tečnog kristala, koji imaju mogućnost da polarizuju svetlost koja prolazi kroz njih. U odsustvu električnog polja, molekuli tečnog kristala se orijentišu tako da se ravnaju u odnosu na susedne molekule. Prilikom primene električnog polja, molekuli tečnog kristala se orijentišu u pravcu električnog polja. Ova osobina molekula tečnog kristala, u kombinaciji sa polarizacionim staklima, je iskorišćena za pravljenje displeja, čija se transparentnost može kontrolisati električnim putem. Dva osnovna tipa displeja baziranih na tečnom kristalu su TN (*Twisted Nematic*) i IPS (*In Place Switching*) čiji je princip rada prikazan na slici Slika 1.27.



Slika 1.27 Princip rada LCD displeja [2].

Kod TN displeja, molekuli tečnog kristala se nalaze između dva polarizaciona stakla, čije se ravni polarizacije nalaze pod uglom od 90° . U odsustvu električnog polja, molekuli tečnog kristala se poravnavaju jedan uz drugi, kao i uz polarizacionu rešetku, i orijentišu se tako da čine uvijenu strukturu prikazani na slici Slika 1.27 a1). Pozadinsko osvetljenje prolazi kroz prvo polarizaciono staklo, a zatim i kroz uvijenu strukturu tečnog kristala, čime se ravan polarizacije svetla menja za 90° , što omogućava prolazak kroz drugo polarizaciono staklo. Kada se na krajeve TN ćelije primeni odgovarajuće električno polje, korišćenjem tranzistora realizovanih u tankom sloju uz polarizaciona stakla (TFT – *Thin Film Transistor*), prikazano na slici Slika 1.27 a2), molekuli tečnog kristala se postavljaju normalno u odnosu na polarizaciona stakla i više ne utiču na polarizaciju svetla koje prolazi kroz ćeliju. Kako je sada polarizaciona ravan svetla pod

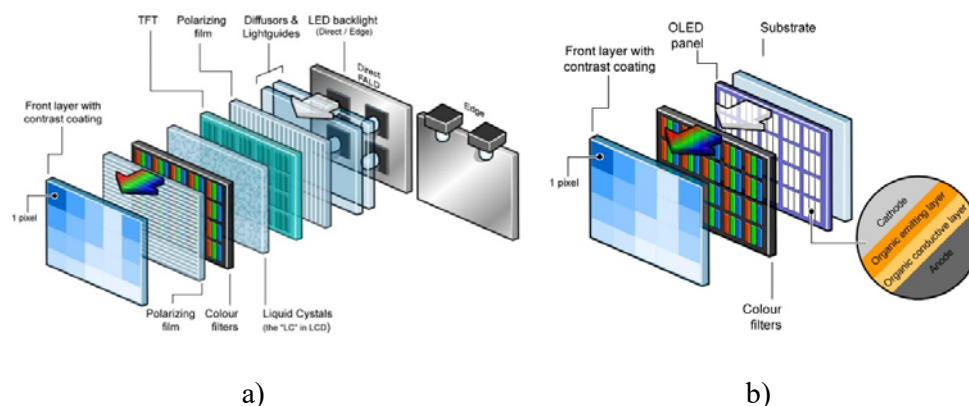
uglom od 90° u odnosu na drugo polarizaciono staklo, svetlosni snop neće biti propušten.

Zbog uvrnute strukture tečnog kristala, TN paneli nemaju jednake karakteristike za različite uglove gledanja, što značajno degradira performanse ovakvih displeja. Ovo se može prevazići drugačijom organizacijom tečnih kristala, koja je primenjena u IPS panelima i prikazana na slici Slika 1.27 b1) i b2). Kod IPS panela molekuli tečnog kristala se nalaze između dva polarizaciona stakla čije su polarizacione ravni identične. U odsustvu električnog polja molekuli tečnog kristala su poravnati tako da ne menjaju polarizaciju svetla koje prolazi. Ako se primeni električno polje u pravcu prostiranja polarizacionih stakala, molekuli tečnog kristala se orijentišu tako da menjaju polarizaciju svetla za 90° , čime se onemogućava prolazak kroz drugo polarizaciono staklo. Kako je sada u oba slučaja struktura tečnih kristala pravilna, dobijaju se i uniformnije karakteristike samog displeja.

Može se primetiti da za razliku od CRT i plazma displeja, LCD displeji zahtevaju konstantan izvor pozadinskog osvetljenja, a da se tamni delovi generišu blokiranjem pozadinskog osvetljenja pomoću molekula tečnih kristala. Kako polarizaciona stakla, kao i molekuli tečnog kristala nisu idealnih karakteristika, dešava se da deo pozadinskog svetla ipak bude emitovan, iako se ćelija nalazi u isključenom stanju [2]. Zbog toga LCD displeji imaju problem da prikažu „duboku“ crnu boju, što utiče na njihov dinamički opseg.

Jačina osvetljena LCD displeja zavisi od tipa pozadinskog osvetljenja. Ranije su se za pozadinsko osvetljenje u LCD displejima koristile fluorescentne lampe (CCFL – *Cold Cathode Fluorescent Lamp*), koje imaju prilično uniforman spektar zračenja, što omogućava generisanje slike u boji, propuštanjem ovog svetla kroz filtre različitog tipa (crvene, zelene i plave). Bolje karakteristike displeja, kao i smanjena potrošnja se postiže ukoliko se, umesto fluorescentnih lampi, za pozadinsko osvetljenje koriste LED (*Light Emitting Diodes*) diode. U zavisnosti od prostornog rasporeda LED dioda, LED displeji se dele na displeje sa direktnim i ivičnim osvetljenjem. Kod ivičnih LED displeja, LED diode su postavljene po obodima displeja a uniformnost osvetljenosti se postiže posebnim strukturama unutar displeja. Displeji ovog tipa mogu biti dosta tanki, imaju malu potrošnju i jeftiniji su s obzirom na dosta manji broj LED dioda koje se

koriste. Međutim, lokalna kontrola osvetljaja kod ovakvih displeja je prilično ograničena. LED displeji sa direktnim osvetljenjem koriste LED diode koje se nalaze po celoj zadnjoj strani ekrana. Obe ove konfiguracije LED displeja su prikazane na slici Slika 1.28 a).



Slika 1.28 Struktura LED i OLED displeja. Slika preuzeta sa: www.flatpanelshd.com.

Kako LCD tehnologija ne koristi više fosfor za emitovanje fotona, nema ni bojazni od degradacije karakteristika usled dugotrajne reprodukcije scena većeg intenziteta svetla. Međutim, kod LCD tehnologije postoji drugi problem koji sprečava postizanje većih nivoa osvetljaja a to je upravo problem „curenja“ svetla, koji dovodi do povećanja nivoa crne. Tako da većina komercijalnih LCD displeja danas ima maksimalan osvetlaj koji se nalazi u opsegu 200-300 cd/m², dok za kvalitetnije displeje može preći i 500 cd/m².

Zadržavanje dobrih karakteristike LCD displeja uz postizanje idealne crne boje, može se postići korišćenjem OLED (*Organic Light Emmiting Diode*) tehnologije. Za razliku od LCD displeja sa pozadinskim osvetljenjem, OLED displej se sastoji od matrice piksela, od kojih se svaki sastoji od tri različite LED diode kreirane u tankom sloju organskog materijala. Kod OLED displeja svaki piksel se nezavisno kontroliše, tako da je moguće kreirati idealnu crnu boju prostim isključivanjem odgovarajućih piksela. Kako OLED displeji ne zahtevaju pozadinsko osvetljenje, polarizaciona stakla i sloj tečnog kristala, ovi displeji se mogu napraviti da budu izuzetno tanki i savitljivi uz malu potrošnju električne energije. Maksimalna osvetljenost koja se postiže u ovim displejima kreće se oko 500 cd/m², uz najbolju mogućnost prikaza crne od svih dostupnih displeja danas.

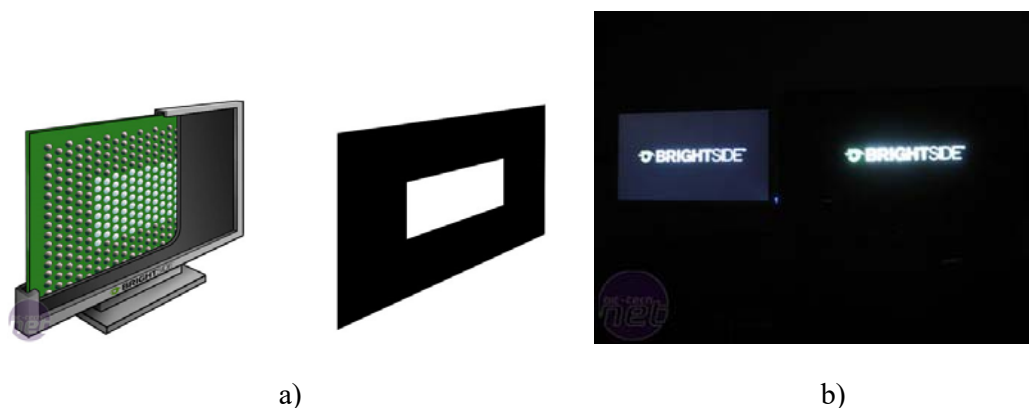
Poslednjih par godina, na tržištu je počelo da se pojavljuje više komercijalnih displeja

koji imaju mogućnost prikaza maksimalnog osvetljaja i do 1000 cd/m^2 i koji se mogu koristiti za prikaz HDR sadržaja. Međutim, ovakvi displeji postižu navedeni kontrast samo u odgovarajućim uslovima (tamna prostorija). Ukoliko se idealni uslovi naruše realni kontrast koji postižu se značajno smanjuje.

1.4.2 Tehnologija HDR displeja

Iako komercijalni HDR displeji danas dostižu impresivnih 1000 cd/m^2 , to je i dalje znatno manje od dinamičkog opsega potrebnog za profesionalne namene. Profesionalni HDR displeji dostižu maksimalnu osvetljenost i do 6000 cd/m^2 , uz idealnu reprodukciju crne boje i smanjeno rasipanje svetlosti, čime se izbegava curenje svetla sa susednih svetlih piksela na tamne. U prethodnom odeljku su opisane standardne displej tehnologije, odakle se zaključuje da su trenutno dominantne, LCD tehnologija bazirana na LED osvetljenju i OLED tehnologija. Problem koji je sprečavao LCD displeje sa uniformnim pozadinskim osvetljenjem, da postignu bolji dinamički opseg je upravo nemogućnost prikaza „duboke“ crne boje, zbog „curenja“ svetla koje se javlja usled nesavršenosti polarizacionih stakala i tečnih kristala. OLED displeji s druge strane imaju mogućnost reprodukcije idealne crne boje, s obzirom da je svaki piksel zaseban izvor svetla i u slučaju da je isključen ima osvetljaj ravan nuli. Problem kod OLED displeja za profesionalne HDR primene, je taj što je maksimalan osvetljaj uređaja dostupnih u ovoj tehnologiji oko $500\text{-}600 \text{ cd/m}^2$.

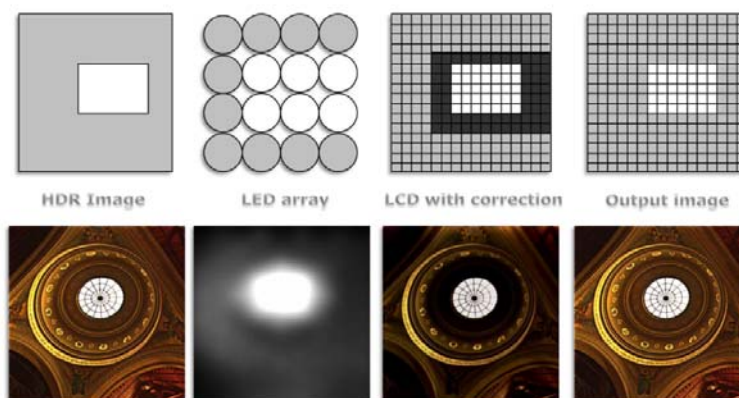
Dakle, kod LCD displeja glavni problem predstavlja „curenje“ svetla iz pozadinskog osvetljenja, kroz isključene ćelije tečnog kristala, koje predstavljaju tamni deo scene. Ukoliko bi se ovo pozadinsko osvetljenje isključilo, u tamnim delovima scene, onda bi prikaz crne bio idealan. Kod LCD displeja sa direktnim LED pozadinskim osvetljenjem ovo je moguće uraditi nezavisnom kontrolom pozadinskih LED dioda u različitim delovima displeja, što je prikazano na slici Slika 1.29 a). Slika 1.29 b) prikazuje standardni LCD displej i Brightside DR37 displej, koji ima mogućnost prikaza maksimalnog osvetljaja od 4000 cd/m^2 . I pored ovako velike vrednosti maksimalnog osvetljaja, ovaj displej ima mogućnost idealnog prikaza crne boje, zahvaljujući lokalnoj kontroli pozadinskog osvetljenja, koje se može potpuno isključiti u tamnim delovima scene.



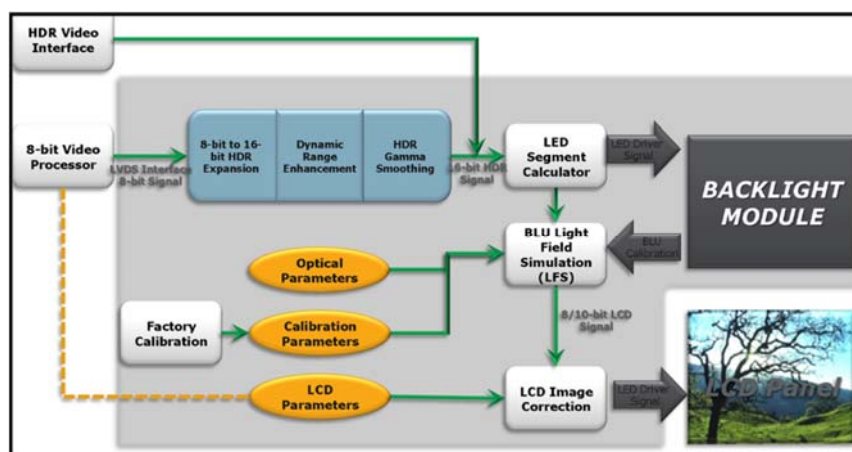
Slika 1.29 Lokalna kontrola pozadinskog osvetljenja. Slika preuzeta sa: www.bit-tech.net.

Kako je LED matrica koja se koristi za pozadinsko osvetljenje značajno manje rezolucije od rezolucije displeja, ideja je da se modulacijom pozadinskog osvetljenja predstavi srednji nivo osvetljaja u različitim delovima scene, dok se kontrolom ćelija sa tečnim kristalom postiže predstavljanje detalja u visokoj rezoluciji. Ovaj pristup se naziva metod dualne modulacije (*dual modulation*), što se odnosi na podelu ulaznog HDR signala na dve komponente, jednu niže rezolucije koja se koristi za kontrolu pozadinskog osvetljenja (*backlight dimming*) i drugu koja se koristi za kontrolu piksela LCD panela.

Ideja dualne modulacije, u cilju kontrole pozadinskog osvetljenja, predstavlja srž tehnologije trenutno dostupnih profesionalnih HDR displeja. Slika 1.30 detaljnije prikazuje ovaj postupak. Naime, za HDR sliku koju je potrebno prikazati, najpre se odredi slika manje rezolucije koja predstavlja srednje nivoe osvetljaja u lokalnim regionima scene i koja će se koristiti za kontrolu pozadinskog osvetljenja. Zatim se, na osnovu procene pozadinskog osvetljenja, odredi kontrola LCD panela u visokoj rezoluciji. Ovde je potrebno voditi računa da će se, zbog niže rezolucije pozadinskog osvetljenja, na granicama svetlih i tamnih regiona dogoditi da neki pikseli imaju veći ili manji nivo pozadinskog osvetljenja nego što je potrebno. Ovaj efekat se kompenzuje smanjenjem vrednosti koje se vode na LCD panel, kako bi izlazni nivo svetla bio korektan, što je i prikazano na slici Slika 1.30.



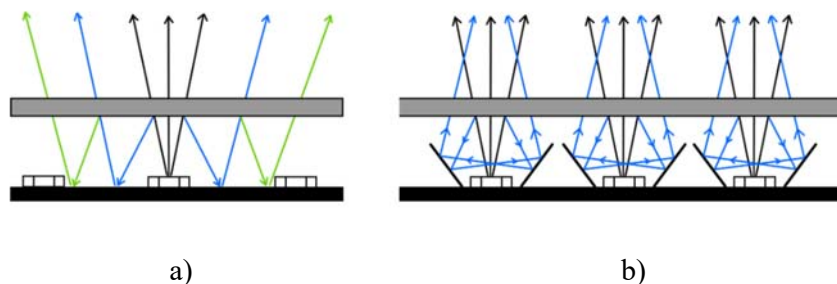
Slika 1.30 Postupak dualne modulacije HDR displeja. Slika preuzeta sa: hdr.sim2.it.



Slika 1.31 Procesiranje unutar HDR displeja sa dualnom modulacijom. Slika preuzeta sa: hdr.sim2.it.

Blok šema sistema kojim se obezbeđuje dualna modulacija u HDR displejima, prikazana je na slici Slika 1.31 i predstavlja princip rada profesionalnih HDR displeja kompanije Sim2. Njihov trenutno najnapredniji model HDR displeja HDR47ES6MB ima maksimalan osvetljaj od 6000 cd/m^2 i pri tome se ostvaruje dinamički opseg od oko 180000. Pri ovako velikim nivoima osvetljenosti, a pogotovo prilikom prikaza HDR slika, do izražaja dolazi problem rasipanja svetla sa svetlih na susedne tamne piksele koji je prikazan na slici Slika 1.32 a). Naime, deo osvetljaja koji potiče od pozadinske LED diode se reflektuje nazad i rasipa na susedne elemente, čime se povećava nivo crne i smanjuje dinamički opseg prikazane slike. Slika 1.32 prikazuje rešenje problema rasipanja u HDR displejima kompanije Sim2, uvođenjem reflektujućih elemenata oko

svake pozadinske LED diode. Na ovaj način je, ne samo smanjen uticaj rasipanja, već je i povećana količina svetla koje se emituje, odnosno omogućeno je postizanje veće maksimalne osvetljenosti displeja.



Slika 1.32 Rešavanje problema “rasipanja” svetlosti na okolne piksele. Slika preuzeta sa: hdr.sim2.it.

1.4.3 Reprodukција HDR sadržaja na LDR displejima

U odeljku 1.3.3 je pokazano na koji način se standardne LDR kamere mogu iskoristiti za snimanje HDR scene. Dinamički opseg ovako dobijenih HDR slika često ide i do 10^5 . Sa druge strane, dinamički opseg osvetljaja standardnih LCD displeja se kreće u opsegu 10^2 do 10^3 . Dok se dinamički opseg HDR displeja kreće oko 10^4 , za komercijalne namene i oko 10^5 , za profesionalne namene. Ovde je potrebno napomenuti, da se ovaj dinamički opseg postiže isključivo u idealno zatamnjanim prostorijama, dok bilo kakvo ambijentalno svetlo značajno smanjuje efektivni dinamički opseg [20]. Degradacija efektivnog dinamičkog opsega je posebno izražena kod mobilnih uređaja, poput mobilnih telefona, tableta i prenosivih računara, koji se koriste u uslovima dnevnog osvetljenja.

Pokušaj prostog linearnog skaliranja HDR slike u dinamički opseg LDR displeja, neminovno vodi ka gubitku detalja. Naime, ukoliko se HDR slika skalira tako da je korak kvantizacije dovoljno mali da se prikažu detalji u tamnim delovima scene dolazi do odsecanja detalja u svetlim delovima scene. S druge strane, ukoliko se HDR slika skalira tako da ceo opseg vrednosti stane u opseg LDR displeja, korak koji predstavlja minimalnu promenu osvetljaja biće previše velik da prikaže detalje u tamnim delovima scene. Dakle potreban je neki nelinearni operator, koji će transformisati vrednosti osvetljaja HDR scene u vrednosti piksela za prikaz na LDR displeju, ali tako da se što bolje očuvaju karakteristike originalne HDR scene. Ovakvi operatori se nazivaju

operatori za reprodukciju HDR slika i jedan takav operator je predmet ove doktorske disertacije. Cilj operatora za reprodukciju je da izvrši pomenuto mapiranje vrednosti ali da pri tom zadrži što je moguće više informacija originalne HDR slike, odnosno da prilikom prikaza HDR slike na LDR monitoru, ostavi utisak korisniku kao da zaista posmatra HDR scenu.

Detaljan pregled do sada razvijenih operatora za reprodukciju HDR slika je dat u glavi 2.

2 OPERATORI ZA REPRODUKCIJU HDR SLIKA

Iz dosadašnje diskusije je jasno, da postoji značajna razlika u mogućnosti snimanja i reprodukcije HDR slika. Naime, tehnologija snimanja omogućava da se čak i pomoću standardnih, široko dostupnih, LDR kamera snimi celokupan osvetljaj scene. Ovo se postiže korišćenjem dovoljnog broja različito eksponiranih LDR slika, kojima se snimaju različiti delovi dinamičkog opsega scene. S druge strane, većina danas dostupnih displeja je LDR i zbog tehnoloških ograničenja opisanih u prethodnoj glavi nemaju mogućnost prikaza celokupnog osvetljaja HDR scene. Novi komercijalni, a pogotovo profesionalni HDR displeji, imaju zadivljujuće performanse po pitanju kontrasta. Problem je što performanse ovih uređaja veoma zavise od uslova u kojima se proces reprodukcije odvija. Naime, bilo kakvo ambijentalno svetlo značajno smanjuje efektivni dinamički opseg displeja. S druge strane, kako se projekcija obično obavlja u zatamnjenoj prostoriji i kako je deo vidnog polja posmatrača zapravo u potpunom mraku, prevelika maksimalna osvetljenost displeja može delovati zaslepljujuće čime se mogućnost posmatrača da razlikuje detalje značajno smanjuje. S obzirom na veliku raznolikost u karakteristikama displeja i okruženjima u kojima se reprodukovana scena posmatra, stvara se potreba za smanjenjem snimljenog dinamičkog opsega scene, tako da se omogući njen prikaz na LDR displejima ali uz što manji gubitak detalja.

Nije iznenađujuće, što skoro svi operatori za reprodukciju HDR slika inspiraciju i

potporu za svoje algoritme ili delove algoritma, crpe iz karakteristika ljudskog vizuelnog sistema. U krajnjoj liniji, sam problem reprodukcije je postavljen tako, da je u tesnoj vezi sa funkcionisanjem ljudskog vizuelnog sistema, s obzirom na to da je cilj sačuvati karakteristike scene, tako da percepcija LDR slike bude što sličnija percepciji HDR scene. Interesantno je primetiti da ljudski vizuelni sistem konstantno rešava problem redukcije dinamičkog opsega, pošto je dinamički opseg fotoreceptora i propusni opseg nervnih puteva kojima se prenose informacije, dosta uži od dinamičkog opsega scene. Ljudski vizuelni sistem ovaj problem rešava procesom adaptacije, koji se može definisati kao nelinearna karakteristika odziva u odnosu na promenu osvetljaja. Zbog toga su prvi operatori za reprodukciju HDR slika zapravo predstavljali nelinearnu funkciju mapiranja HDR osvetljaja scene, pre procesa kvantizacije i prikaza na LDR displeju. Ovim procesom se praktično uvodi neuniformna kvantizacija, odnosno simulira se veća osetljivost (manja vrednost „jedva primetnih razlika“) za manje nivoe osvetljaja. Povećanje osetljivosti u tamnim delovima scene predstavlja jedan od osnovnih procesa adaptacije ljudskog vizuelnog sistema, i prikazana je na slici Slika 1.5.

Operatori za reprodukciju HDR slika, koji koriste jedinstvenu funkciju mapiranja za sve piksele na slici, nazivaju se **globalni** operatori. Iako daju značajno bolje rezultate od običnog linearnog skaliranja, imaju tendenciju da, prilikom kompresije kontrasta, potiskuju detalje. Naime, oblik krive je takav da se nameće manja osetljivost, odnosno kompresija kontrasta u svetlim delovima scene, što dovodi do potiskivanja detalja. S druge strane, iz svakodnevnog iskustva, je poznato da se ljudski vizuelni sistem dosta dobro bori sa ovim problemom i da smo u stanju da simultano percipiramo detalje u svetlim i tamnim regionima HDR scene. Naime, ljudski vizuelni sistem ima mogućnost lokalne adaptacije, odnosno različitog nivoa adaptacije za različite grupe fotoreceptora, u zavisnosti od lokalnog osvetljaja scene. Kako bi se ova osobina ljudskog vizuelnog sistema uzela u obzir, a samim tim i poboljšala reprodukcija detalja, razvijeni su operatori za reprodukciju čije se karakteristike menjaju u zavisnosti od lokalnog osvetljaja scene. Ovi operatori se nazivaju **lokalni** operatori.

Lokalni operatori pokazuju superiorne karakteristike u očuvanju detalja i reprodukciji lokalnog kontrasta. Međutim, ovo često dovodi do značajno smanjenog globalnog kontrasta, što može imati efekat neprirodnog izgleda izlaznih slika. Dalje, lokalni

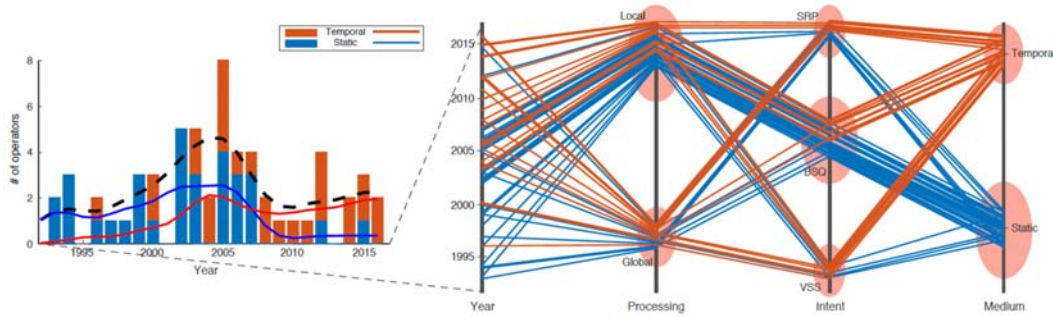
operatori su podložni nizu artefakata, koji su posledica lokalnog procesiranja i pokazuju dosta nestabilno ponašanje kada se posmatraju njihove temporalne karakteristike, odnosno mapiranje sekvence slika. S obzirom na prostorno varijabilno procesiranje, obično su dosta računski zahtevniji od globalnih operatora. Zbog toga je potrebno obratiti posebnu pažnju, prilikom projektovanja lokalnog operatora za reprodukciju HDR slika.

Pored osnovne podele na globalne i lokalne operatore u [20] je izvršena podela operatora i po njihovoj nameni. Naime, iako deluje da svi operatori za reprodukciju imaju za osnovni cilj što verniju reprodukciju scene, odnosno simulaciju ljudskog vizuelnog sistema, to nije potpuno tačno. Ljudski vizuelni sistem pored dobrih osobina, kao što su mogućnost dobre percepcije detalja u uslovim velikog dinamičkog opsega osvetljaja, poseduje i ograničenja. Tu spada odsjaj usled rasipanja svetla unutar oka u prisustvu jakih izvora svetla, zatim smanjenje sposobnosti za percepciju detalja i nemogućnost percepcije boja u uslovima slabog osvetljenja, kada su aktivni samo štapići i sl. Operatori za reprodukciju, koji pretenduju na kompletnost u modelovanju svih ovih efekata, spadaju u klasu simulatora vizuelnog sistema (VSS – *Visual System Simulator*). Detaljna simulacija ljudskog vizuelnog sistema je potrebna samo u posebnim slučajevima, kao što je na primer projektovanja simulatora vožnje, simulatora za obuku pilota ili sistema virtuelne realnosti. U svim ostalim slučajevima, dovoljno je izvršiti mapiranje tako da osnovne karakteristike scene, kao što su kontrast, boje, sjajnost, budu izmenjene što je manje moguće u odnosu na HDR scenu. Operatori koji teže da što više očuvaju percepciju HDR scene prilikom mapiranja, ali ne pretenduju da budu kompletni modeli ljudskog vizuelnog sistema, spadaju u klasu operatora za vernu reprodukciju scene (SRP – *Scene ReProduction*). Interesantno je da verniji prikaz HDR scene, ne vodi uvek ka boljem subjektivnom utisku. U studiji [21] ispitivana je mogućnost kreiranja operatora, sa ciljem dobijanja što boljeg subjektivnog utiska nakon reprodukcije. Naime, test subjektima je data mogućnost da, promenom parametara operatora, menjaju različite aspekte scene, kao što su zasićenost boja, kontrast i osvetljaj tako da u prvom slučaju postignu što bolji subjektivni utisak, a u drugom što bolje poklapanje sa realnom scenom prikazanom na HDR displeju. Ovo istraživanje je pokazalo da u odsustvu reference, u vidu slike projektovane na HDR displeju, ispitanici imaju tendenciju da značajno povećavaju kontrast, osvetljenost i zasićenost boja u

odnosu na realnu HDR scenu. Operatori koji imaju za cilj postizanje što boljeg subjektivnog osećaja kod posmatrača nazivaju se operatori za reprodukciju HDR slika maksimalnog subjektivnog kvaliteta (BSQ – *Best Subjective Quality*).

Primena operatora za reprodukciju HDR slika u video sekvencama predstavlja posebnu klasu problema. Naime, prosta primena operatora za reprodukciju HDR slika, nezavisno na svaki frejm HDR video sekvence, dovodi do niza artefakata, od kojih je najpoznatiji fliker, odnosno treperenje scene. Zbog toga je neophodno obratiti posebnu pažnju prilikom projektovanja i definisati odgovarajući način kontrole parametara operatora, kako bi se ostvarila temporalno konzistentna reprodukcija. Operatori koji su projektovani sa mogućnošću primene u video sekvencama spadaju u klasu **temporalnih**, dok u suprotnom slučaju spadaju u klasu **statičkih** operatora. Detaljnija analiza problema redukcije dinamičkog opsega u video sekvencama je predstavljena u glavi 4.

Slika 2.1 je preuzeta iz studije [20], koja se bavi evaluacijom operatora za reprodukciju HDR scena i njihovom primenom u video sekvencama. Na njoj je prikazan pregled operatora citiranih u navedenoj studiji, koji mogu poslužiti kao reprezentativni uzorak dostupnih operatora za reprodukciju HDR slika. Interesantno je primetiti da je, i pored toga što je veliki broj ovih operatora nastao pre desetak godina, oblast i dalje prilično živa, s tim što se fokus sve više pomera ka primeni u video sekvencama. Iz dijagrama desno se može uočiti, da je fokus istraživanja uglavnom na lokalnim operatorima. U početku su lokalni operatori uglavnom bili namenjeni za reprodukciju statičkih slika, dok se u poslednje vreme pojavljuju lokalni operatori sa mogućnošću korišćenja u video sekvencama. Što se tiče oblasti primene, može se uočiti da je najveći fokus na BSQ operatorima, odnosno na postizanju što boljeg subjektivnog utiska. To nije iznenađujuće, s obzirom da je većina ovih operatora namenjena za upotrebu u komercijalnim uređajima široke namene. Operator koji je predstavljen u ovoj disertaciji, upravo prati ovu liniju istraživanja i pozicionira se kao lokalni operator projektovan za što bolji subjektivni utisak i sa mogućnošću primene u video sekvencama. U nastavku ove glave, predstavljeni su najznačajniji globalni i lokalni operatori za reprodukciju HDR slika. Na kraju su sumirane njihove karakteristike i prodiskutovana mogućnost za unapređenje, koju nudi operator predstavljen u okviru ove disertacije.



Slika 2.1 Broj i vrsta objavljenih operatora za reprodukciju HDR slika u prethodnih 20 godina [20].

2.1 Globalni operatori

Jedan od prvih operatora za redukciju dinamičkog opsega scene, odnosno za uvođenje neuniformne kvantizacije, motivisane osetljivošću ljudskog vizuelnog sistema, uveden je u oblast digitalne obrade slike iz sasvim drugih pobuda. Reč je, naime, o gama korekciji, koja ima oblik:

$$I_d = \left(\frac{I_w}{I_{w\max}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.4.1)$$

gde I_w predstavlja linearne vrednosti osvetljaja, I_d vrednosti intenziteta koje se vode na displej, $I_{w\max}$ maksimalan osvetljaj koji se može prikazati na displeju i γ faktor nelinearnosti displeja. Motiv za uvođenje gama korekcije je bio nelinearnost između napona i osvetljaja kod CRT displeja, koji su predstavljali dominantnu displej tehnologiju u 20. veku. Faktor nelinearnosti γ kod CRT displeja kretao se oko 2.3 – 2.6. Interesantno je da je kvantizacijom nakon primene nelinearne funkcije (2.4.1), veći broj kvantizacionih nivoa dodeljivan nižim vrednostima osvetljaja, što je u skladu sa osetljivošću ljudskog vizuelnog sistema. Na taj način je omogućeno, da se postigne isti nivo izobličenja, nakon kvantizacije, uz korišćenje manjeg broja bita. Iako su današnji displeji uglavnom linearni, gama korekcija je i dalje zadržana upravo iz razloga efikasnije kvantizacije.

Problem reprodukcije HDR slika, u naučnu zajednicu su 1993. uveli Tumblin i Rushmeier-ova [22]. Oni su svoj operator bazirali na rezultatima Stevens-a, koji je pokazao da je osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na promenu osvetljaja iznad

vrednosti praga detekcije, zapravo stepene prirode. Schlick [23] je analizirao dve najčešće korišćene funkcije za reprodukciju HDR slika i to stepenu definisanu izrazom (2.4.1) i logaritamsku definisanu izrazom:

$$I_d = \frac{\log(1 + p \cdot I_w)}{\log(1 + p \cdot I_{w\max})} \quad (2.4.2)$$

gde je p koji određuje oblik krive, odnosno stepen kompresije koji se primenjuje. Motiv za korišćenje stepene funkcije je Stevens-ov rezultat, dok motiv uvođenja logaritamske funkcije potiče iz Weber-Fechner-ovog zakona „jedva primetnih razlika“.

Schlick je primetio da oba ova operatora imaju vrlo sličan oblik, kada se posmatra familija krivih za različite vrednosti parametara. Zbog toga se očekuje da ove dve krive daju vrlo slične rezultate mapiranja, ukoliko se podese odgovarajući parametri. Njegov cilj je bio da pronađe način za automatsko određivanje parametara ovih funkcija. Međutim, zaključio je da sa ovako definisanim krivama, nije moguće dobiti zadovoljavajuće rezultate i zbog toga je predložio novu krivu, koju je nazvao racionalna funkcija za mapiranje:

$$I_d = \frac{p \cdot I_w}{p \cdot I_w - I_w + I_{w\max}} \quad (2.4.3)$$

Ova kriva ima sigmoidalan oblik i zanimljivo je da ako se napiše u malo drugačijoj formi predstavljenoj u [2]:

$$I_d = \frac{I_w}{I_w + \frac{I_{w\max} - I_w}{p}} \quad (2.4.4)$$

ima isti oblik kao Naka-Rushton jednačina odziva fotoreceptora (2.2.2) za $n=1$ i

$\sigma_b = \frac{I_{w\max} - I_w}{p}$. Za vrednost parametra p Schlick je predložio da se podesi vrednost:

$$p = \frac{I_{d\min}}{I_{d\max}} \frac{I_{w\max}}{I_{w\min}} \quad (2.4.5)$$

gde su $I_{d\min}$ i $I_{d\max}$ minimalne i maksimalne relativne osvetljenosti displeja.

Koristeći izraz (2.4.2) kao polaznu tačku, Drago [24] primećuje da logaritamska

funkcija ima tendenciju potiskivanja detalja. Ako se koristi $\log_2$ funkcija ekspanzija kontrasta u tamnim regionima je postignuta ali na račun izražene kompresije svetlih delova scene. S druge, strane $\log_{10}$ postiže bolje očuvanje detalja u svetlim regionima scene ali na račun tamnih delova. Zbog toga Drago predlaže da se koristi funkcija, čija osnova logaritma se menja u zavisnosti od toga koja vrednost osvetljaja se mapira. Predložen opseg variranja osnove logaritma je od 2 do 10. Finalni oblik logaritamske funkcije, koja omogućava adaptivnu promenu osnove logaritma, definisan je sa:

$$I_d = \frac{0.01 \cdot I_{d \max}}{\log_{10}(I_{w \max} + 1)} \cdot \frac{\log(I_w + 1)}{\log \left(2 + 8 \cdot \left(\frac{I_w}{I_{w \max}} \right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \right)} \quad (2.4.6)$$

gde $I_{w \max}$ predstavlja osvetljaj scene koji se mapira na maksimalni osvetljaj displeja $I_{d \max}$. Svi osvetljaji scene koji su veći od ove vrednosti, zasićuju se na maksimalnu vrednost osvetljaja displeja $I_{d \max}$. Parametar b kontroliše intenzitet kompresije, pri čemu manje vrednosti dovode do veće redukcije dinamičkog opsega scene. Kako vrednosti parametra b koje su manje od 0.7, dovode do značajnog odsecanja karakteristike, preporučeni opseg vrednosti ovog parametra je između 0.7 i 0.9.

Inspirisan postupcima korišćenim u analognoj fotografiji, Reinhard [25] je predložio jedan od najpopularnijih operatora za reprodukciju HDR slika i nazvao ga fotografski operator za reprodukciju (*photographic tone mapping operator*). Velika popularnost ovog operatora, koja se održala do danas, je posledica njegove jednostavnosti i robusnosti. Upravo zbog ovih osobina je ovaj operator odmah našao primenu u mapiranju video sekvenca i dugo je bio dominantan operator u toj oblasti. Postupak mapiranja kod fotografskog operatora se sastoji iz dva koraka. U prvom koraku se vrednosti osvetljaja skaliraju, tako da se srednji nivo osvetljaja $\overline{I_w}$ dovede na vrednost 1. Srednji nivo osvetljaja je definisan kao logaritamska srednja vrednost, zbog logaritamske osetljivosti ljudskog vizuelnog sistema. Odnosno važi:

$$\overline{I_w} = \frac{1}{N} \exp \left(\sum_{x,y} \log(I_w(x,y) + \varepsilon) \right) \quad (2.4.7)$$

pri čemu je ε konstanta male vrednosti, čija je uloga da se izbegne neodređena

vrednost logaritamske funkcije, za nulte vrednosti osvetljaja. Na ovaj način je obezbeđeno, da se usrednjavanje osvetljaja zapravo odvija u perceptualno uniformnom domenu.

Kriva koja se koristi za mapiranje je sigmoida, koja se često sreće u fotografiji i predstavlja nelinearnu karakteristiku osetljivosti filma na svetlost. Konačna forma Reinhard-ovog operatora je:

$$I_d = \frac{a \frac{I_w}{\overline{I_w}}}{1 + a \frac{I_w}{\overline{I_w}}} \quad (2.4.8)$$

Parametar a se podešava na osnovu dominantnog osvetljaja scene (*key value*). Ako je scena pretežno tamna (*low key*), onda je od interesa da njena srednja vrednost, u finalnoj mapiranoj LDR slici, bude nešto ispod srednjeg kvantizacionog nivoa. Odnosno, da se veći broj vrednosti nalazi u prvoj polovini histograma. Ovo se postiže mapiranjem srednje vrednosti osvetljaja $\overline{I_w}$ na neku vrednost manju od 1, što u izrazu (2.4.8) znači da je $a < 1$. Analogno se zaključuje da za svetlije scene treba podesiti $a > 1$. Karakteristika sigmoide je takva, da će se najveći značaj, odnosno najveći deo izlaznog dinamičkog opsega, dodeliti upravo vrednostima osvetljaja, koje se nalaze oko srednje vrednosti. Interesantno je primetiti, da ukoliko se izraz (2.4.8) napiše malo drugačije [2]:

$$I_d = \frac{I_w}{I_w + \frac{\overline{I_w}}{a}} \quad (2.4.9)$$

postaje jasno da on zapravo Naka-Rushton jednačina adaptacije fotoreceptora (2.2.2) za $n=1$ i $\sigma_b = \frac{\overline{I_w}}{a}$. Ovaj izraz dosta liči i na Schlick-ovu racionalnu funkciju, s tim što je sada proces adaptacije mnogo prirodnije izveden i ne zavisi od svakog pojedinačnog piksela, već se koristi srednji nivo osvetljenosti $\overline{I_w}$. Lepota Reinhard-ovog operatora, leži upravo u njegovoj jednostavnosti i sposobnosti da pri tom obuhvati ključne procese adaptacije ljudskog vizuelnog sistema.

Problem redukcije dinamičkog osvetljaja scene, može se posmatrati i kao problem

optimizacije kontrasta. Ideja je da se raspodele dostupni kvantizacioni nivoi, tako da se u okviru različitih intervala osvetljaja postigne zadovoljavajući nivo kontrasta, koji se što manje razlikuje od početne HDR scene. Problem optimizacije kontrasta je dobro poznat u digitalnoj obradi slike i predstavlja jednu od osnovnih tehnika za poboljšanje kvaliteta slika (*image enhancement*). Postupak ekvalizacije histograma, dovodi do toga da se broj kvantizacionih nivoa u svakom intervalu osvetljaja, dodeljuje na osnovu njegove zastupljenosti u slici. Na taj način se obezbeđuje, da vrednosti osvetljaja, koje zauzimaju najveći deo scene, budu shodno tome i predstavljene sa najviše kvantizacionih nivoa. Tako se dobija operator, koji ističe najvažnije delove scene potpuno automatski i prilagođava se svakoj sceni ponaosob. Ekvalizacija histograma se postiže ako se za krivu mapiranja koristi funkcija kumulativnog histograma scene definisana kao:

$$P(b) = \sum_{b_i < b} \frac{f(b_i)}{T} \quad (2.4.10)$$

gde funkcija $f(b_i)$ predstavlja broj piksela, čiji intenzitet upada u interval b_i . Pri čemu je $T = \sum_{b_i} f(b_i)$ ukupan broj piksela u slici.

Poznati problem kod ekvalizacije histograma je prenaplašavanje kontrasta. U slučaju da je histogram polazne scene takav, da ima nagomilavanja na nekim vrednostima, odnosno izražene pikove u histogramu, kumulativni histogram će u tim delovima imati veoma strm nagib, što može dovesti do prenaplašavanja kontrasta. Rešenje u ovom slučaju je, da se koristi ekvalizacija histograma sa ograničenjem kontrasta. Ideja je da se, pre računanja funkcije kumulativnog histograma, vrši odsecanje histograma na neku predefinisanu vrednost, sa ciljem da se ograniči maksimalna vrednost $f(b_i)$, a samim tim i maksimalni nagib krive mapiranja.

Upotrebu optimizacije kontrasta, korišćenjem histograma, u oblast redukcije dinamičkog opsega HDR slike, prvi je uveo Ward [26]. Ekvalizacije histograma se obavlja u peceptualno uniformnom, logaritamskom domenu i definisana je sa:

$$\log(I_d) = \log(I_{d\min}) + (\log(I_{d\max}) - \log(I_{d\min})) \cdot P(\log(I_w)) \quad (2.4.11)$$

gde su $I_{d\min}$ i $I_{d\max}$ minimalna i maksimalna vrednost osvetljaja displeja. Kako bi

sprečio pre naglašavanje kontrasta, Ward je uveo ograničenje da kontrast koji se dobije na ovaj način, ne sme da bude veći od kontrasta koji se dobija linearnim mapiranjem. Odnosno potrebno je da važi:

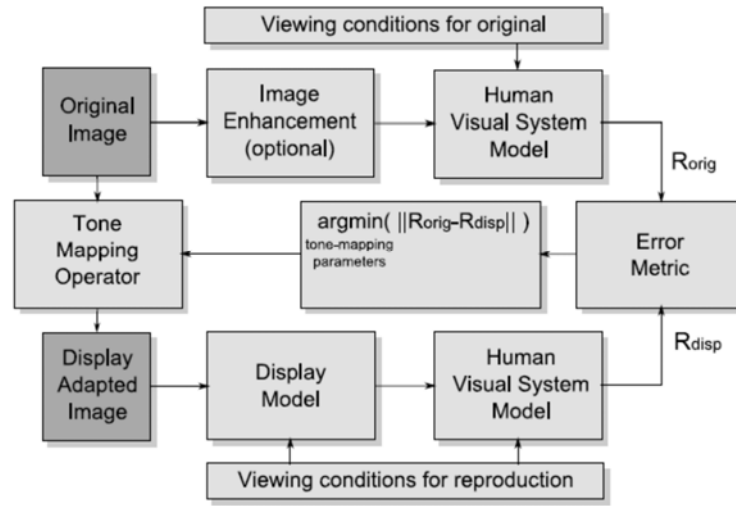
$$\frac{dI_d}{dI_w} \leq \frac{I_d}{I_w} \quad (2.4.12)$$

Da bi izraz (2.4.12) bio zadovoljen potrebno je da važi:

$$f(b) \leq \frac{T \cdot \delta b}{\log(I_{d\max}) - \log(I_{d\min})} \quad (2.4.13)$$

gde je $\delta b = \frac{1}{N}(\log(I_{w\max}) - \log(I_{w\min}))$ veličina jednog intervala, a N ukupan broj intervala histograma. Dalje unapređenje ovog pristupa podrazumeva variranje praga odsecanja, u zavisnosti od vrednosti osvetljaja, tako da se uzme u obzir osetljivost na kontrast ljudskog vizuelnog sistema.

Mantiuk [27] je krenuo od premise, da je osnovni cilj operatora za reprodukciju HDR slika, minimizacija razlika između percepcije originalne i reprodukovane scene na LDR displeju. Ako je odziv ljudskog vizuelnog sistema na originalnu HDR scenu u perceptualnim jedinicama „jedva primetnih razlika“ R_{orig} , a odziv na istu tu scenu nakon redukcije dinamičkog opsega i prikaza na LDR displeju R_{disp} , potrebno je da važi $R_{orig} = R_{disp}$, kako bi posmatrač imao isti subjektivni utisak tokom posmatranja scene. Optimalan operator za redukciju dinamičkog opsega je onaj koji minimizuje kvadratnu grešku između ova dva odziva. Postupak optimizacije je prikazan na slici Slika 2.2.



Slika 2.2 Optimizacioni pristup problemu redukcije dinamičkog opsega [27].

Kako bi odredio perceptualne odzive prilikom posmatranja originalne i reprodukovane scene, Mantiuk [27] je definisao modele displeja i ljudskog vizuelnog sistema.

Model displeja je prilično jednostavan i uključuje nelinearnu karakteristiku displeja, minimalnu i maksimalnu osvetljenost kao i osvetljenost usled refleksije:

$$I_d = p^\gamma (I_{d\max} - I_{black}) + I_{black} + I_{refl} \quad (2.4.14)$$

gde $p \in [0,1]$ predstavlja vrednost piksela, γ nelinaernost displeja odnosno gama faktor, $I_{d\max}$ predstavlja maksimalni osvetljaj displeja, I_{black} nivo crne i I_{refl} nivo reflektovane svetlosti, koja se u slučaju difuznih ekrana može modelovati kao:

$$I_{refl} = \frac{k}{\pi} E_{amb} \quad (2.4.15)$$

gde k predstavlja koeficijent refleksije a E_{amb} jačinu ambijentalnog osvetljenja u lux-ima.

Kako bi se odredili odgovarajući perceptualni odzivi, potrebno je najpre konstruisati model koji definiše osetljivost na kontrast, u zavisnosti od nivoa adaptacije, prostorne učestanosti (skale) i sl. Za model ljudskog vizuelnog sistema Mantiuk je iskoristio transduktorsku funkciju $T(W, S)$ koju je definisao Wilson [28] 1980. a koja definiše odziv ljudskog vizuelnog sistema, u odnosu na kontrast W i osetljivost na kontrast S .

Kako bi definisao kontrast na različitim skalama, Mantiuk je iskoristio Laplasovu piramidu logaritamskog osvetljaja slike. Svaki nivo s Laplasove piramide V definisan je sa:

$$V_s = \log_{10} I_s - \log_{10} I_{s+1} \quad (2.4.16)$$

gde $\log_{10} I_s$ predstavlja s -ti nivo Gausove piramide, odnosno logaritamsku vrednost osvetljaja, filtriranu Gausovim filtrom standardne devijacije σ_s . Za svaki naredni nivo koristi se veći filter ($\sigma_{s+1} > \sigma_s, \forall s$), čime se zapravo određuje logaritamska vrednost kontrasta, koja odgovara nižoj prostornoj učestanosti. Kontrast na skali s , u linearnom domenu, je definisan kao:

$$W_s = 10^{|V_s|} - 1 \quad (2.4.17)$$

Kako bi se obezbedilo da optimizacioni postupak daje najmanju grešku, za one vrednosti kontrasta koje se najčešće pojavljuju, Mantiuk je definisao funkciju uslovne verovatnoće pojave određenih vrednosti kontrasta u zavisnosti od nivoa adaptacije. Za svaku skalu s , nivo adaptacije adaptacije predstavlja logaritamski osvetljaj na narednoj prostornoj skali $\log_{10} I_{s+1}$. Prema tome je funkcija uslovne verovatnoće kontrasta definisana kao:

$$c_{i,m,s} = P\left(m\delta - \frac{\delta}{2} \leq V_s < m\delta + \frac{\delta}{2} \middle| x_i - \frac{\delta}{2} \leq \log_{10} I_{s+1} < x_i + \frac{\delta}{2}\right) \quad (2.4.18)$$

gde je $\delta = x_{i+1} - x_i$ veličina intervala histograma a $m = -M, \dots, -1, 1, \dots, M$. Vrednost M se obično definiše tako da važi $M\delta < 0.7$. Cilj ovog postupka optimizacije je da se odredi tabela preslikavanja $X \rightarrow Y$, kojom se vrednost logaritamskog osvetljaja na ulazu x_i , slika u vrednost logaritamskog osvetljaja na izlazu y_i , tako da distorzija kontrasta bude minimalna. Ako se razliku između susednih nivoa na izlazu označi sa $d_i = y_{i+1} - y_i$, onda se proces optimizacije može definisati na sledeći način:

$$O = \arg \min_{d_1, d_2, \dots, d_N} \sum_s \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{\substack{m=-M \\ m \neq 0}}^M \left[T\left(\sum_{k \in \Phi} d_k, S_d\right) - T\left(e \sum_{k \in \Phi} \delta, S_w\right) \right]^2 \cdot c_{i,m,s} \quad (2.4.19)$$

$$\Phi = \begin{cases} i+m, \dots, i-1, & \text{za } m < 0 \\ i, \dots, i+m-1, & \text{za } m \geq 0 \end{cases}$$

uz uslove:

$$d_i \geq 0, \forall i \in [1, N-1] \quad (2.4.20)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} d_i \leq \log_{10} I_{d \max} - \log_{10} I_{d \min} \quad (2.4.21)$$

Faktor e predstavlja konstantu koja određuje nivo pojačanja kontrasta, u odnosu na realnu scenu, kako bi se postigao bolji subjektivni utisak. Uslov (2.4.20) obezbeđuje da se prilikom optimizacije dobije monotona neopadajuća kriva, dok uslov (2.4.21) obezbeđuje da sve vrednosti, nakon redukcije dinamičkog opsega, upadaju u dinamički opseg displeja. Može se primetiti da su u izrazu (2.4.19), korišćene različite funkcije osetljivosti na kontrast za realnu HDR scenu S_w i za scenu reprodukovanu na LDR displeju S_d , što je posledica različitog nivoa adaptacije u ova dva slučaja. Finalne vrednosti koje se šalju na displej $I_{d,i}$ određene su sa:

$$\log_{10} I_{d,i} = y_i = \log_{10} I_{d \min} + \sum_{k=1}^{i-1} d_k + \alpha \left(\log_{10} I_{d \max} - \log_{10} I_{d \min} - \sum_{k=1}^{N-1} d_k \right) \quad (2.4.22)$$

gde parametar α određuje u kom delu opsega će biti mapiran izlaz ukoliko nije iskorišćen ceo opseg izlaznih vrednosti.

Što se tiče mapiranja slika u boji, Schlick [23] je bio prvi koji je razmatrao problem očuvanja boja prilikom redukcije dinamičkog opsega i zaključio da će razlike u percepciji boja biti minimalne, ako se održi odnos između komponenti boja pre i posle mapiranja, odnosno ako važi:

$$\frac{R_d}{R_w} = \frac{G_d}{G_w} = \frac{B_d}{B_w} = \frac{Y_d}{Y_w} \quad (2.4.23)$$

gde indeksi w i d predstavljaju vrednosti pre i posle redukcije dinamičkog opsega respektivno. Slovom Y je označena luminansa iz CIE XYZ sistema boja. Ova komponenta predstavlja procenu osvetljaja i njena vrednost je definisana ITU-R BT.709 standardom kao:

$$Y_w = 0.2126 \cdot R_w + 0.7152 \cdot G_w + 0.0722 \cdot B_w \quad (2.4.24)$$

Preuređivanjem izraza (2.4.23) dolazi se do izraza za finalne vrednosti komponenti boja,

sa redukovanim dinamičkim opsegom:

$$C_d = Y_d \frac{C_w}{Y_w}, C \in \{R, G, B\} \quad (2.4.25)$$

Dakle, za razliku od prethodnih rešenja, koja su se obično oslanjala na primenu operatora za redukciju dinamičkog opsega scene na svaku komponentu boje nezavisno, Schlick je predložio, da se redukcija dinamičkog opsega obavlja samo na komponenti sjajnosti scene. Finalne vrednosti komponenti boje, određuju se korišćenjem izraza (2.4.25), čime se postiže minimalno izobličenje boja. Ovaj postupak su unapredili Tumblin i Turk [29] *ad-hoc* dodavanjem parametra saturacije s i time omogućili kontrolu nad intenzitetom boja finalnog rezultata:

$$C_d = Y_d \left(\frac{C_w}{Y_w} \right)^s, C \in \{R, G, B\} \quad (2.4.26)$$

Detaljna analiza različitih operatora za rekonstrukciju boja, nakon redukcije dinamičkog opsega, data je u [30].

2.2 Lokalni operatori

Globalni operatori definišu jedinstvenu funkciju preslikavanja za celu sliku. To znači, da će ulazni osvetljaj I_w biti jedinstveno mapiran u osvetljaj displeja I_d , bez obzira na to kakve su vrednosti u okolini, odnosno da li taj deo scene pripada pretežno svetlom ili tamnom regionu. Dakle, globalni operatori modeluju fotoreceptore kao potpuno nezavisne od pobude susednih fotoreceptora. Iz opisa rada ljudskog vizuelnog sistema u odeljku 1.2, jasno je da ovo nije slučaj. Sama struktura mrežnjače prikazana na slici Slika 1.4, pokazuje da postoje horizontalne veze između fotoreceptora, koje unose zavisnost u njihove odzive. U svakodnevnom životu, ova sposobnost lokalne adaptacije fotoreceptora, omogućava simultanu percepciju detalja, u delovima scene koji imaju dosta različite vrednosti osvetljaja. Lokalni operatori uzimaju ovu sposobnost lokalne adaptacije u obzir i zbog toga imaju superiornije karakteristike u reprodukciji detalja u odnosu na globalne operatore. Pregled najznačajnijih lokalnih operatora za reprodukciju HDR slika dat je u nastavku.

2.2.1 Operatori zasnovani na lokalnom nivou adaptacije

Interesantno je primetiti da se svi globalni operatori za reprodukciju, koji zavise od nekog globalnog parametra, mogu prilagoditi da budu lokalni, tako što se vrednost tog parametra određuje na osnovu lokalnih karakteristika slike. Ideja je da se u tamnim regionima poveća nagib kompresione krive i na taj način omogući isticanje detalja iz senke, dok se u svetlim regionima smanjuje nagib kompresione krive, čime se sprečava potiskivanje detalja. Tako na primer, Schlick-ov racionalni operator definisan izrazom (2.4.4) postaje lokalni, ako se vrednost parametra p menja prostorno u zavisnosti od lokalnog stepena adaptacije. Autori su ovo i predložili u originalnom radu [23], pri čemu nova, prostorno varijabilna, vrednost parametra p ima oblik:

$$p' = p \cdot \left(1 - k + k \frac{I_{wa}}{\sqrt{I_{wmin} \cdot I_{wmax}}} \right) \quad (2.5.1)$$

gde je p globalna vrednost parametra definisana izrazom (2.4.5), I_{wa} predstavlja lokalni nivo adaptacije, odnosno lokalnu srednju vrednost osvetljaja piksela (računatu kao geometrijska sredina), dok je k parametar koji definiše odnos snaga lokalne i globalne adaptacije.

Reinhard-ov operator [25], čija je globalna verzija definisana izrazom (2.4.9), može se veoma lako transformisati u lokalni, ako se umesto globalne srednje vrednosti osvetljaja $\overline{I_w}$ koristi lokalna srednja vrednost I_{wa} .

Drago-ov operator [24] se takođe može učiniti lokalnim, ako se osnova logaritma menja u zavisnosti od lokalnog nivoa adaptacije, umesto od trenutne vrednosti osvetljaja, čime se dobija:

$$I_d = \frac{0.01 \cdot I_{dmax}}{\log_{10}(I_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(I_w + 1)}{\log \left(2 + 8 \cdot \left(\frac{I_{wa}}{I_{wmax}} \right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \right)} \quad (2.5.2)$$

Prostorno neuniformno mapiranje, odnosno uvođenje zavisnosti funkcije mapiranja od lokalnog nivoa adaptacije, prvi je još 1993. predložio Chiu [31]. On je za operator mapiranja koristio običnu linearnu funkciju ali je parametar skaliranja varirao u zavisnosti od lokalne srednje vrednosti intenziteta osvetljaja.

Ključno pitanje koje se ovde postavlja je, na koji način odrediti lokalni nivo adaptacije, odnosno lokalnu srednju vrednost osvetljaja I_{wa} . Chiu je u svom radu [31] koristio Gausovu funkciju za usrednjavanje. Ovaj postupak funkcionise dobro dok god svi pikseli, koji upadaju u lokalno susedstvo i koji utiču na vrednost adaptacije trenutnog piksela, pripadaju istom regionu osvetljenosti. Problem nastaje na granicama regiona dosta različitih osvetljenosti. Naime, za piksel koji pripada tamnom regionu, koji se graniči sa svetlim regionom, nivo adaptacije, računat kao prosta srednja vrednost, biće značajno veći od realnog, jer na tu srednju vrednost utiču i pikseli iz svetlog regiona. Kao posledica toga, pikseli koji pripadaju tamnom regionu a graniče se sa svetlim regionom biće znatno manje istaknuti. Obrnuto važi za piksele koji pripadaju svetlom regionu a graniče se sa tamnim regionom. Oni će biti znatno više istaknuti nego što bi trebalo i najverovatnije će ući u zasićenje. Posledica ovoga je pojava tamnih i svetlih traka na granicama svetlih i tamnih regiona, koje se nazivaju halo artefakti.

Ovu pojavu je primetio još Chiu u svom radu [31] ali nije ponudio rešenje. Schlick [23] takođe primećuje da korišćenje Gausove funkcije dovodi do pojave halo artefakata, ali uočava da sa smanjenjem širine Gausove funkcije halo artefakti postaju manji. Zbog toga predlaže korišćenje mikro zona, koje lokalno susedstvo svode na jedan piksel. Iako daje bolje rezultate od originalne formulacije, ovaj postupak zapravo ne uvodi lokalnu adaptaciju, već se svodi se na globalni operator. Schlick takođe primećuje da se problemi mogu izbeći ako se izvrši segmentacija slike na regione slične osvetljenosti i ako se na svaki od regiona primeni jedinstveni parametar adaptacije. Segmentacija slike, korišćenjem *K-mean* algoritma i primena prostorno varijabilne stepene funkcije je primenjena u [32]. Međutim, segmentacija slike predstavlja računski veoma zahtevan korak i uglavnom se izbegava prilikom konstrukcije operatora za reprodukciju.

Reinhard [25] je primetio da je za postizanje što boljeg rezultata lokalnog mapiranja, uz izbegavanje halo artefakata, potrebno za svaki piksel odrediti vrednost adaptacije korišćenjem što većeg Gausovog filtra, odnosno korišćenjem što većeg lokalnog susedstva, pod uslovom da se ne pređe granica između regiona, čija se osvetljenost značajno razlikuje. Ukoliko se sa I_s označi s -ti nivo Gausove piramide, skalirane vrednosti osvetljaja scene $a \frac{I_w}{I_s}$, onda se nivo kontrasta na s -tom nivou može

predstaviti kao:

$$V_s = \frac{I_s - I_{s+1}}{\frac{a \cdot 2^\Phi}{s} + I_s} \quad (2.5.3)$$

gde je $\frac{a \cdot 2^\Phi}{s} + I_s$ normalizacioni faktor, koji obezbeđuje da su vrednosti kontrasta dobijene na različitim nivoima piramide u istom opsegu vrednosti. Parametar Φ kontroliše koliko velike razlike kontrasta će biti ignorisane u procesu traženja lokalnog susedstva. Svaki nivo Gausove piramide I_s dobijen je filtriranjem skalirane vrednosti osvetljaja scene Gausovim filtrom standardne devijacije σ_s , pri čemu za dva susedna nivoa važi $\sigma_{s+1} = 1.6 \cdot \sigma_s$.

Za svaki od piksela u slici se definiše maksimalna veličina lokalnog susedstva $s_{\max}$ u okviru koje nema velikih promena kontrasta, odnosno važi:

$$|V_{s_{\max}}| < \varepsilon \quad (2.5.4)$$

gde ε predstavlja vrednost praga značajnog kontrasta. Po određivanju maksimalne skale za koju je ispunjena nejednakost (2.5.4) izraz za globalni Reinhard-ov operator (2.4.8) postaje:

$$I_d = \frac{a \frac{I_w}{I_{s_{\max}}}}{1 + I_{s_{\max}}} \quad (2.5.5)$$

Male vrednosti parametra Φ dovode do toga, da se koriste relativno mala lokalna susedstva, čime se umanjuje sposobnost lokalne adaptacije. S druge strane velike vrednosti ovog parametra mogu dovesti do toga, da se i značajne vrednosti kontrasta ignorišu što može dovesti do pojave halo artefakata.

2.2.1.1 Filtri osetljivi na ivice

Schlick-ov pristup [23] izbegavanju halo artefakata je bio smanjivanje veličine lokalnog susedstva na svim lokacijama. Kako je za piksele koji se nalaze na samoj granici svetlog i tamnog regiona, veličina simetričnog lokalnog susedstva koja ne dovodi do pojave halo artefakata zapravo 0 (odnosno posmatra se samo trenutna

vrednost piksela), Schlick je ovu vrednost usvoji za nivo adaptacije i na taj način operator opet učinio globalnim. Reinhard [25] takođe koristi simetrično lokalno susedstvo oko svakog piksela, ali omogućava variranje veličine prostornog susedstva za svaki piksel ponaosob. Međutim, i u ovom slučaju, ukoliko se odgovarajući piksel nalazi na granici između dva regiona značajno različitih osvetljaja, njegovo lokalno susedstvo će biti minimalno. Najbolji rezultat bi se postigao, ako bi u usrednjavanje ulazili svi pikseli koji se nalaze u nekom prostornom susedstvu trenutnog piksela ali u isto vreme i pripadaju istom regionu osvetljaja. Odnosno, ako bi filter koji se koristi za usrednjavanje bio takav, da ne uzima u obzir one piksele u lokalnom susedstvu čija se vrednost značajno razlikuje od vrednosti trenutnog piksela. Ovakvi filteri zapravo postoje, spadaju u klasu filtera osetljivih na ivice (*edge-aware filters*) i mogu se efikasno iskoristiti za izdvajanje lokalnog nivoa adaptacije.

Prvi postupak filtriranja osetljivog na ivice, predstavili su u svom čuvenom radu još 1990. Perona i Malik [33]. Oni su posmatrali vrednosti piksela u slici kao vrednosti temperature izolovanih tačaka, a proces iterativnog usrednjavanja, sa sve većim vrednostima lokalnog susedstva, kao proces prostiranja toplote u fluidu. Ovaj proces se može definisati kao:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \nabla \cdot (-\Phi) = \nabla \cdot (C \cdot \nabla I) \quad (2.5.6)$$

gde Φ predstavlja vektor fluksa prostiranja toplote, koji je direktno određen toplotnom provodljivošću C i gradijentom temperature ∇I . Jednačina (2.5.6) definiše priraštaj temperature, odnosno promenu vrednosti piksela u iteraciji t . Ukoliko je toplotna provodljivost konstantna i prostorno invarijantna onda izraz (2.5.6) definiše izotropnu difuziju, odnosno širenje toplote podjednako u svim pravcima, što je ekvivalentno korišćenju standardnih Gausovih filtera za usrednjavanje. Kako bi sprečili prostiranje toplote, odnosno prostorno usrednjavanje preko značajnih ivica, Perona i Malik su uveli prostorno i vremenski zavisnu toplotnu provodljivost $C(x, y, t)$. Ideja je da ova provodljivost bude maksimalna u uniformnim regionima slične osvetljenosti, a da pada na nulu, pa samim tim i stvara toplotnu barijeru, na značajnim ivicama. Pošto sada proces širenja toplote nije izotropan ovaj postupak je nazvan anizotropna difuzija. Za vrednost prostorno varijabilne toplotne provodljivosti je odabrana funkcija:

$$C(x, y, t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{K} \right)^2} \quad (2.5.7)$$

pri čemu je $\|\nabla I\| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$ magnituda gradijenta, a K prag provodljivosti kojim se kontroliše osetljivost na ivice. Tumblin i Turk [29] su primetili da, iako generalno daje dosta dobre rezultate, postupak anizotropne difuzije ima problem u regionima velike osvetljenosti. Razlog predstavlja to, što se u svetlim regionima svi detalji predstavljaju velike gradijente, čime lokalno susedstvo postaje prilično ograničeno. Zbog toga oni predlažu novi filter LCIS (*Low Curvature Image Simplifiers*) koji je baziran na anizotropnoj difuziji, s tom razlikom što za granice regione proglašavaju nagle promene gradijenta, umesto naglih promena intenziteta.

Najpopularniji filter osetljiv na ivice predložili su Tomasi i Manduchi 1998. [34] i dali mu naziv bilateralni filter. Kao što to obično biva sa uspešnim idejama i ova je veoma jednostavna i inspiraciju nalazi direktno u formulaciji standardnog Gausovog filtra. Proces težinskog usrednjavanja se može definisati kao:

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot I(\mathbf{q}) \quad (2.5.8)$$

gde su I ulazna slika koja se filtrira, J izlazna slika nakon procesa filtriranja, $\mathbf{p}$ prostorna lokacija trenutnog izlaznog piksela, $\mathbf{q}$ lokacija piksela iz lokalnog susedstva Ω koje se koristi pri usrednjavanju i w_s vrednost težinskog faktora za svaki piksel u lokalnom susedstvu. Iz izraza (2.5.8) se vidi da težine piksela u lokalnom susedstvu zavise isključivo od njihovog položaja u odnosu na centralni piksel, odnosno maska filtra ima isti oblik u svakom delu slike, što znači da je proces filtriranja prostorno invarijantan. Ukoliko je funkcija po kojoj se menjaju težine Gausova (2.5.9) onda se filter naziva Gausov filter.

$$w(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5.9)$$

Svrha težinskih faktora w_s je da se veći značaj da pikselima koji se nalaze bliže trenutno procesiranom pikselu, pošto je verovatnoća da pripadaju istom nivou osvetljaja veća nego kada su prostorno udaljeni. Kako bi se sprečilo usrednjavanje piksela koji

pripadaju drugom regionu osvetljenosti, potrebno je na neki način smanjiti njihovu težinu u finalnoj sumi. Ovi pikseli mogu biti prostorno dosta blizu centralnom pikselu, što znači da će njihova prostorna težina w_s imati veliku vrednost. Pikseli koji pripadaju drugom nivou osvetljenosti u odnosu na centralni piksel, imaju dosta veliku razliku intenziteta u odnosu na intenzitet centralnog piksela. Ova razlika se može posmatrati kao udaljenost u prostoru intenziteta. Uvođenjem nove težine, koja penalizuje velike razlike u intenzitetu u odnosu na centralni piksel, dolazi se do bilateralnog filtra koji je definisan sa:

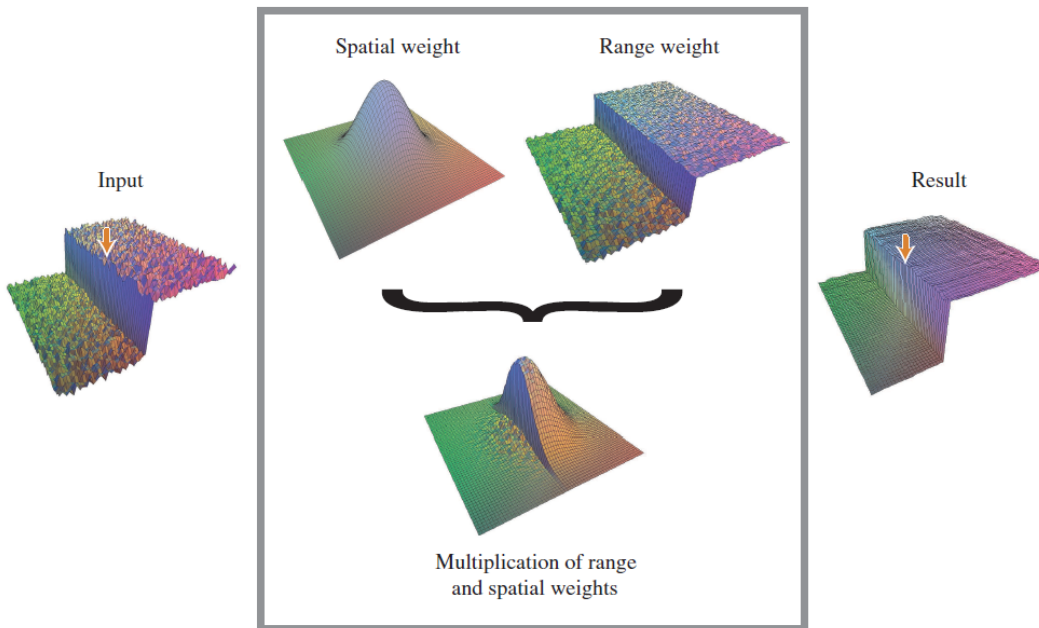
$$J(\mathbf{p}) = \frac{1}{k(\mathbf{p})} \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{q})\|) \cdot I(\mathbf{q}) \quad (2.5.10)$$

$$k(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{q})\|)$$

gde je $k(\mathbf{p})$ normalizacioni faktor koji obezbeđuje da je pojačanje filtra 1, odnosno da je suma svih težinskih koeficijenata 1. Iz (2.5.10) se sada vidi da će sa velikim težinama u sumu ulaziti samo oni pikseli kod kojih su ispunjena oba uslova:

- 1) Prostorno su bliski centralnom pikselu – pripadaju lokalnom susedstvu
- 2) Po intenzitetu su bliski centralnom pikselu – pripadaju istom regionu osvetljaja

Na slici Slika 2.3 prikazan je princip rada bilateralnog filtra, na primeru piksela koji se nalazi na granici između oblasti visokog i niskog intenziteta, pri čemu sam piksel pripada oblasti visokog intenziteta. Prostorne težine w_s imaju velike vrednosti za piksele koji su prostorno bliski centralnom pikselu, bez obzira na njihove intenzitete. S druge strane, težinski faktor w_r ima velike vrednosti samo za one piksele čiji je intenzitet blizak centralnom pikselu, odnosno koji se nalaze sa iste strane ivice kao centralni piksel. Množenjem ove dve težinske funkcije dobija se prostorno zavisna maska, prikazana na slici Slika 2.3, pomoću koje se u usrednjavanje uključuju samo oni pikseli koji se nalaze sa iste strane ivice. Na ovaj način se izbegava zamućenje značajnih ivica.



Slika 2.3 Princip rada bilateralnog filtra [35].

Iako su razne težinske funkcije predlagane u literaturi, do danas je najpopularniji ostao inicijalni predlog da se koriste Gausove funkcije. Svaki od težinskih faktora se kontroliše parametrom standardne devijacije Gausove funkcije i to σ_s za prostorne težine w_s i σ_r za težine po intenzitetima w_r . Parametar σ_s ima istu ulogu kao i kod standardnog Gausovog filtra i definiše veličinu lokalnog susedstva. Parametar σ_r definiše koje razlike u intenzitetima se smatraju značajnim i za koje je potrebno smanjiti težinu prilikom usrednjavanja. Mala vrednost ovog parametra dovodi do povećane selektivnosti bilateralnog filtra, čime se i smanjuje njegova sposobnost usrednjavanja zbog odbacivanja dosta piksela iz lokalnog susedstva. Za $\sigma_r \rightarrow \infty$ bilateralni filter postaje običan Gausov filter. Dosta lep pregled algoritma bilateralnog filtra i primena je dat u [35].

Najveći problem bilateralnog filtra je značajno povećanje računске kompleksnosti i nemogućnost korišćenja efikasnih postupaka filtriranja kao kod Gausovog filtra. Problem leži u tome, što je uvođenjem prostorno varijabilne maske filter postao nelinearan i nije moguće iskoristiti ubrzanje poput filtriranja u frekvencijskom domenu. Naivna realizacija bilateralnog filtra podrazumeva kompleksnost $O(K^2)$ po pikselu,

gde je K veličina lokalnog susedstva. Ovo je motivisalo mnoge istraživače da formulišu aproksimacije originalnog postupka filtriranja, kako bi se postigla efikasnija implementacija. Ove tehnike obično predstavljaju kompromis između efikasnosti implementacije i kvaliteta aproksimacije i više reči o njima biće u glavi 5.

Poslednjih godina pojavilo se dosta postupaka, između ostalih [36], [37], [38], [39], [40] koji obezbeđuju filtriranje osetljivo na ivice i koji unapređuju neke karakteristike bilateralnog filtra, ali uglavnom na račun povećane kompleksnosti. Međutim jedan od njih, pod nazivom vođeni filter (*guided filter*) [40] zavređuje posebnu pažnju jer nudi poboljšanje oba aspekta filtra, tj. značajno smanjenu kompleksnost i poboljšanje kvaliteta filtriranja u odnosu na bilateralni filter. Vođeni filter je inicijalno postavljen kao postupak združenog filtriranja (*joint filtering*), pri kojem se postupak filtriranja jedne slike kontroliše intenzitetima piksela druge slike. Bilateralni filter se takođe može iskoristiti u postupku združenog filtriranja ako se u izrazu (2.5.10) težine intenziteta w_r kontrolišu intenzitetima neke referentne slike I_R , umesto intenzitetima ulazne slike I . Tim postupkom se obezbeđuje da izlazna slika J , nakon filtriranja, ima ivice na istim mestima na kojima ih ima i referentna slika I_R . Ukoliko se filtrirana slika istovremeno koristiti i kao referenca ($I \equiv I_R$), združeni filter postaje običan filter osetljiv na ivice. U nastavku je dat opis vođenog filtra upravo za ovaj slučaj.

Ideja od koje polaze autori vođenog filtra je, da će ivice iz polazne slike biti sačuvane u postupku filtriranja, ukoliko postoji linearna veza između lokalnih susedstava Ω_k izlazne slike J i polazne slike I nakon procesa filtriranja. Odnosno ako važi:

$$J(\mathbf{p}) = a_k I(\mathbf{p}) + b_k, \forall \mathbf{p} \in \Omega_k \quad (2.5.11)$$

gde su a_k i b_k koeficijenti linearne funkcije i konstantni su u okviru lokalnog susedstva Ω_k . Diferenciranjem obe strane izraza (2.5.11) dobija se da važi $\nabla J = a \nabla I$, što potvrđuje polaznu pretpostavku da izlazna slika ima ivice na istim mestima kao ulazna slika. Koeficijenti linearne funkcije dobijaju se kao rešenje optimizacionog postupka:

$$O = \arg \min_{a_k, b_k} \sum_{\mathbf{p} \in \Omega_k} \left((a_k I(\mathbf{p}) + b_k - I(\mathbf{p}))^2 + \varepsilon \cdot a_k^2 \right) \quad (2.5.12)$$

gde ε predstavlja regularizacioni parametar, i određuje stepen osetljivosti filtra na

ivice. Prvi član u izrazu (2.5.12) predstavlja težnju da izlazna slika bude što sličnija ulaznoj, čime se čuvaju ivice, dok drugi član predstavlja kontrastežu penalizacijom velikih vrednosti koeficijenta a . Rešenje se dobija postupkom linearne regresije i ima oblik:

$$a_k = \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (2.5.13)$$

$$b_k = (1 - a_k) \cdot \mu_k \quad (2.5.14)$$

gde σ_k^2 i μ_k predstavljaju varijansu i srednju vrednost piksela u okviru lokalnog susedstva Ω_k . Kako svaki piksel ulazne slike upada u više različitih lokalnih susedstava Ω_k i kako su u svakom susedstvu definisane druge vrednosti koeficijenata a_k i b_k , finalni koeficijenti a_i i b_i , za transformaciju i -tog piksela slike, dobijaju se usrednjavanjem svih koeficijenata lokalnih susedstava kojima pripada piksel i odnosno:

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{k \in \Omega_i} a_k \\ b_i &= \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{k \in \Omega_i} b_k \end{aligned} \quad (2.5.15)$$

Pri čemu se ovi koeficijenti određuju za svaki piksel ulazne slike. Ukoliko se skup svih izlaznih koeficijenata označi sa a i b onda se izlazna slika dobija kao:

$$J = aI + b \quad (2.5.16)$$

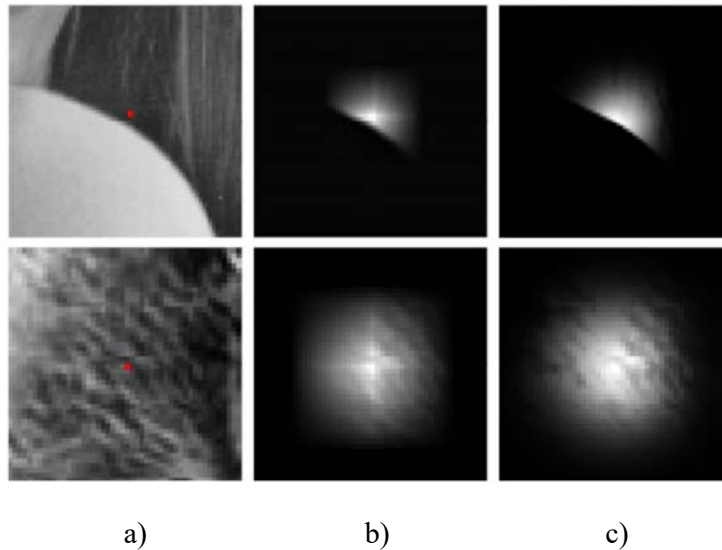
Autori vođenog filtra pokazuju da opisani postupak zaista predstavlja formu prostorno varijabilnog filtriranja i da se može predstaviti u obliku:

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{q}} W_{\mathbf{p},\mathbf{q}}(I) \cdot I(\mathbf{q}) \quad (2.5.17)$$

Pri čemu $\mathbf{p}$ predstavlja lokaciju izlaznog piksela, $\mathbf{q}$ lokaciju piksela koji ulaze u usrednjavanje a $W_{\mathbf{p},\mathbf{q}}$ prostorno varijabilnu težinsku mapu definisanu sa:

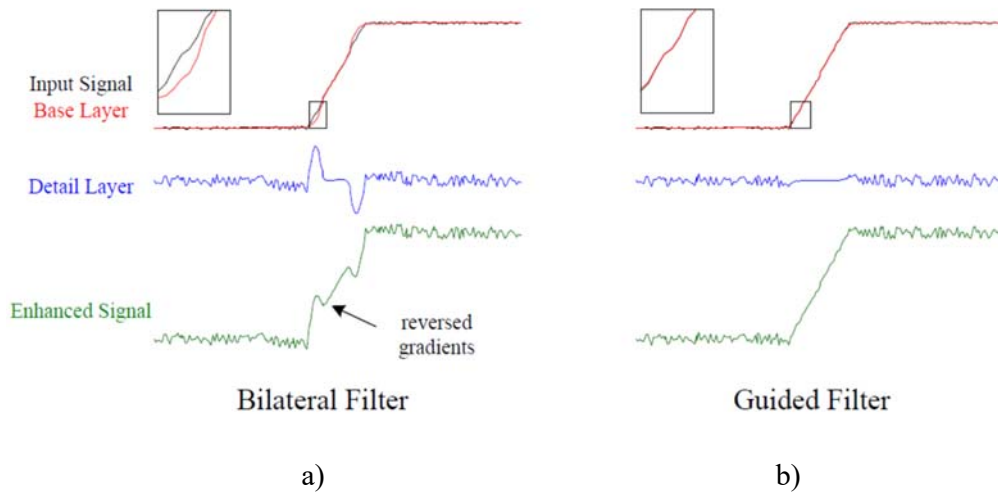
$$W_{\mathbf{p},\mathbf{q}}(I) = \frac{1}{|\Omega|^2} \sum_{k: (\mathbf{p},\mathbf{q}) \in \Omega_k} \left(1 + \frac{(I(\mathbf{p}) - \mu_k) \cdot (I(\mathbf{q}) - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right) \quad (2.5.18)$$

Autori takođe pokazuju da važi $\sum_q W_{p,q}(I) = 1$, tako da nema potrebe za normalizacijom izlaznih vrednosti kao kod bilateralnog filtra. Na slici Slika 2.4 je prikazan izgled prostorne maske vođenog i bilateralnog filtra, za slučaj filtriranja slike sa velikim promenama intenziteta, a) gornji red, i malim promenama intenziteta, a) donji red. Piksel koji se filtrira i za koji su prikazane prostorne maske, označen je crvenom tačkom na slici Slika 2.4 a). Izgled prostorne maske vođenog filtra dat je na slici Slika 2.4 b) dok je izgled prostorne maske bilateralnog filtra prikazan na slici Slika 2.4 c). Vidi se da prostorna maska vođenog filtra dosta liči na prostornu masku bilateralnog filtra i da spada u klasu filtara osetljivih na ivice.



Slika 2.4 Poređenje prostorne maske vođenog i bilateralnog filtra [40].

Što se tiče kompleksnosti vođeni filter zahteva ukupno 4 boks filtra veličine lokalnog susedstva Ω . Dva boks filtra se koriste za određivanje lokalne srednje vrednosti i varijanse, μ_k i σ_k^2 , dok se druga dva koriste za usrednjavanje vrednosti koeficijenata a_k i b_k koje je definisano izrazom (2.5.15). Postoje efikasne metode za brzo računanje boks filtara, poput integralnih suma, koje obezbeđuju da kompleksnost vođenog filtra spadne na $O(1)$, odnosno da bude nezavisna od veličine lokalnog susedstva. Više reči o efikasnim realizacijama vođenog filtra će biti u glavi 5.

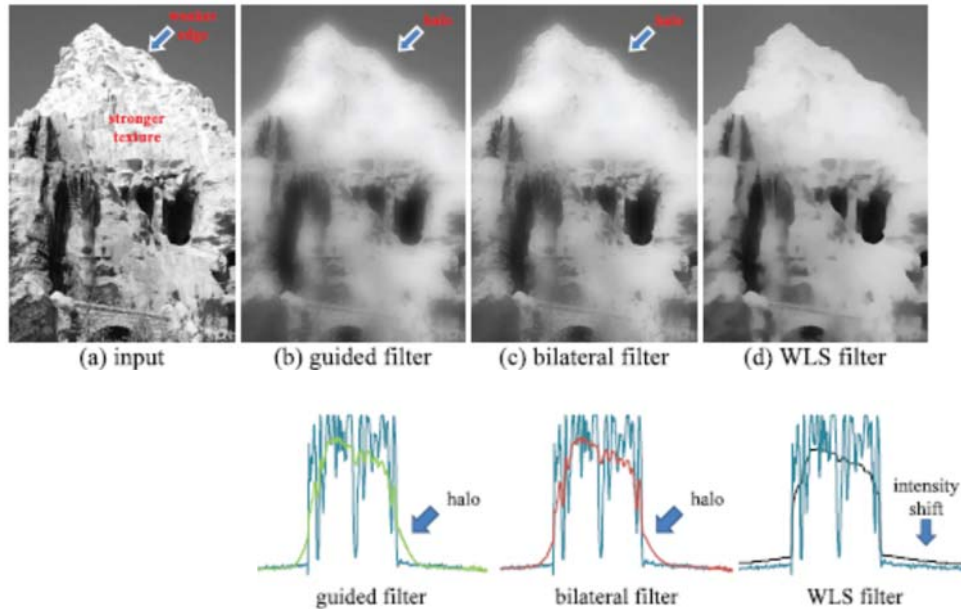


Slika 2.5 Otpornost na inverziju gradijenata bilateralnog i vođenog filtra prilikom pojačanja detalja [40].

Pored efikasnije realizacije, vođeni filtar uspešno izlazi na kraj sa problemom inverzije gradijenata ivice (*gradient reversals*), koje se javlja kod bilateralnog filtra i koje je prikazano na slici Slika 2.5 a). Problem inverzije gradijenata se može javiti prilikom pojačanja detalja, koji su ekstrahovani pomoću filtra osetljivog na ivice. Na slici Slika 2.5 a) se može primetiti da, iako je oblik ivice generalno sačuvan prilikom fitriranja bilateralnim filtrom, na krajevima dolazi do malih odstupanja. Ova odstupanja se prenose u sloj detalja i prilikom pojačanja mogu dovesti do neželjenog izoštravanja ivice, koje se ogleda u inverziji gradijenta. Problem nastaje zbog toga, što u okolini piksela koji se nalazi na strmoj ivici, nema piksela sličnih intenziteta. Zbog toga su sve težine u lokalnom susedstvu male, što dovodi do male vrednosti normalizacione konstante, i povećanog uticaja ostalih piksela u usrednjavanju. Ovo smanjenje selektivnosti filtra, za piksele koji se nalaze na samoj ivici, dovodi do degradacije oštine ivice i inverzije gradijenta. Kod vođenog filtra ovaj problem ne postoji, što se može primetiti na slici Slika 2.5 b). Može se pokazati da su u slučaju vođenog filtra gradijenti izlazne slike uvek istog znaka kao gradijenti na ulazu, što isključuje mogućnost pojave inverzije gradijenata. Ova osobina je od izuzetne važnosti za sve primene u kojima se obavlja neka manipulacija nad detaljima u slici, u šta spadaju i operatori za redukciju dinamičkog opsega.

Problem koji se može javiti kod vođenog filtra, prikazan je na slici Slika 2.6, i odnosi se na pojavu halo artefakata, odnosno zamućivanje ivica čiji je intenzitet sličan ili slabiji

od intenziteta detalja koje je potrebno ukloniti. Ovom problemu su podložni svi filtri koji imaju lokalno delovanje. Problem se može rešiti nekim filtrom osetljivim na ivice koji koristi globalnu optimizaciju, poput WLS filtra [36]. Međutim kompleksnost WLS filtra daleko nadilazi kompleksnost bilateralnog i vođenog filtra.



Slika 2.6 Pojava halo artefakata kod lokalnih filtara osetljivih na ivice u prisustvu jake tekstone [40].

2.2.2 Operatori zasnovani na dekompoziciji

Osnovna ideja od koje polaze lokalni operatori, koji se baziraju na dekompoziciji, je da je svetlost intenziteta I koja dolazi do senzora, zapravo proizvod iluminansa scene i i reflektanse objekata r :

$$I = r \cdot i \quad (2.5.19)$$

Dakle, objekti svojom reflektivnošću modulišu ambijentalno osvetljenje i na taj način utiskuju informaciju o svojoj strukturi u svetlo koje dolazi do senzora. Za razliku od reflektanse, koja nosi informaciju o detaljima i koja obično ima dosta visoke učestanosti, iluminansa scene, koja nosi informaciju o ambijentalnom osvetljaju se menja dosta sporije i obično ima blage prelaze. Interesantno je primetiti, da je za veliki dinamički opseg HDR scena, upravo zaslužna iluminansa. Na primer, prosečan osvetljaj u prostoriji je mnogo manji od osvetljaja koji se javlja napolju. Operatori koji se baziraju na dekompoziciji, razdvajaju informacije o iluminansi scene i reflektansi

objekata. Redukcija dinamičkog opsega se obavlja kompresijom iluminanse tako da se uklopi u dinamički opseg displeja. Finalne vrednosti osvetljaja, koje se šalju na displej, se dobijaju vraćanjem reflektanse na ovako kompresovanu iluminansu. Postavlja se pitanje na koji način razdvojiti iluminansu scene od reflektanse, s obzirom da svetlo koje dolazi do senzora predstavlja njihov proizvod prikazan u (2.5.19). Ovaj problem je odavno poznat u digitalnoj obradi slike i još Stockam je predložio 1972. [41] da se razdvajanje može obaviti korišćenjem linearnih filtara u logaritamskom domenu. Naime ako se primeni logaritam na obe strane izraza (2.5.19) dobija se:

$$\log I = \log i + \log r \quad (2.5.20)$$

Pošto je logaritamska funkcija monotona, komponente reflektanse i iluminanse zadržavaju svoj frekvencijski sadržaj, odnosno $\log i$ je i dalje pretežno niskih učestanosti, dok $\log r$ uglavnom sadrži visoke učestanosti. Primenom niskofrekventnog filtra na komponentu $\log I$, izdvaja se komponenta $\log i$. Pretpostavka o niskofrekventnom sadržaju iluminanse uglavnom važi svuda, osim na granicama regiona različite osvetljenosti. Naime, ako na sceni postoji više regiona različite osvetljenosti, što je uvek slučaj sa HDR scenama, onda će iluminansa imati visoke učestanosti na granicama ovih regiona. U procesu dekompozicije, visokofrekventni delovi iluminanse prelaze u komponentu reflektanse, što dovodi do problema inverzije gradijenta, koji je ranije opisan. Kako bi se ovo sprečilo, za izdvajanje komponente iluminanse, je potrebno koristiti neki od prethodno opisanih filtara osetljivih na ivice.

Prvi pristupi zasnovani na dekompoziciji su podrazumevali korišćenje Laplasove piramide za izdvajanje detalja iz slike. Laplasova piramida se dobija kao razlika između susednih nivoa Gausove piramide. Gausova piramida se dobija progresivnim filtriranjem polazne slike sve većim Gausovim filtrom, pri čemu se za dva susedna nivoa s i $s+1$ podešavaju veličine filtra tako da važi $\sigma_{s+1} = 2\sigma_s$. Veliki dinamički opseg se ogleda u velikim vrednostima detalja u okviru Laplasove piramide. Ograničavanjem ovih vrednosti, nekom nelinearnom funkcijom i rekonstrukcijom, dobija se izlazna slika manjeg dinamičkog opsega.

Pattanaik [42] je bio prvi koji je primenio ovaj pristup u svom multirezolucijskom modelu posmatrača. Funkcija kojom su modifikovani detalji, na svakom nivou

Laplasove piramide, kreirana je u skladu sa osetljivošću ljudskog vizuelnog sistema na kontrast, na toj prostornoj skali. Ovaj metod, međutim, proizvodi prilično izražene halo artefakte.

Tumblin i Turk [29] su među prvima primetili da se halo artefakti mogu značajno umanjiti, ako se pri dekompoziciji koristi filter osetljiv na ivice. Oni su predložili korišćenje LCIS filtra, koji su opisali u navedenom radu i koji se bazira na anizotropnoj difuziji. Nakon dekompozicije luminanse slike u logaritamskom domenu na 4 skale, redukciju dinamičkog opsega su postigli skaliranjem svake skale težinskim faktorom manjim od 1 i sabiranjem u izlaznu sliku. Pri tome se one skale koje odgovaraju nižim učestanostima više kompresuju od skala koje odgovaraju višim učestanostima, što je u skladu sa osnovnim ciljem kompresovanja iluminanse uz očuvanje reflektanse.

Li [43] je primetio da je jedan od osnovnih problema, koji nastaje pri primeni multirezolucijskih metoda za redukciju dinamičkog opsega, upravo u tome što se detalji na različitim nivoima Laplasove piramide modifikuju nelinearnim funkcijama. Ovakva modifikacija detalja, na različitim nivoima, dovodi do izobličavanja ivica prilikom rekonstrukcije, što se u izlaznoj slici manifestuje kao inverzija kontrasta ili halo artefakt. Ovi problemi se ne javljaju ukoliko se koeficijenti detalja, na različitim skalama, modifikuju linearnom funkcijom. Zbog toga Li izlazne vrednosti Laplasove piramide određuje kao ulazne vrednosti pomnožene faktorom pojačanja. Faktor pojačanja se dobija kada se izlazna vrednost Laplasove piramide, dobijena primenom nelinearne funkcije, podeli za ulaznom vrednošću. Li zatim predlaže da se ove vrednosti pojačanja usrednje korišćenjem Gausovog filtra, čime se dobija sporo promenljiva mapa aktivnosti. Faktor pojačanja, kojim se modifikuje svaki od koeficijenata Laplasove piramide, sada ne zavisi od vrednosti samih koeficijenata, već od sporo promenljive mape aktivnosti. Na ovaj način je očuvana morfologija ivica u sceni i značajno su smanjeni artefakti koji se javljaju pri rekonstrukciji

Polazeći od Li-ovog zapažanja da je osnovni uzrok pojave artefakata prilikom korišćenja Laplasovih piramida, upravo nezavisna manipulacija različitim frekvencijskim komponentama, korišćenjem nelinearnih funkcija, Paris [44] potpuno obrće postavku problema. Umesto da modifikacijom detalja u Laplasovoj piramidi formira izlaznu sliku željenih karakteristika, on za svaki koeficijent Laplasove piramide

najpre određuje na koji deo polazne slike on utiče. Zatim vrši transformacije tog dela slike tako da postigne određene karakteristike, poput ograničenja maksimalnog kontrasta i sl. Nakon toga ponovo računa dati koeficijent Laplasove piramide, i upisuje ga u izlaznu Laplasovu piramidu. Dakle, Paris zapravo forsira određeni izgled izlazne slike i za tako postavljene uslove izračunava jedan po jedan koeficijent izlazne Laplasove piramide. Na kraju, kada su svi koeficijenti izračunati može se uraditi rekonstrukcija izlazne slike, koja zbog postupka kreiranja sigurno nema problema sa izobličavanjem finalnih ivica.

Za razliku od prethodnih pristupa, koji se fokusiraju na dekompoziciju slike na veliki broj nivoa i redukciju značajnih detalja, Durand i Dorsey [45] su usvojili dosta jednostavniji pristup. Naime, prateći ideju o iluminansi i reflektansi, oni dele ulaznu sliku u logaritamskom domenu $\log_{10} I$ na niskofrekventnu komponentu $\log_{10} B$ i viskofrekventnu komponentu slike $\log_{10} D$. Niskofrekventna komponenta, koju su nazvali bazni sloj, uglavnom sadrži informacije o iluminansi. Visokofrekventna komponenta, koja se naziva i sloj detalja, uglavnom sadrži informacije o reflektansi. Proces dekompozicije se obavlja korišćenjem bilateralnog filtra. Kako bazni sloj sadrži informaciju o iluminansi scene, redukcija dinamičkog opsega se obavlja prostim skaliranjem baznog sloja u logaritamskom domenu, tako da nakon skaliranja zauzima neki predefinisani opseg. Durand i Dorsey su predložili da ovaj opseg bude $5 \log_{10}$ jedinica. Nakon skaliranja baznog sloja, obavlja se rekonstrukcija izlazne slike J sabiranjem skaliranog baznog sloja sa slojem detalja i prelaskom u linearni domen:

$$J = 10^{k \cdot \log_{10} B + \log_{10} D} = B^k \cdot D$$

$$k = \frac{5}{\max(\log_{10} B) - \min(\log_{10} B)} \quad (2.5.21)$$

Iz izraza (2.5.21) se vidi da je postupak redukcije dinamičkog opsega ostvaren primenom stepene funkcije na bazni sloj, odnosno na vrednost iluminanse scene.

Iako prethodno opisani postupak uglavnom daje zadovoljavajuće rezultate, dešava se da izlazne slike ne zauzimaju pun izlazni opseg, pa samim tim imaju problem smanjenog lokalnog kontrasta. Gu [37] je ovaj problem rešio popravkom kontrasta izlazne slike J nakon rekonstrukcije, jednostavnim razvlačenjem histograma. Prilikom dekompozicije slike, koristio je 4 nivoa detalja, pri čemu je postupak redukcije obavljen linearnim

skaliranjem na sličan način kao u [29]. Dekompozicija je obavljena korišćenjem unapređene varijante vođenog filtra, nazvane LEP (*Local Edge Preserving*), kod koje se regularizacioni parametar ε prostorno varira u zavisnosti od lokalne srednje vrednosti gradijenata ulazne slike.

Bennett i McMillan [46] su primenili isti postupak dekompozicije slike kao i Durand i Dorsey [45] ali su iskoristili drugačiji postupak redukcije dinamičkog opsega baznog sloja. Naime, umesto da skaliraju bazni sloj u logaritamskom domenu, što je ekvivalentno primeni stepene funkcije u linearnom domenu, Bennett i McMillan predlažu korišćenje adaptivne logaritamske funkcije, slične onoj koju je predložio Drago [24]:

$$m(x) = \frac{\log\left(\frac{x}{x_{\max}}(\psi - 1) + 1\right)}{\log(\psi)} \quad (2.5.22)$$

gde je $x_{\max}$ vrednost ulazne promenljive x koja se mapira na izlaznu vrednost 1, a ψ predstavlja parametar funkcije kojom se kontroliše snaga kompresije. Oni takođe predlažu prostorno varijabilnu modifikaciju detalja funkcijom istog oblika, s tim što se u ovu svrhu koristi druga vrednost parametra ψ . Ideja iza ove modifikacije detalja je da se detaljima koji pripadaju tamnijim regionima scene, koji se smatraju manje pouzdanim, da manja težina i smanji uticaj u finalnoj izlaznoj slici.

2.2.3 Retineks operatori

Algoritmi iz ove grupe se baziraju na Land-ovim istraživanjima iz 60-tih godina, vezanih za percepciju boja i osvetljaja. Naime, Land je uočio da subjektivni osećaj boje i osvetljaja ne zavisi samo od svetla koje pada na odgovarajući fotoreceptor, već da zavisi i od samog sadržaja scene, odnosno od pobude ostalih fotoreceptora. Zbog toga je svoju teoriju percepcije nazvao Retineks (*RETINa CortEX*), kao naznaku da percepcija zapravo predstavlja združeno delovanje prijema svetlosnih signala u mrežnjači (*retina*) i njihovu obradu u vizuelnom korteksu.

Jobson i Rahman su krajem 90-tih, na bazi Landove teorije, formulisali operator [47], [48] za reprodukciju HDR scena. Ideja je da se simulira adaptacija ljudskog vizuelnog sistema, na različite nivoe osvetljaja, tako što se snimljene vrednosti osvetljaja

normalizuju u odnosu na nivo adaptacije, koji se definiše kao prosečan osvetljaj u lokalnom susedstvu:

$$I_d = \log I_w - k \cdot \log(F * I_w) \quad (2.5.23)$$

gde je I_d vrednost osvetljaja nakon redukcije dinamičkog opsega, I_w ulazna vrednost osvetljaja HDR scene, F filter kojim se ekstrahuje lokalna vrednost osvetljaja i obično predstavlja Gausovu funkciju i k parametar kojim se definiše stepen lokalne adaptacije. Iako ne postoji u originalnom radu, ovde je uključen kontrolni parametar k , koji se često koristi u radovima koji se bave Retineks algoritmom. Jobson i Rahman su pored osnovnog Retineks algoritma [47], koji je definisan sa (2.5.23), predložili i multirezolucijsku varijantu Retineks algoritma [48]. Postupak se svodi na računanje vrednosti $I_{d,s}$ na različitim prostornim skalama, korišćenjem Gausovih filtara različitih širina. Finalni odziv se dobija kao težinska suma odziva na svim skalama.

Interesantno je primetiti da, ukoliko bi u izrazu (2.5.23) logaritam bio primenjen na I_w pre operacije usrednjavanja, onda bi se ovaj pristup zapravo sveo na pristup koji su predložili Durand i Dorsey [45], s tom razlikom što se umesto vraćanja u linearni domen primenom eksponenta, izlaz Retineks algoritma predstavlja u perceptualno uniformnom, logaritamskom domenu. U slučaju $k=1$, kao što je predloženo u originalnoj varijanti rada, komponenta iluminanse se potpuno odbacuje i na izlaz se prosleđuje samo reflektansa. Usrednjavanje u linearnom domenu pre primene logaritma su predložili Jobson i Rahman [47], uz argument da su na taj način postizali manja izobličenja u izlaznim slikama. Ovaj zaključak je donet empirijski, bez uporišta u načinu funkcionisanja ljudskog vizuelnog sistema.

Iako Retineks algoritmi omogućavaju dobru reprodukciju detalja, izlazne slike obično imaju značajno smanjen globalni kontrast. Poslednjih godina pojavila su se nova rešenja bazirana na Retineks teoriji, koja pokušavaju da razreše ove probleme. Otpornost na halo artefakte i inverziju gradijenta se postiže korišćenjem filtara osetljivih na ivice u procesu dekompozicije [49] [50] [51]. Robusnost i poboljšanje globalnog kontrasta se postiže uvođenjem koraka globalne adaptacije pre lokalne adaptacije Retineks algoritmom [52] [53] i uvođenjem postprocesiranja, poput razvlačenja histograma [54].

2.2.4 Gradijentni operatori

Gradijentni operatori se baziraju na činjenici da velike promene osvetljaja, koje su zaslužne za veliki dinamički opseg scene, takođe kreiraju velike vrednosti gradijenata. Pošto detalji stvaraju dosta manje gradijente, smanjenje dinamičkog opsega, uz očuvanje detalja, se može postići, smanjenjem amplitude velikih gradijenata, uz očuvanje gradijenata malih vrednosti. Problem sa kojim se susreću svi operatori koji rade u gradijentnom domenu, je kako od željene mape gradijenata, dobijene nakon odgovarajućih manipulacija, odrediti izlaznu sliku. Rešenje se svodi na traženje izlazne slike J čiji su gradijenti što sličniji željenim, odnosno koja minimizuje funkciju greške:

$$J = \arg \min \sum_{i=1}^N (\nabla J(i) - G(i))^2 \quad (2.5.24)$$

gde su G željene vrednosti gradijenata izlazne slike, a N predstavlja ukupan broj piksela. Pokazuje se da rešenje jednačine (2.5.24) treba da zadovoljava Poasonovu jednačinu:

$$\nabla^2 J = \text{div } G \quad (2.5.25)$$

Određivanje izlazne slike, odnosno rešavanje Poasonove jednačine predstavlja najzahtevniji korak gradijentnih operatora.

Fattal [55] je prvi uspešno primenio procesiranje u gradijentnom domenu za kompresiju dinamičkog opsega. Ideja je da se vrednosti gradijenata, ulazne slike, pomnože adaptivnom funkcijom pojačanja, koja ima za cilj da potisne velike i sačuva male vrednosti gradijenata. Postupak modifikacije vrednosti gradijenata dat je sa:

$$G = \nabla H \cdot \Phi \quad (2.5.26)$$

gde G predstavljaju izlazne vrednosti gradijenata, H predstavlja vrednost osvetljaja ulazne slike u logaritamskom domenu a Φ prostorno varijabilnu funkciju pojačanja. Za određivanje funkcije pojačanja Fattal koristi multirezolucijski pristup. Naime, jake ivice, koje se javljaju kao posledica velikih razlika osvetljaja, daće velike vrednosti na svim nivoima piramide gradijenata (na svim prostornim skalama). S druge strane, detalji će dati velike vrednosti gradijenata samo na najnižim nivoima piramide, pri čemu njihova vrednost brzo opada sa povećanjem skale. Fattal zato definiše lokalnu funkciju pojačanja koja se računa na svakoj skali ponaosob:

$$\varphi_s = \frac{\alpha}{\|\nabla H_s\|} \left(\frac{\|\nabla H_s\|}{\alpha} \right)^\beta \quad (2.5.27)$$

gde ∇H_s predstavlja mapu gradijenata računatu na s -tom nivou Gausove piramide logaritamskih osvetljaja H . Parametri α i β kontrolišu stepen kompresije. Vrednost parametra β je uvek manja od 1 i obično uzima vrednosti između 0.8 i 0.9. Na taj način se postiže da se funkcijom pojačanja φ više potiskuju velike vrednosti gradijenata. Globalna funkcija pojačanja Φ dobija se množenjem svih lokalnih funkcija pojačanja φ_s , pri čemu se sve one najpre dovedu na istu rezoluciju kao polazna slika. Iz izraza (2.5.26) se može primetiti da, bez obzira na to što se analiza obavlja korišćenjem više različitih prostornih skala, finalna modifikacija gradijenta se obavlja samo na najvišoj prostornoj skali. Na ovaj način se obezbeđuje konzistentna modifikacija svih frekvencijskih komponenti, čime se značajno smanjuje pojava artefakata.

Poboljšanja prethodno opisanog gradijentnog operatora je predstavio Mantiuk [56]. Naime, on je primetio da Fattal-ov pristup, često proizvodi rezultate koji imaju veoma izražen lokalni ali značajno smanjen globalni kontrast. Ovo je posledica toga što funkcija greške (2.5.24), koja se koristi pri rekonstrukciji, posmatra vrednosti gradijenata isključivo na najvišoj prostornoj skali, odnosno uzima u obzir odnose samo susednih piksela. Mantiuk zato predlaže da se i pri rekonstrukciji u obzir uzme nekoliko nivoa Gausove piramide. Pored toga, Mantiuk predlaže da se na svakom nivou Gausove piramide, za svaki piksel, posmatra odgovarajuće lokalno susedstvo. Na taj način izraz za rekonstrukciju postaje:

$$J = \arg \min \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Omega_i} \frac{(\nabla J_s(i, j) - G_s(i, j))^2}{\Delta G_{simpl}(G_s(i, j))} \quad (2.5.28)$$

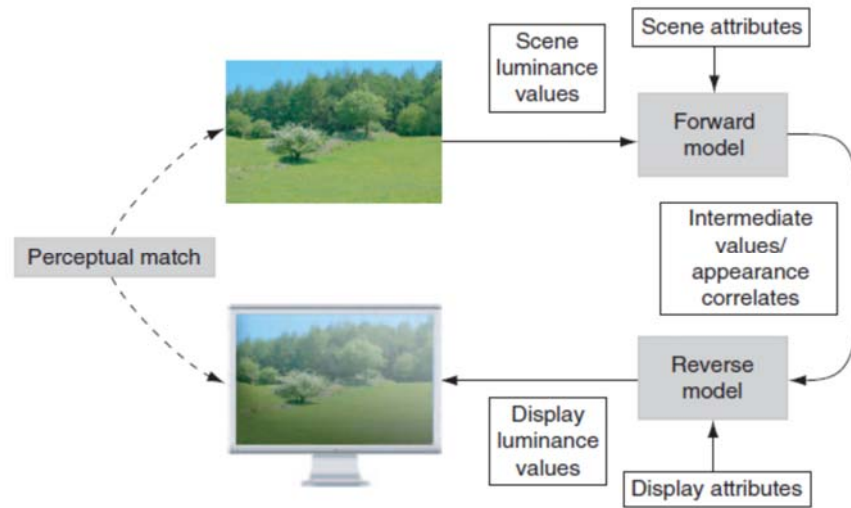
gde S predstavlja ukupan broj nivoa Gausove piramide koji se koristi pri rekonstrukciji, N ukupan broj piksela u slici, Ω_i lokalno susedstvo koje se koristi pri rekonstrukciji i ΔG_{simpl} funkcija osetljivosti ljudskog vizuelnog sistema na kontrast kojom se obezbeđuje da perceptualno značajne vrednosti gradijenata budu bolje rekonstruisane. Vrednosti gradijentata se ne računaju kao razlike susednih piksela, već kao razlike između centralnog piksela i i ostalih piksela j iz lokalnog susedstva Ω_i . Što se tiče

redukcije dinamičkog opsega, Mantiuk uvodi transduktorsku funkciju, koja vrednosti kontrasta prevodi u perceptualno uniformni domen „jedva primetnih razlika“. Redukcija dinamičkog opsega se u ovom domenu obavlja prostim linearnim skaliranjem svih vrednosti. Što se tiče kompleksnosti, i u ovom rešenju ostaje problem rekonstrukcije izlazne slike, odnosno rešavanje jednačine (2.5.28), koja predstavlja najzahtevniji deo ovog operatora.

2.2.5 Operatori zasnovani na modelu percepcije boja

Problemom percepcije boja bavi se naučna disciplina pod nazivom kolorimetrija. Ovaj problem je dosta kompleksan, pošto percepcija boje i osvetljaja zavisi od velikog broja faktora, kao što su jačina i spektralni sadržaj pozadinskog osvetljenja, osvetljenost i refleksija okolnih objekata, prostorna učestanost detalja u sceni i sl. Prilikom posmatranja neke scene, posmatrač joj pridružuje perceptualne karakteristike, kao što su sjajnost (*brightness*), obojenost (*chromaticity*), nijansa boje (*hue*) i sl. Vrednosti ovih perceptualnih karakteristika u određenoj tački prostora ne zavise samo od spektralnog sadržaja svetla, koje dolazi sa te tačke prostora, već od spektralnog sadržaja celokupne scene. To znači da dva identična fizička stimulusa mogu proizvesti različite perceptualne odzive i obrnuto ako su uslovi pod kojima su se desili (odnosno stimulusi koji dolaze sa ostalih delova scene) različiti. Modeli percepcije boja (*color appearance models*) imaju za cilj da na osnovu fizičkih stimulusa, poput spektralnog sadržaja svetla koje dolazi sa scene, odrede vrednosti perceptualnih parametara, kao što su osvetljenost, obojenost i nijansa. Pošto je problem veoma složen, ovi modeli se fokusiraju na veoma jednostavne slučajeve, kao što je uniformno osvetljeni krug na uniformno osvetljenoj pozadini i sl. Najpoznatiji modeli percepcije boja, koji su i standardizovani, su CIECAM97 (CIE Color Appearance Model) i unapređena verzija CIECAM02. Odličan uvod u kolorimetriju može se naći u [3]. Koncept korišćenja modela percepcije boja u reprodukciji slika širokog dinamičkog opsega je prikazan na slici Slika 2.7. Cilj je da se na osnovu modela percepcije i fizičkih vrednosti osvetljaja scene, odrede perceptualne karakteristike, uzimajući u obzir nivo adaptacije, spektralnu karakteristiku ambijentalnog osvetljenja i sl. Zatim se, na osnovu ovih perceptualnih karakteristika scene, korišćenjem inverznog modela i karakteristika displeja računaju fizičke vrednosti osvetljaja koje je potrebno poslati displeju. Cilj je da

se ostvari perceptualno poklapanje između realne HDR i reprodukovane LDR scene.



Slika 2.7 Reprodukcijska HDR slika korišćenjem modela percepcije boja [2].

Iako omogućavaju modelovanje velikog broja efekata koji se javljaju prilikom posmatranja scene, modeli percepcije boja CIECAM97 i CIECAM02 su namenjeni za korišćenje u veoma uprošćenim i dobro kontrolisanim uslovima. Zbog toga se ovi modeli ne mogu direktno primeniti na određivanje parametara percepcije kompleksnih stimulusa, kao što su slike prirodnih scena. Kako bi se ovaj problem prevazišao, razvijeni su operatori za redukciju dinamičkog opsega koji, koriste manje složene modele percepcije boja ali uključuju bitne efekte percepcije složenih scena. Prilikom opisa ovih operatora fokus će biti na delu koji obezbeđuje upravo redukciju dinamičkog opsega, pošto je to od interesa za ovaj rad.

Jedan od prvih operatora koji je nastao direktno iz CIECAM02 modela je iCAM [57] koji su 2002. predstavili Fairchild i Johnson. iCAM uključuje prostorno varijabilnu ekstenziju CIECAM02 modela. Kao ulaz se očekuje slika u XYZ kolor sistemu kalibrisana u cd/m^2 . Ukoliko je slika u relativnim jedinicama, potrebno ju je skalirati u odgovarajući opseg, pošto ovo značajno utiče na dalje procesiranje. Nakon određivanja lokalne hromatske adaptacije u RGB kolor sistemu, vrši se prelazak u LMS kolor sistem. Ovaj kolor sistem ima za cilj da različitim komponentama boje predstavi odziv različitih vrsta čepića koji se javljaju u mrežnjači. Upravo u ovom kolor sistemu se obavlja redukcija dinamičkog opsega, odnosno adaptacija na lokalni nivo osvetljaja:

$$\begin{aligned}
 L'(x, y) &= |L(x, y)|^{0.43 \cdot F_L(x, y)} \\
 M'(x, y) &= |M(x, y)|^{0.43 \cdot F_L(x, y)} \\
 S'(x, y) &= |S(x, y)|^{0.43 \cdot F_L(x, y)}
 \end{aligned}
 \tag{2.5.29}$$

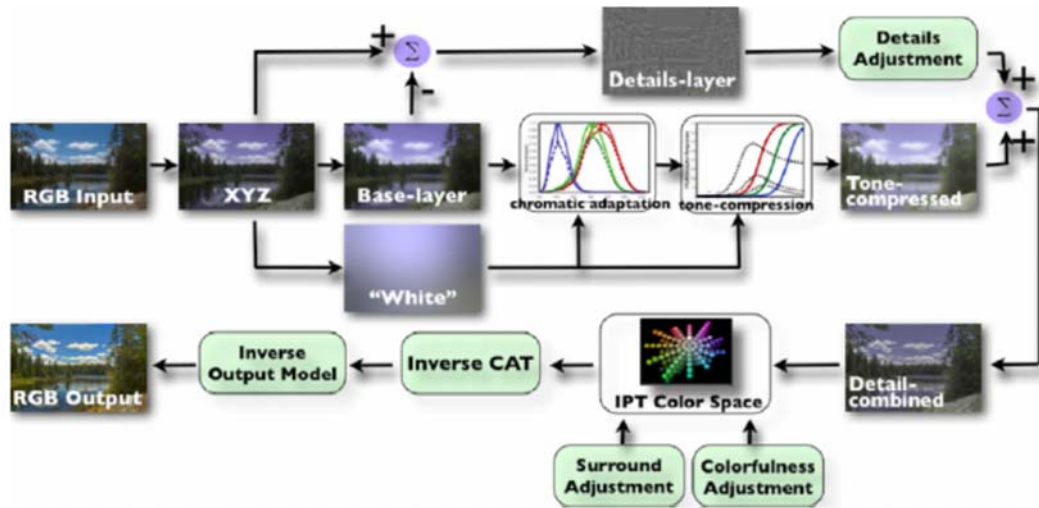
Funkcija adaptacije F_L definisana je kao:

$$\begin{aligned}
 F_L(x, y) &= \frac{1}{7} \left(Y_a(x, y) \left(\frac{1}{5Y_a(x, y) + 1} \right)^4 + \right. \\
 &\quad \left. 0.1 \left(1 - \left(\frac{1}{5Y_a(x, y) + 1} \right)^4 \right)^2 \sqrt[3]{5Y_a(x, y)} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.5.30}$$

pri čemu lokalni nivo adaptacije Y_a predstavlja komponentu luminanse iz XYZ kolor sistema koja je filtrirana Gausovim filtrom, čija je veličina jednaka trećini manje dimenzije slike.

Prilikom prikaza slike na displeju potrebno je primeniti inverzni model, uz korišćenje karakteristika displeja.

Iako daje dobre rezultate za slike uskog ili srednjeg dinamičkog opsega, iCAM se nije dobro pokazao prilikom reprodukcije slika širokog dinamičkog opsega. Osnovni problemi iCAM operatora su nedovoljno dobra reprodukcija lokalnog kontrasta i smanjenje intenziteta boja. Zbog toga je 2007. predstavljena unapređena verzija ovog operatora nazvana iCAM06 [58].



Slika 2.8 Blok dijagram iCAM06 operatora [58].

Blok dijagram iCAM06 algoritma je prikazan na slici Slika 2.8. Problem lokalnog kontrasta je rešen eksplicitnim uvođenjem dekompozicije na bazni sloj i sloj detalja korišćenjem bilateralnog filtra, slično kao što su predložili Durand i Dorsey [45]. Kompresija dinamičkog opsega se obavlja adaptacijom baznog sloja, korišćenjem sledeće sigmoidne funkcije, koja podseća na Naka-Rushton jednačinu (2.2.2) odziva fotoreceptora i ima oblik:

$$C'_a = \frac{400 \cdot \left(F_L \frac{C'_b}{100} \right)^p}{27.13 + \left(F_L \frac{C'_b}{100} \right)^p} + 0.1, \text{ za } C \in \{R, G, B\} \quad (2.5.31)$$

gde C'_b predstavlja bazni sloj svake od kolor ravni R, G, B nakon prolaska kroz procesa hromatske adaptacije, C'_a predstavlja bazni sloj kolor ravni nakon kompresije dinamičkog opsega, F_L je funkcija kompresije definisana izrazom (2.5.30) dok je p korisnički parametar kojim se kontroliše stepen kompresije.

Detalji se modifikuju u XYZ kolor sistemu na sledeći način:

$$C'_d = C_d^{(F_L + 0.8)^{0.25}}, \text{ za } C \in \{X, Y, Z\} \quad (2.5.32)$$

Ovaj izraz modeluje Stevenson-ov efekat, koji predviđa veću osetljivost na kontrast za veće nivoe adaptacije.

Nakon kompresije dinamičkog opsega baznog sloja i vraćanja detalja, vrši se prilagođavanje boja u IPT kolor sistemu. U ovom koraku se između ostalog modeluje Hunt-ov efekat koji predviđa jači intenzitet boja u prisustvu većeg intenziteta osvetljaja. Primenom inverznog modela, dobijaju se vrednosti osvetljaja koje se mogu poslati na displej.

2.2.6 Ostali operatori

U poslednjih 20 godina nastao je veliki broj operatora za reprodukciju HDR slika. U prethodnim odeljcima, u okviru ove glave, predstavljeni su glavni operatori koji prate neki od osnovnih pravaca, u kojima se ova oblast razvija. Ipak, pored ovih pravaca postoje interesantna rešenja, vredna pomena, koja se ne uklapaju u gore navedene klasifikacije.

Boschetti [59] koristi adaptivnu lokalnu ekvalizaciju histograma sa ograničenjem kontrasta, CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*), za redukciju dinamičkog opsega HDR slika. Pri tome se parametri CLAHE algoritma određuju na osnovu lokalne srednje vrednosti i varijanse logaritamskog osvetljaja scene. Kimura i Ikebe [60] predlažu postupak za smanjenje halo artefakata, koji se mogu javiti prilikom lokalne ekvalizacije histograma. Duan [61] predlaže metod adaptacije histograma za reprodukciju HDR slika, koji predstavlja kompromis između linearnog mapiranja i ekvalizacije histograma. Kako bi se ublažili efekti agresivne lokalne ekvalizacije histograma, Shimoyama [62] predlaže da se korišćenjem lokalne statistike, odnosno histograma, odredi funkcija, koja predstavlja težinsku sumu tri različite stepene funkcije. Ove stepene funkcije su definisane tako da poboljšavaju regione niske, visoke i srednje osvetljenosti. Na taj način se dobija robusnost stepene transformacije, pri čemu je uvedena prostorna adaptivnost. Korišćenje prostorno adaptivnih stepenih funkcija je ispitivano i u [63].

Jedan od najnovijih operatora, koji je predstavio Eilersten [64], pokazuje dosta dobre performanse po pitanju kvaliteta izlazne slike. On takođe koristi postupak dekompozicije na bazni sloj i sloj detalja, kao Durand i Dorsey [45], međutim umesto već poznatih filtara osetljivih na ivice, nudi formulaciju novog iterativnog filtra, zasnovanog na pojednostavljenju anizotropne difuzije [33] definisane izrazom (2.5.6). Pojednostavljenje se zasniva na korišćenju izotropnog filtra čiji je iterativni postupak

predstavljen kao:

$$I^{k+1}(\mathbf{p}) = I^k(\mathbf{p}) + V(I^k, \mathbf{p}) \quad (2.5.33)$$

gde je I^k trenutna vrednost filtrirane slike, I^{k+1} vrednost u narednoj iteraciji a $V(I^k)$ priraštaj vrednosti filtrirane slike u trenutnoj iteraciji za lokaciju piksela $\mathbf{p}$ na slici. Priraštaj se određuje kao:

$$V(I, \mathbf{p}) = \alpha \cdot w_r \left(\left\| \nabla_{\Omega_p} I(\mathbf{p}) \right\| \right) \sum_{\mathbf{q} \in \Omega_p} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) (I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{q})) \quad (2.5.34)$$

gde w_r predstavlja funkciju koja penalizuje velike vrednosti gradijenata a $\nabla_{\Omega_p} I(\mathbf{p})$ predstavlja srednju vrednost gradijenta u lokalnom susedstvu Ω_p . Suma u izrazu (2.5.34) predstavlja težinsku srednju vrednost u lokalnom susedstvu Ω_p pri čemu je za težine korišćena Gausova funkcija. Osetljivost na ivice se kontroliše parametrom α . Može se primetiti da ovaj filter koristi uzastopnu primenu Gausovih filtara. Na ovaj način je omogućena upotreba efikasnih algoritama za izračunavanje rezultata Gausovog filtriranja.

Redukcija dinamičkog opsega se obavlja nad baznim slojem, pri čemu se koristi funkcija koja minimizuje distorzije u kontrastu slično kao što je predložio Mantiuk u [27]. Razlika u odnosu na prethodno rešenje je u tome, da se umesto globalnih koriste lokalni histogrami, čime se proces mapiranja iz globalnog pretvara u lokalni. Kako bi se pojednostavilo izračunavanje ne koristi se transduktorska funkcija, već se kontrast definiše kao razlika susednih vrednosti u logaritamskom domenu [56]. U procesu optimizacije se ne koristi multirezolucijski pristup, što podseća na klasične gradijentne operatore [55]. Razlika u odnosu na njih je u tome, što se prilikom optimizacije koristi informacija iz histograma, koja daje veće težine onim vrednostima gradijenata, koji su najzastupljeniji u tom delu scene. Prilikom modifikacije detalja, uzima se u obzir osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na kontrast za različite vrednosti osvetljaja. Na osnovu toga se podešavaju pojačanja detalja, tako da detalji koji su bili ispod praga percepcije u HDR slici (u nivou šuma) ostanu ispod praga percepcije i u LDR slici.

2.3 Diskusija

I pored veoma velikog broja operatora koji su predstavljeni tokom godina, oblast redukcije dinamičkog opsega HDR slika se i dalje veoma živo razvija. Naime sa sve većom dostupnošću HDR sadržaja, potreba za univerzalnim, robusnim, fleksibilnim operatorom za reprodukciju, koji bi se mogao koristiti na različitim uređajima, veća je nego ikad. Tokom godina su se pojavile i perceptualne studije [65], [66], koje daju rezultate subjektivnih testiranja različitih operatora za reprodukciju HDR slika. U ovim studijama je istaknuto da globalni operatori pokazuju superiorniju reprodukciju globalnog kontrasta u odnosu na lokalne operatore. Globalni kontrast je jako važan parametar za subjektivni utisak kvaliteta slike. Međutim, globalni operatori imaju tendenciju da potiskuju detalje, pogotovo u regionima veće osvetljenosti, koji se najviše kompresuju. Lokalni operatori, druge strane imaju dobru reprodukciju detalja i lokalnog kontrasta. Problem je što se ovo povećanje lokalnog kontrasta često nepovoljno odražava na globalni kontrast, koji je značajno smanjen kod lokalnih operatora. Dakle, potrebno je da operator za reprodukciju HDR slika na neki način ostvari što bolji kompromis između ova dva suprotstavljena zahteva. Drugi problem koji se javlja prilikom projektovanja operatora za reprodukciju HDR slika su različite preferencije posmatrača. Naime, iz studije sprovedene u [21] jasno je da verna reprodukcija HDR scene ne garantuje najbolji subjektivni utisak kod posmatrača. Problem postaje još kompleksniji, ako se uzme u obzir da različiti posmatrači mogu imati različite afinitete, po pitanju reprodukcije slika. Većina predstavljenih operatora nudi određeni stepen kontrole nad izgledom izlazne slike. Problem je što ovi parametri često nisu intuitivni i ne omogućavaju nezavisnu kontrolu nad različitim aspektima izlazne slike. Naime, promena parametra često utiče na više različitih aspekata scene, poput nivoa detalja i osvetljaja. U studiji koja se bavi subjektivnim afinitetima posmatrača i mogućnostima kreiranja univerzalnog operatora za reprodukciju HDR slika, Lenzen [67] zaključuje da dobar operator za reprodukciju treba da ponudi mogućnost nezavisnog podešavanja osvetljaja scene, globalnog kontrasta, lokalnog kontrasta i zasićenosti boja.

Ovo je predstavljalo motivaciju za razvoj novog lokalnog operatora za reprodukciju HDR slika koji ima za cilj da obezbedi dobar globalni kontrast, poput globalnih operatora, ali u isto vreme i dobru reprodukciju detalja, posebno u svetlim regionima, koji su najproblematičniji. Cilj je bio da se ponudi robusno rešenje, koje za fiksne

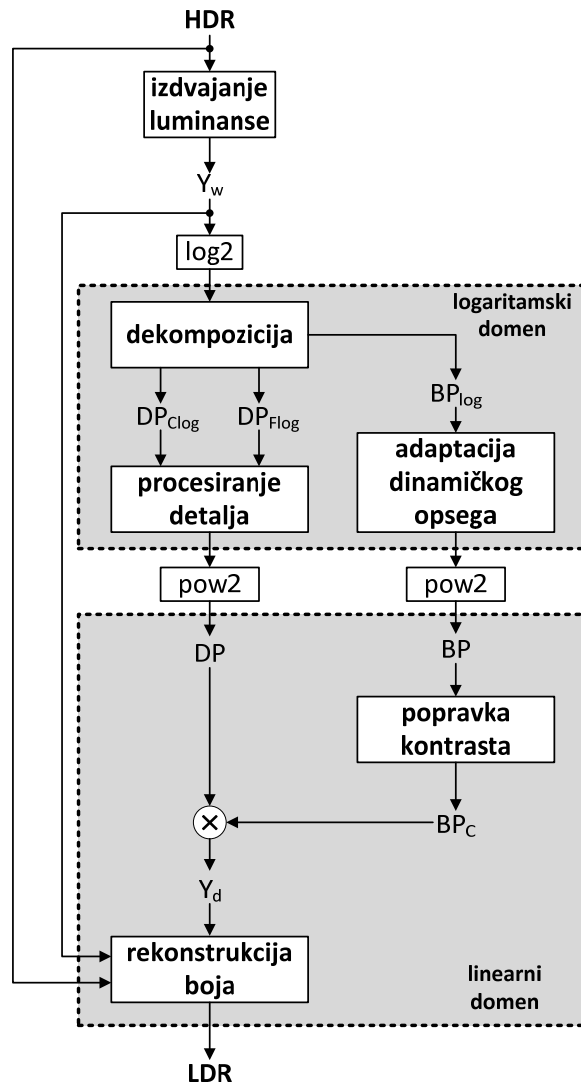
parametre konzistentno daje dobre rezultate, na najrazličitijim scenama, ali u isto vreme ima mogućnost nezavisnog podešavanja različitih karakteristika scene poput osvetljenosti, globalnog kontrasta, lokalnog kontrasta, oštine i zasićenosti boja. Predstavljeni operator je nazvan ELTM (*Enhanced Local Tone Mapping*) čime se naglašava da operator kombinuje metode redukcije dinamičkog opsega (*tone mapping*) i poboljšanja kvaliteta slike (*image enhancement*) u jedan jedinstveni algoritam, koji ima za cilj da proizvede najbolji subjektivni utisak kod posmatrača.

3 LOKALNI OPERATOR – ELTM

Predstavljeni lokalni operator za reprodukciju HDR slika je opisan u patentu [68] kompanije Intel iz 2017. godine i objavljen u radu [69] iz 2018. godine.

3.1 Opis algoritma

Na slici Slika 3.1 je prikazan blok dijagram ELTM operatora. Ulaz u algoritam predstavlja mapa osvetljenosti koja se sastoji iz tri komponente boje R_w, G_w, B_w , čije vrednosti linearno zavise od količine svetla koje pada na senzor. Mapa osvetljenosti se može dobiti na bilo koji od načina opisanih u odeljku 1.3. Na početku algoritma se obavlja normalizacija ovih komponenti boje, deljenjem svih piksela maksimalnom vrednošću iz svih kanala zajedno. Normalizacija omogućava da ELTM radi robusno za ulaze koji se nalaze u bilo kom opsegu vrednosti. Ukoliko je unapred poznat okvirni opseg vrednosti ulaza, normalizacija se može obaviti konstantnim faktorom skaliranja.



Slika 3.1 Blok dijagram ELTM algoritma [69].

Celokupan proces redukcije dinamičkog opsega se u ELTM algoritmu obavlja nad komponentom luminanse. Ovo je uobičajen pristup kod operatora za redukciju dinamičkog opsega iz više razloga. Naime, luminansa sadrži informaciju o osvetljaju scene, koji zapravo i stvara povećani dinamički opseg. Drugo, nezavisnom kompresijom komponenti boje može se narušiti njihov odnos, pa samim tim i izgled boja na slici. Kompresijom luminanse smanjuje se dinamički opseg, a u koraku rekonstrukcije boja se vodi računa da njihov odnos ostane nenarušen. Treći razlog je značajno manja kompleksnost, jer se obrađuje samo jedna ravan slike umesto tri.

Relativna luminansa Y_w se računa kao težinska suma ulaznih komponenti boja, na

osnovu transformacije definisane u standardu za HDTV ITU-R BT.709:

$$Y_w = 0.2126 \cdot R_w + 0.7152 \cdot G_w + 0.0722 \cdot B_w \quad (3.1.1)$$

Ova transformacija direktno odražava osetljivost ljudskog vizuelnog sistema na različite komponente spektra. Komponenta luminanse se zatim prevodi u logaritamski domen gde se obavlja dekompozicija, korišćenjem filtra osetljivog na ivice. Logaritamska luminansa se razdvaja na bazni sloj $BP_{\log}$ i dva sloja detalja $DP_{C\log}$ i $DP_{F\log}$. Zatim se obavlja popravka ekspozicije i adaptacija dinamičkog opsega baznog sloja linearnim skaliranjem, tako da se uklopi u unapred definisani opseg vrednosti. Ovaj korak ne određuje finalni izgled slike, već ima za cilj da ograniči opseg vrednosti baznog sloja. Naime, vrednosti baznog sloja mogu dosta varirati za različite HDR scene. Ograničenje opsega baznog sloja, povećava robusnost operatora i olakšava kontrolu narednih koraka algoritma. Slojevi detalja se zasebno modifikuju i nakon toga sabiraju u jedan izlazni sloj detalja $DP_{\log}$. Razdvajanje detalja na dva zasebna sloja, koja predstavljaju krupne ($DP_{C\log}$) i sitne detalje ($DP_{F\log}$), omogućava nezavisnu kontrolu lokalnog kontrasta i oštine slike. Naime, informacija o lokalnom kontrastu je sadržana u sloju krupnih detalja, dok se oština slike može menjati manipulacijom slojem sitnih detalja. Nakon prelaska u linearni domen, primenom stepene funkcije, obavlja se popravka kontrasta baznog sloja. Popravka kontrasta se obavlja nelinearnom funkcijom, baziranoj na logaritmu, koja se prilagođava statistici baznog sloja. Ovaj korak algoritma je ključan, jer on zapravo restaurira globalni kontrast, pri tom ostavljajući prostor za rekonstrukciju detalja. Detalji se vraćaju u bazni sloj, popravljenog kontrasta, jednostavnim množenjem, nakon čega se dobija izlazna vrednost osvetljaja Y_d . Izlazne komponente boje R_d, G_d, B_d određuju se na osnovu ulaznih komponenti boje R_w, G_w, B_w , ulaznog osvetljaja Y_w i izlaznog osvetljaja Y_d . U nastavku će detaljno biti opisan svaki od delova ELTM algoritma. Za demonstraciju koraka procesiranja korišćena je mapa osvetljaja *belgium.hdr* koja je javno dostupna na Fattal-ovom sajtu [70].

3.1.1 Dekompozicija

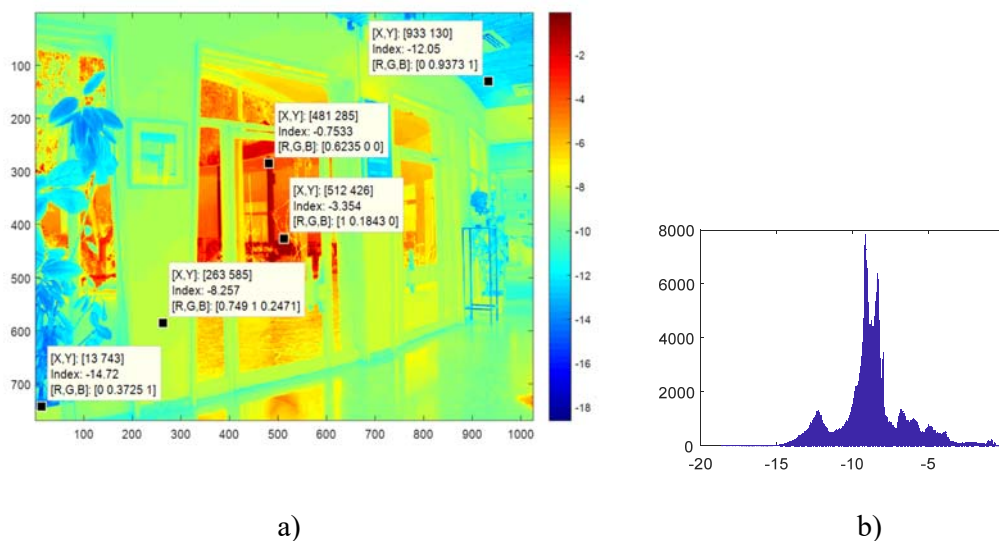
Korak dekompozicije kod ELTM-a potiče od ideje koju su predstavili Durand i Dorsey [45]. Bazira se na tome da se ulazna luminansa može, u logaritamskom domenu,

razdvojiti na niskofrekventnu i visokofrekventnu komponentu. Pri tom, niskofrekventna komponenta odgovara iluminansi scene, dok visokofrekventna komponenta odgovara reflektansi i nosi informaciju o detaljima na sceni. Dakle, prvi korak ELTM algoritma, koji prethodi dekompoziciji, predstavlja prelazak u logaritamski domen:

$$Y_{\log} = \log_2(Y_w + eps) \quad (3.1.2)$$

gde $Y_{\log}$ predstavlja vrednost luminanse u logaritamskom domenu, a eps predstavlja malu konstantu, koja treba da spreči divergiranje logaritma za vrednosti osvetljaja bliske nuli. U ELTM-u je usvojeno da eps ima vrednost 10^{-6} . Ukoliko se na ulazu očekuju HDR slike, čiji je opseg veći od 10^6 , potrebno je smanjiti vrednost ove konstante.

Na slici Slika 3.2 je prikazan osvetljaj scene u logaritamskom domenu. Iz histograma, koji je prikazan na slici Slika 3.2 b), može se primetiti da je dinamički opseg scene oko 2^{15} . Prostorni raspored vrednosti osvetljaja je prikazan na slici Slika 3.2 a).



Slika 3.2 Vrednosti osvetljaja scene u logaritamskom domenu.

Postupak dekompozicije se obavlja korišćenjem nekog od filtera osetljivog na ivice. Analizom dostupnih rešenja, koja su predstavljena u odeljku 2.2.1.1, zaključeno je da vođeni filter predstavlja najbolji kompromis između kompleksnosti i kvaliteta. Pogodniji je za ekstrakciju detalja u procesu redukcije dinamičkog opsega u poređenju s bilateralnim filtrom, zbog svoje otpornosti na probleme inverzije gradijenta. Što se tiče kompleksnosti, vođeni filter se bazira na izračunavanju rezultata 4 boks filtra, čime je

omogućeno korišćenje efikasnih algoritama filtriranja. Ove je potrebno naglasiti da ELTM algoritam ostaje potpuno isti, iako se umesto vođenog filtra, u postupku dekompozicije, primeni neki drugi filter osetljiv na ivice.

Operatori za reprodukciju HDR slika, koji se zasnivaju na dekompoziciji obično koriste jedan od dva pristupa:

- 1) Dekompoziciju slike ne jedan bazni i jedan sloj detalja, pri čemu se dinamički opseg redukuje kompresijom baznog sloja.
- 2) Dekompoziciju slike na veći broj slojeva detalja, pri čemu se redukcija dinamičkog opsega postiže skaliranjem svakog od sloja detalja različitim faktorom.

ELTM se bazira na pristupu iz prve grupe, s tim što umesto jednog koristi dva sloja detalja. Naime, lokalni kontrast i oštrina (mikro kontrast) su dve različite karakteristike slike i potrebno ih je odvojeno tretirati. Oštrina ili mikro kontrast se odnosi na intenzitet detalja najviših učestanosti, kao što su texture. S druge strane, lokalni kontrast predstavlja kontrast između regiona različitih osvetljenosti. Detalji koji su odgovorni za lokalni kontrast, imaju značajno niže učestanosti od detalja koji su zaslužni za osećaj oštine u slici. Zbog toga se, prilikom dekompozicije, koriste dva filtra različitih veličina. Ovakva dekompozicija omogućava nezavisnu kontrolu nad lokalnim kontrastom i oštrinom, pa je tako moguće na primer pojačati lokalni kontrast, a u isto vreme ograničiti pojačanje mikro kontrasta, koje bi u suprotnom dovelo do preteranog izoštravanja slike i neprirodnog izgleda.

Prilikom dekompozicije se može desiti da u sloju detalja završe neke komponente koje ne odgovaraju pravim detaljima na sceni. One su uglavnom posledica nedovoljne selektivnosti filtra osetljivog na ivice, ali mogu biti i posledica šuma ili odsjaja. Ovakve komponente obično karakterišu amplitude, koje su značajno veće od amplituda ostalih detalja u sceni. Kako bi se zaštitili od ovih grešaka u koraku dekompozicije je uvedeno limitiranje maksimalne amplitude detalja u svakom od slojeva. Međutim, prosto limitiranje amplitude detalja, dovodi do izobličenja jakih ivica. Naime, nakon ograničenja amplitude detalja, zbir baznog i sloja detalja više nije jednak polaznoj slici. Iz tog razloga je neophodno, nakon ograničenja amplitude detalja, preračunati vrednost baznog sloja, tako da ne dođe do izobličenja. Navedeni postupak se može posmatrati

kao migracija jakih detalja u slojeve koji predstavljaju niže učestanosti. Proces dekompozicije je definisan sledećim koracima:

$$\begin{aligned}
 DP_{F\log} &= \text{clip}\left(Y_{\log} - \text{EAF}\left(Y_{\log}, r_S, \varepsilon_S\right), \lambda_F\right) \\
 BP_{F\log} &= Y_{\log} - DP_{F\log} \\
 DP_{C\log} &= \text{clip}\left(BP_{F\log} - \text{EAF}\left(BP_{F\log}, r_L, \varepsilon_L\right), \lambda_C\right) \\
 BP_{\log} &= BP_{F\log} - DP_{C\log}
 \end{aligned} \tag{3.1.3}$$

gde su r_S , ε_S i r_L , ε_L radijus i regularizacioni parametri malog i velikog filtra osetljivog na ivice EAF . U realizaciji ELTM-a korišćen je vođeni filter [40]. $BP_{F\log}$ predstavlja bazni sloj nakon prvog stepena dekompozicije. Maksimalne amplitude sitnih i krupnih detalja su određene sa λ_F i λ_C . Funkcija clip ima sledeći oblik:

$$\text{clip}(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda & , x \geq \lambda \\ -\lambda & , x \leq -\lambda \\ x & , -\lambda < x < \lambda \end{cases} \tag{3.1.4}$$

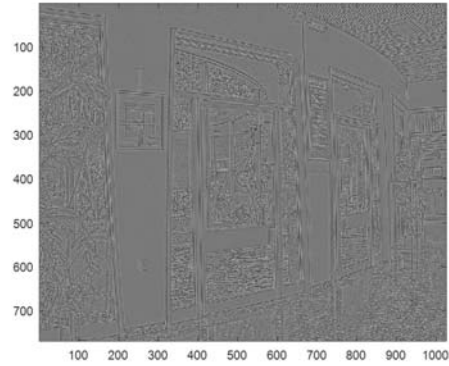
Lokalnost ELTM-a se ogleda upravo u koraku dekompozicije, koji ima za cilj da sačuva informacije lokalnom kontrastu i detaljima. Bilo koji od filtera u procesu dekompozicije, se može zaobići postavljanjem njegovog limita na vrednost 0. Ukoliko su oba limita jednaka nuli, odnosno ukoliko važi $\lambda_F = \lambda_C = 0$, ELTM se svodi na globalni operator.

Kako mikro kontrast zapravo čine detalji najviših učestanosti, radijus malog filtra r_S je podešen na vrednost 3 i ne zavisi od rezolucije slike. S druge strane, veličina lokalnih regiona predstavlja karakteristiku scene i zbog toga se radijus velikog filtra r_L određuje kao 10% manje dimenzije slike. Regularizacioni parametri vođenih filtera ε_S i ε_L su podešeni na vrednost 0.1. Smisleni opseg vrednosti ovih parametara za proces ekstrakcije detalja je između 0.01 i 0.5. Značajno manje vrednosti previše povećavaju selektivnost vođenog filtra, što dovodi do toga da većina detalja ostane u baznom sloju, čime se smanjuje efekat lokalnog mapiranja i očuvanja detalja. Previše velike vrednosti svode vođeni filter na Gausovo usrednjavanje, što dovodi do pojave halo artefakata. Što se ograničenja amplitude detalja tiče, dobri rezultati su dobijeni za $\lambda_F = 0.02$ i $\lambda_C = 1$. Na ovaj način su ograničeni sitni detalji, koji potiču od impulsnog šuma ili odsjaja, dok

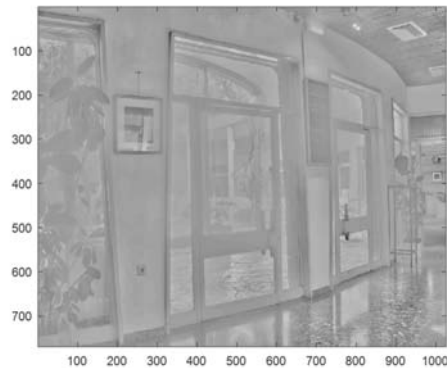
se krupni detalji odsecaju samo ekstremne vrednosti, koje su posledica nesavršenosti filtra.



a)



b)



c)



d)

Slika 3.3 Rezultat dekompozicije logaritamskog osvetljaja scene korišćenjem vodenog filtra.

Na slici Slika 3.3 je prikazan proces dekompozicije osvetljaja slike u logaritamskom domenu. Ulazna komponenta osvetljaja u logaritamskom domenu $Y_{\log}$ je prikazana na slici Slika 3.3 a). Sloj sitnih detalja $DP_{F\log}$ je prikazan na slici Slika 3.3 b). Može se uočiti da ovaj sloj zaista sadrži najviše učestanosti, koje zapravo predstavljaju konture objekata i teksture. Zbog ovog frekvencijskog sadržaja je i problematično prikazati ovaj sloj u radu, jer usled decimacije dolazi do značajnog alijasinga (preklapanja u spektru), što se uočava na slici Slika 3.3 b). Sloj krupnih detalja $DP_{C\log}$ je prikazan na slici Slika 3.3 c) i može se videti da on sadrži značajno krupnije strukture, koje zapravo nose

informaciju o lokalnom kontrastu. Na slici Slika 3.3 d) prikazan je bazni sloj $BP_{\log}$ koji aproksimira lokalni nivo osvetljaja u sceni.

3.1.2 Adaptacija dinamičkog opsega u logaritamskom domenu

Najčešći pristup redukciji dinamičkog opsega kod operatora koji se baziraju na dekompoziciji slike na bazni sloj i sloj detalja, je jednostavno skaliranje baznog sloja u logaritamskom domenu. Tumblin i Turk [29] su prvi predložili ovakav pristup, pri čemu su koristili konstantan skala faktor. Skaliranje konstantnim skala faktorom u logaritamskom domenu zapravo predstavlja stepenu funkciju u linearnom domenu. Durand i Dorsey [45] su takođe redukciju dinamičkog opsega realizovali skaliranjem baznog sloja u logaritamskom domenu ali su faktor skaliranja prilagođavali svakoj slici, tako da nakon skaliranja opseg vrednosti baznog sloja zauzima predefinisani opseg vrednosti. U njihovom slučaju taj opseg je iznosio $5 \log_{10}$ jedinica.

Redukcija dinamičkog opsega isključivo skaliranjem baznog sloja u logaritamskom domenu, otežava kontrolu nad finalnim izgledom slike. Naime, agresivno skaliranje u logaritamskom domenu, značajno smanjuje globalni kontrast i dovodi do „ravnog“ izgleda slike. Ovo je posledica velike strmine stepene funkcije u tamnim delovima slike, a samim tim i izražena kompresija svetlih i srednjih osvetljaja. S druge strane, manje agresivna kompresija nije dovoljna da izvuče detalje iz senke, kod slika izrazito velikog dinamičkog opsega.

Reinhard [25] koristi nešto drugačiji pristup. On kao prvi korak u redukciji dinamičkog opsega, predlaže linearno skaliranje vrednosti osvetljaja scene, tako da se srednji nivo osvetljaja postavi na 0.18 na skali od 0 do 1. Ovaj postupak potiče iz fotografske prakse, odnosno iz zonskog sistema koji je uveo Ansel Adams 80-tih godina, a povezan je sa nelinearnim odzivom ljudskog vizuelnog sistema. Srednji nivo osvetljaja, predstavlja zapravo preceptualnu srednju vrednost, koja se određuje u perceptualno uniformnom domenu poput logaritamskog. Nakon skaliranja, Reinhard primenjuje sigmoidnu funkciju da kompresuje dinamički opseg. Prvi korak skaliranja je neophodan, pošto on zapravo dovodi interesantne delove scene, koji se nalaze oko srednjeg nivoa osvetljaja, na deo sigmoidne funkcije koji ima najveće pojačanje. Na taj način, delovi scene koji se nalaze oko srednjeg nivoa osvetljaja, dobijaju najveći značaj u izlaznoj slici. Ovim

pristupom se ostvaruje dosta dobar globalni kontrast, uz isticanje najbitnijih delova scene, što je pored jednostavnosti jedan od najbitnijih razloga velike popularnosti ovog operatora. Međutim dobra reprodukcija globalnog kontrasta dolazi po cenu detalja i to obično u svetlim regionima.

Kako bi postigao što bolji globalni kontrast, uz očuvanje detalja u svetlim regionima scene, ELTM koristi kombinaciju dva gore navedena pristupa. Redukcija dinamičkog opsega se obavlja delom u logaritamskom domenu i delom u linearnom domenu. Svrha adaptacije dinamičkog opsega u logaritamskom domenu je da se omogući konzistentna kontrola nad finalnim izgledom izlazne slike. Naime, različite HDR slike mogu imati velike varijacije vrednosti. Adaptacijom dinamičkog opsega u logaritamskom domenu, ove vrednosti se dovode u predefinisani opseg, čime se olakšava kontrola narednih koraka algoritma. Popravka kontrasta u linearnom domenu zapravo definiše finalni izgled slike, kompresijom svetlih i isticanjem tamnih delova scene.

Adaptacija dinamičkog opsega baznog sloja u okviru ELTM algoritma je definisana sa:

$$BP'_{\log} = \alpha \cdot (BP_{\log} + \beta) \quad (3.1.5)$$

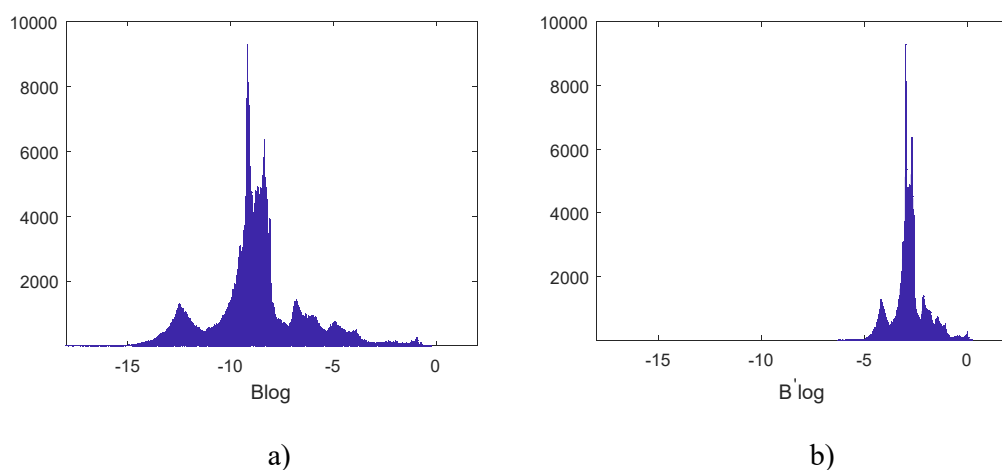
gde $BP'_{\log}$ predstavlja bazni sloj u logaritamskom domenu nakon adaptacije, α predstavlja faktor skaliranja koji ima za cilj dovođenje vrednosti baznog sloja u predefinisani opseg i β predstavlja ofset baznog sloja u odnosu na nivo belog u slici. Parametri α i β su definisani kao:

$$\alpha = \frac{\tau_R}{\max(BP_{\log}) - \min(BP_{\log})} \quad (3.1.6)$$

$$\beta = -\max(BP_{\log}) \quad (3.1.7)$$

gde je τ_R vrednost ciljnog opsega vrednosti baznog sloja. Za određivanje vrednosti ovog parametra polazi se od Reinhard-ovog predloga, da se srednji nivo osvetljaja mapira na vrednost 0.18 u linearnom domenu. Kako se dekompozicija u ELTM-u obavlja u $\log_2$ domenu, vrednost na koju se mapira 0.18 iz linearnog domena je $\log_2(0.18) = -2.47$. Međutim, umesto da se srednja vrednost logaritamskog osvetljaja mapira u ovu tačku, u okviru ELTM-a je upotrebljen nešto drugačiji pristup. Naime,

ideja je da se celokupan opseg vrednosti osvetljaja mapira u opseg $[-5, 0]$. Na taj način se u slučaju uniformnog ili simetričnog histograma, srednja vrednost osvetljaja nalazi na sredini opsega i mapira se u vrednost -2.5. U slučaju nesimetričnih histograma, koji imaju nagomilavanja u tamnim ili svetlim delovima scene, srednja vrednost osvetljaja će biti mapirana na vrednost manju ili veću od -2.5 respektivno. Na taj način se sprečava odsecanje svetlih regiona kod pretežno tamnih scena (i obrnuto), u postupku kompresije. I Reinhard [25] je primetio da u slučaju pretežno tamnih ili svetlih slika, odnosno slika sa nesimetričnim histogramima, srednja vrednost osvetljaja treba da bude postavljena na manju odnosno veću vrednost od 0.18. Ovaj postupak se kontroliše parametra a u izrazu (2.4.8).



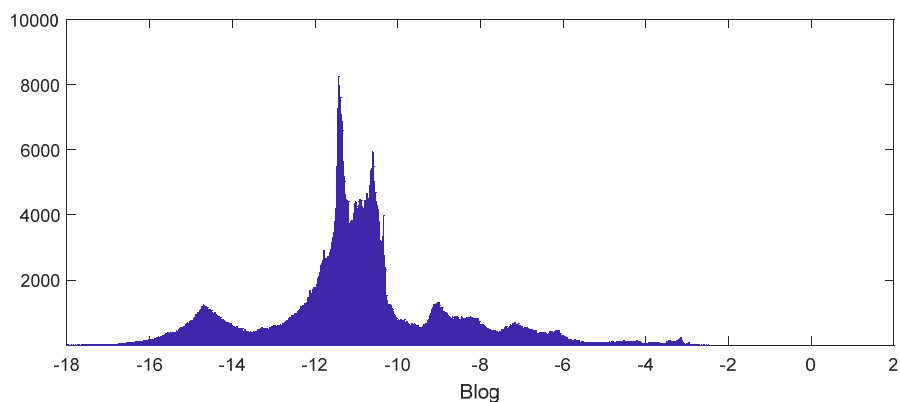
Slika 3.4 Histogrami logaritamske vrednosti baznog sloja pre a) i posle b) postupka adaptacije dinamičkog opsega.

Kao što je na početku opisa algoritma naglašeno, ELTM na ulazu očekuje normalizovane vrednosti osvetljaja koje se nalaze u opsegu od 0 do 1. Na taj način se obezbeđuje da se prilikom adaptacije dinamičkog opsega baznog sloja sve vrednosti nađu u opsegu $[-\tau_R, 0]$. Ukoliko ovo nije ispunjeno, odnosno ukoliko je maksimalna vrednost osvetljaja značajno veća ili manja od 1 (odnosno 0 u logaritamskom domenu), onda skalirane vrednosti baznog sloja mogu ispasti iz gore definisanog opsega. Kako se normalizacija ulaznih komponenti osvetljaja obično obavlja izvan ELTM algoritma, može se desiti da, usled grešaka prilikom normalizacije, maksimalna vrednost ulaznog osvetljaja bude značajno različita od 1 (odnosno 0 u logaritamskom domenu). Do grešaka u normalizaciji može doći iz više razloga od kojih su neki na primer, pogrešno

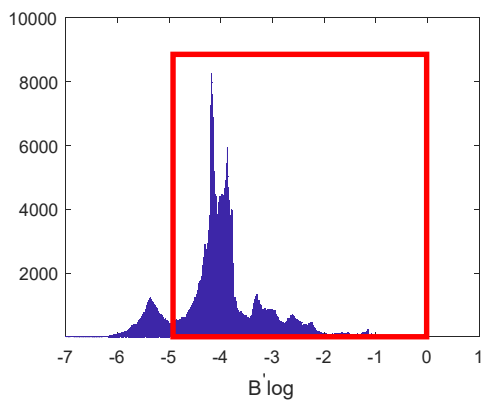
određeni parametri ekspozicije, koji direktno utiču na skaliranje vrednosti prilikom rekonstrukcije HDR slike, ili ekstremne vrednosti piksela, koje su posledica impulsnog šuma. Skaliranje će ograničiti dinamički opseg vrednosti baznog sloja ali ne garantuje da će se te vrednosti nalaziti na pravom mestu u histogramu. U svrhu demonstracije navedenih problema, razmotrimo dva slučaja pogrešne normalizacije:

- 1) Tip A: Maksimalna vrednost ulaznog osvetljaja je značajno manja od 1. U primeru sa slike Slika 3.5 maksimalna vrednost osvetljaja pogrešno normalizovane slike ide do 0.5.
- 2) Tip B: Maksimalna vrednost ulaznog osvetljaja je značajno veća od 1. U primeru sa slike Slika 3.6 odabrali smo da maksimalna vrednost osvetljaja pogrešno normalizovane slike ide do 10.

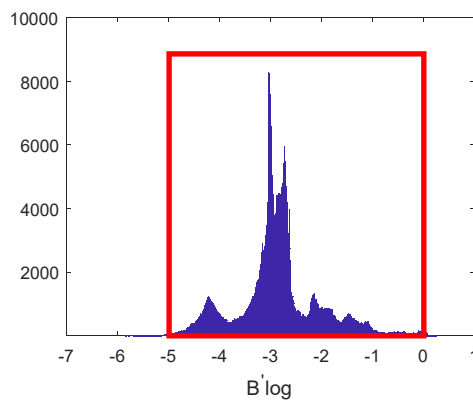
Na slici Slika 3.5 je prikazana adaptacija dinamičkog opsega baznog sloja za slučaj pogrešne normalizacije tip A, gde maksimalna vrednost osvetljaja koji se nalazi na ulazu ELTM algoritma ne prelazi 0.5. Sa slike Slika 3.5 a) može se uočiti da je, usled ove greške u normalizaciji, ceo histogram vrednosti pomeren u levo. Adaptacija dinamičkog opsega baznog sloja bez kompenzacije ofseta, dovodi do rezultata prikazanog na slici Slika 3.5 b). Ovde se vidi da je interval u kojem se nalaze vrednosti logaritamskog osvetljaja baznog sloja, nakon adaptacije, zaista širine τ_R . Međutim, kako je ceo histogram pomeren u levo, ovaj pomeraj ostaje i nakon skaliranja tako da vrednosti adaptiranog baznog sloja izlaze van opsega $[-\tau_R, 0]$.



a)



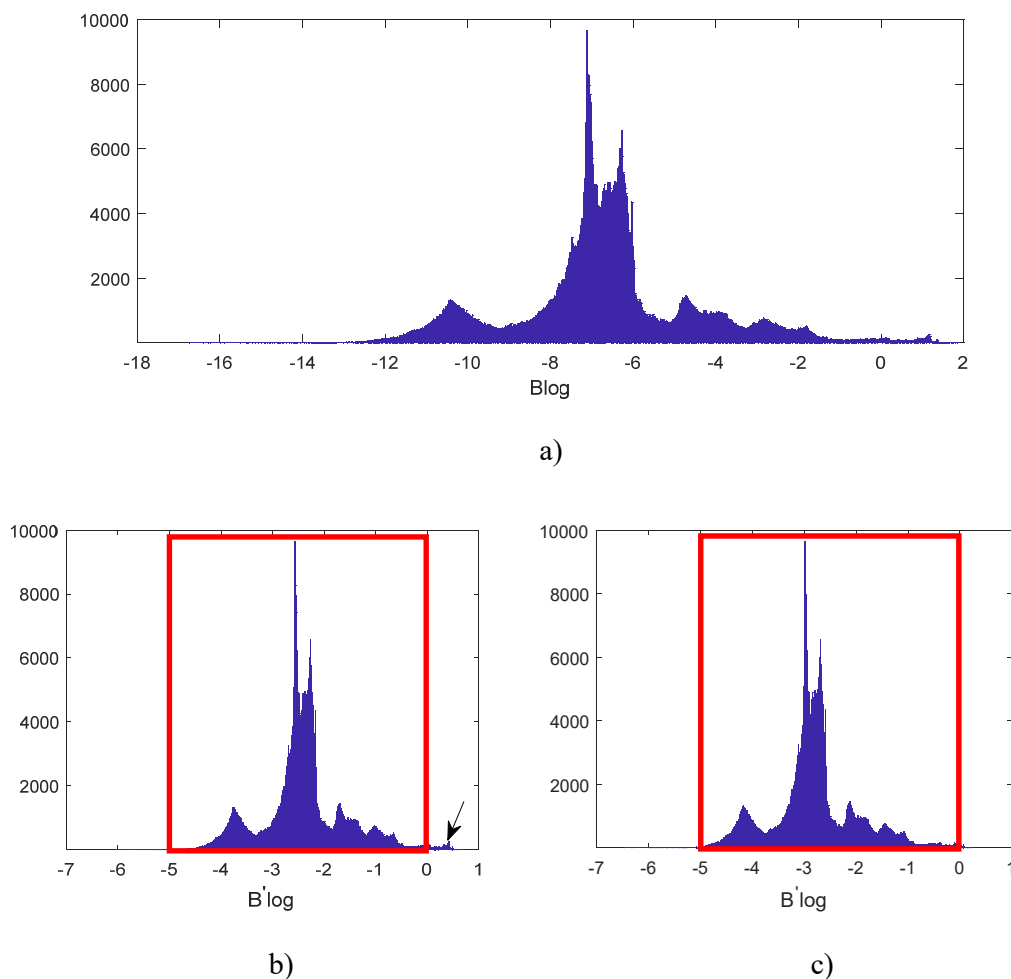
b)



c)

Slika 3.5 Histogrami logaritamske vrednosti baznog sloja u uslovima pogrešne normalizacije tipa A pre adaptacije dinamičkog opsega a) i nakon adaptacije za slučajeve bez kompenzacije ofseta b) i sa kompenzacijom ofseta c).

U slučaju pogrešne normalizacije tipa B, kod koje maksimalna vrednost na ulazu značajno prelazi 1, histogram baznog sloja logaritamskih osvetljaja je pomeren u desno, što je prikazano na slici Slika 3.6 a). Adaptacija dinamičkog opsega baznog sloja bez kompenzacije ofseta proizvodi rezultat na slici Slika 3.6 b). Ovde se može primetiti da opet postoje vrednosti koje ispadaju iz definisanog opsega $[-\tau_R, 0]$. U slučaju grešaka normalizacije tipa B, te vrednosti pripadaju svetlim regionima scene i označene su strelicom na slici Slika 3.6.



Slika 3.6 Histogrami logaritamske vrednosti baznog sloja u uslovima pogrešne normalizacije tipa B pre adaptacije dinamičkog opsega a) i nakon adaptacije za slučajeve bez kompenzacije ofseta b) i sa kompenzacijom ofseta b).

Kompenzacija ofseta ima uporište i u funkcionisanju ljudskog vizuelnog sistema. Naime, uobičajeno je da se prilikom posmatranja scene odziv vizuelnog sistema adaptira, tako da se maksimalni odziv, koji se percipira kao bela boja, podešava u odnosu na najsvetliji objekat na sceni (*anchoring*).

Kako bi se obezbedila robusnost postupka adaptacije u prisustvu impulsnog šuma, minimalna i maksimalna vrednost baznog sloja $BP_{\log}$, koje se koriste za određivanje parametara adaptacije, se računaju kao 0.01 i 99.9 percentil vrednosti baznog sloja.

3.1.3 Procesiranje detalja

Postoje različiti pristupi procesiranju detalja kod operatora koji se zasnivaju na

dekompoziciji. Durand i Dorsey [45] predlažu vraćanje neizmenjenog sloja detalja, čime se čuvaju informacije o lokalnom kontrastu. Tumblin i Turk [29] skaliraju slojeve detalja u logaritamskom domenu, linearnim faktorima manjim od 1. Pri tom, za detalje na manjim skalama koriste veće skale faktore, odnosno manje stepene kompresije. U okviru iCAM06 algoritma [58] detalji se procesiraju stepenom funkcijom, čiji stepen zavisi od nivoa lokalnog osvetljaja. Pri tome se detalji koji pripadaju svetlijim regionima, kompresuju manje od detalja u tamnijim regionima, što modeluje Stevens-ov efekat osetljivosti na kontrast u zavisnosti od lokalnog nivoa adaptacije. Bennett i McMillan [46] takođe koriste prostorno varijabilno procesiranje detalja, pri čemu manje težine daju onim detaljima koji odgovaraju tamnim regionima scene. Njihov argument za ovakvo procesiranje je manja pouzdanost detalja i veća osetljivost na šum u tamnim regionima scene. S druge strane, Mantiuk [27] navodi da displeji imaju najveći problem reprodukcije detalja u tamnim delovima scene, zbog ambijentalnog svetla, nivoa „crnog“ i sl. Zbog toga je potrebno, u cilju postizanja što boljeg subjektivnog utiska tokom reprodukcije, dodatno povećati kontrast u tamnim regionima scene.

Iako ELTM u svojoj podrazumevanoj konfiguraciji koristi prostorno uniformno skaliranje detalja, uočeno je da se, zahvaljujući dobro kontrolisanom opsegu baznog sloja nakon adaptacije, veoma jednostavno može realizovati prostorno varijabilno procesiranje scene. Ovakvo procesiranje detalja može značajno poboljšati kvalitet izlazne slike u situacijama gde se bitan deo scene nalazi ili u svetlom ili u tamnom regionu. Primer ovog slučaja je prikazan na slici Slika 3.8, koja predstavlja jedan frejm video konferencije, pri čemu se izvor dnevnog svetla nalazi iza leđa govornika. Ovo je tipičan primer scene širokog dinamičkog opsega, što se i primećuje na slici Slika 3.7 a) po nemogućnosti ispravne reprodukcije svih detalja scene korišćenjem linearnog skaliranja. Reprodukcijska ista scene, korišćenjem ELTM-a sa podrazumevanim parametrima, je prikazana na slici Slika 3.7 b).



Slika 3.7 Reprodukcija HDR scene korišćenjem linearnog skaliranja i gama korekcije a) i ELTM algoritma b).

U ovakvim scenama, detalji od interesa se nalaze upravo na licu govornika i osnovni cilj reprodukcije je da se oni što bolje istaknu. Detalji na izlaznoj slici se mogu istaći korišćenjem uniformnog pojačanja, čiji je rezultat prikazan na slici Slika 3.8 d). Ova slika je dobijena primenom dvostruko većih parametara pojačanja detalja η_C i η_F , u odnosu na podrazumevanu konfiguraciju ELTM-a. Iako su detalji na licu govornika istaknuti, takođe su istaknuti i detalji na nebu i prostoru iza govornika, što u ovom slučaju dovodi do toga da cela scena izgleda neprirodno. Dakle, cilj je da se na neki način istaknu detalji na govorniku, bez uticaja na ostali deo scene. S obzirom na to da se sve vrednosti iz baznog sloja, nakon adaptacije, nalaze u opsegu $[-\tau_R, 0]$, moguće je kreirati prostorno varijabilnu korekciju pojačanja SG , tako da se pojačanje tamnih delova scene promeni najviše $SG_{\max}$ puta u odnosu na podrazumevanu prostorno uniformnu vrednost. Izraz za prostorno varijabilnu korekciju pojačanja se definiše kao:

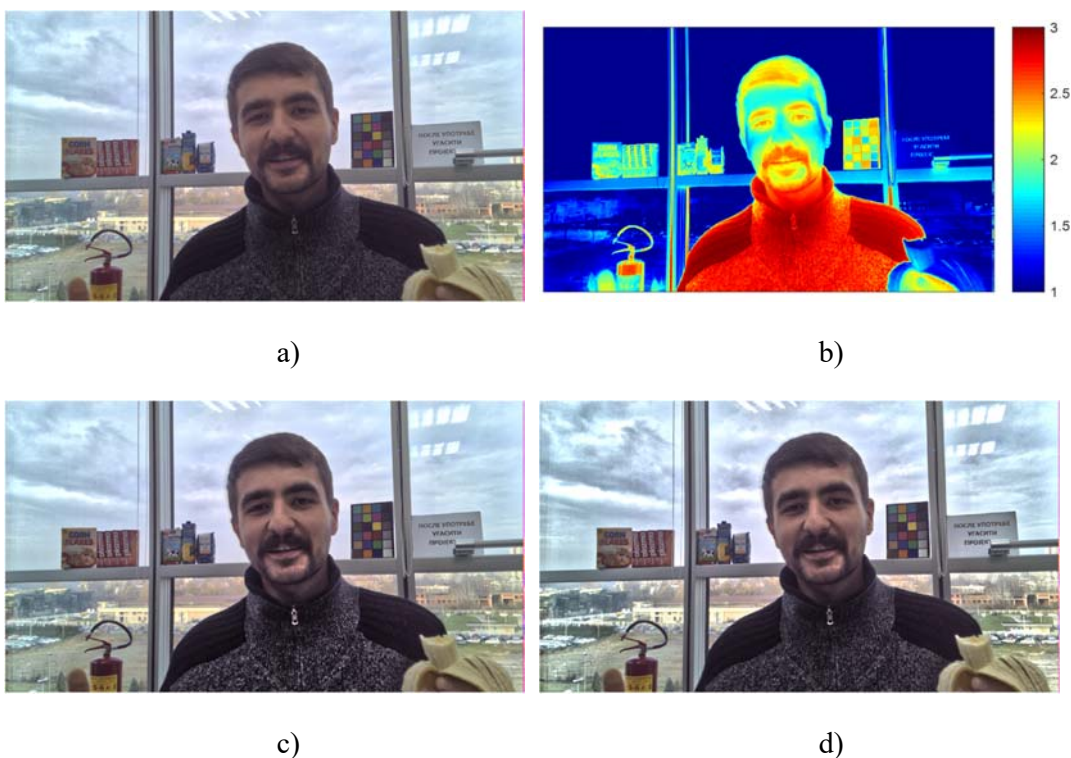
$$SG = \max\left(-SG_{\max} \frac{B'_{\log}}{\tau_R}, 1\right) \quad (3.1.8)$$

Dakle, prostorno varijabilna korekcija pojačanja uzima vrednosti iz opsega $[1, SG_{\max}]$. Ograničavanjem korekcije pojačanja na vrednosti veće od 1, sprečava se potiskivanje detalja u svetlim delovima scene. Ovako jednostavno kreiranje prostorne korekcije pojačanja, koja se kreće u jasno definisanom opsegu vrednosti, omogućeno je upravo korakom adaptacije dinamičkog opsega baznog sloja. Procesiranje detalja se sastoji u množenju slojeva detalja odgovarajućim faktorima pojačanja i opciono prostorno varijabilnom korekcijom pojačanja:

$$\begin{aligned} DP'_{F\log} &= \eta_F \cdot SG \cdot DP_{F\log} \\ DP'_{C\log} &= \eta_C \cdot SG \cdot DP_{C\log} \end{aligned} \quad (3.1.9)$$

pri čemu $DP'_{F\log}$ i $DP'_{C\log}$ predstavljaju izlazne slojeve sitnih i krupnih detalja nakon procesiranja, η_F i η_C vrednosti prostorno uniformnih faktora pojačanja sitnih i krupnih detalja, dok je SG prostorno varijabilna korekcija pojačanja.

Izgled prostorno varijabilne korekcije pojačanja za parametar $SG_{\max} = 3$ je prikazan na slici Slika 3.8 b). Ovde se vidi da je kontura govornika jasno izdvojena i da se na nju primenjuju veće vrednosti pojačanja detalja. S druge strane, svetli delovi scene ostaju nepromenjeni, pošto je u tim delovima vrednost korekcije jednaka 1.



Slika 3.8 Rezultati prostorno uniformnog c) i prostorno varijabilnog d) pojačanja detalja korišćenjem prostorno varijabilne korekcije pojačanja b). Rezultat procesiranja podrazumevanim parametrima algoritma a).

Rezultat ELTM-a, nakon primene prostorno varijabilne korekcije pojačanja, je prikazan na slici Slika 3.8 c). Svi ostali parametri su postavljeni na podrazumevane vrednosti. Može se uočiti da je lice govornika istaknuto, kao u slučaju kada su parametri uniformnog pojačanja bili duplirani (slika Slika 3.8 d)). U isto vreme, svetli regioni su

zadržali isti intenzitet, kao u izlaznoj slici Slika 3.8 a) koja je dobijena korišćenjem podrazumevanih parametara.

Iako može dati dosta dobre rezultate, cilj varijabilnog procesiranja može značajno varirati u zavisnosti od tipa scene i primene operatora. Ove varijacije idu od potiskivanja detalja u tamnim regionima i isticanja u svetlim, koje su predložili mnogi autori, do isticanja detalja u tamnim i očuvanja u svetlim, koje je potrebno u nekim specifičnim situacijama, kao što je navedeni primer video konferencije. Pošto je ELTM projektovan tako da, u podrazumevanoj konfiguraciji, radi robusno sa scenama najrazličitijih sadržaja i izvora, prostorno varijabilno procesiranje nije uključeno u podrazumevanu konfiguraciju.

Podrazumevane vrednosti prostorno uniformnih pojačanja η_F i η_C su 1 i 1.5 redom, čime se ističe lokalni kontrast bez preteranog izoštravanja scene i pojačanja šuma.

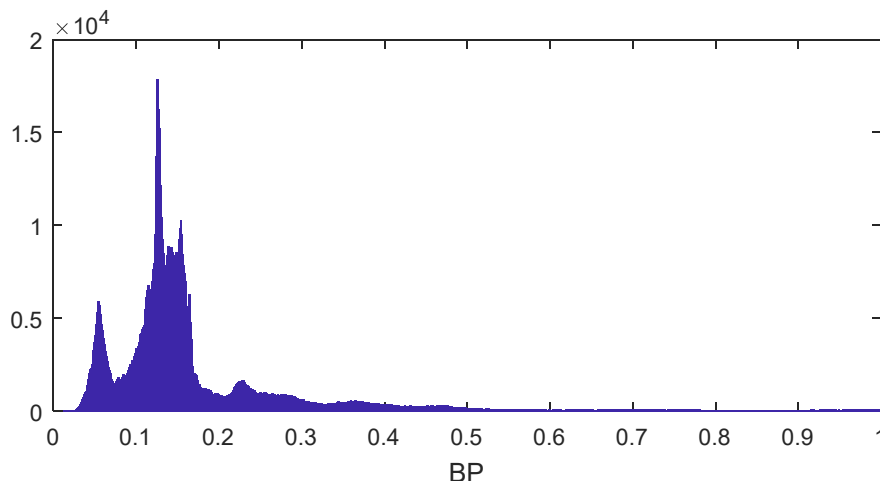
Nakon procesiranja u logaritamskom domenu, dva sloja detalja se sabiraju u jedan sloj detalja i vraćaju u linearni domen. Bazni sloj se nakon adaptacije dinamičkog opsega takođe vraća u linearni domen. Ovaj postupak je definisan sledećim izrazima:

$$\begin{aligned} BP &= 2^{BP'_{\log}} \\ DP &= 2^{(DP'_F \log + DP'_C \log)} \end{aligned} \quad (3.1.10)$$

gde BP i DP predstavljaju bazni sloj i sloj detalja u linearnom domenu, nakon procesiranja u logaritamskom domenu.

3.1.4 Popravka kontrasta u linearnom domenu

Procesiranje u logaritamskom domenu je postavilo logaritamske vrednosti baznog sloja u dobro definisani opseg, što znatno olakšava projektovanje i kontrolu narednih koraka algoritma. Izgled histograma baznog sloja u linearnom domenu, za sliku *belgium*, nakon adaptacije dinamičkog opsega u logaritamskom domenu je prikazan na slici Slika 3.9.



Slika 3.9 Histogram baznog sloja u linearnom domenu nakon adaptacije dinamičkog opsega u logaritamskom domenu.

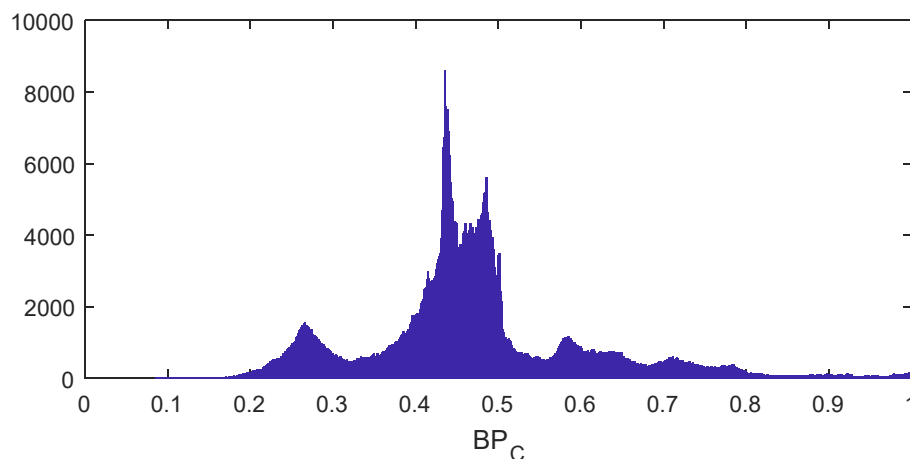
Sa slike Slika 3.9 se uočava da su vrednosti piksela i dalje grupisane u opsegu manjih vrednosti, što predstavlja tamnu sliku niskog kontrasta. Kako bi se istakli ovi delovi scene i iskoristio pun opseg izlaznih vrednosti, potrebno je primeniti neku od tehnika za poboljšanje kontrasta. Ovo se može postići korišćenjem neke od tehnika za globalnu redukciju dinamičkog opsega, kao što su stepena funkcija, logaritamska funkcija ili sigmoida koje su opisane u odeljku 2.1. Stepena funkcija se često izbegava zbog previše strmog početnog nagiba, što dovodi do prenaglašavanja komponenti koje imaju jako male vrednosti. S druge strane, sigmoida ima previše spor nagib, pošto pored kompresije svetlih, kompresuje i tamne delove scene. Zbog toga je za popravku kontrasta u ELTM algoritmu odabrana logaritamska funkcija oblika:

$$BP_C = \frac{\log(BP + p) - \log(p)}{\log(1 + p) - \log(p)} \quad (3.1.11)$$

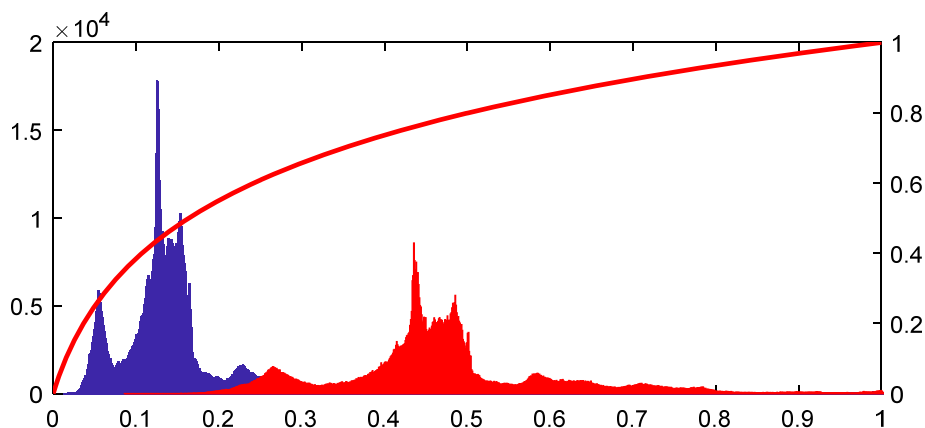
gde BP_C predstavlja vrednost baznog sloja u linearnom domenu nakon popravke kontrasta, a p parametar kojim se kontroliše nagib logaritamske krive. Ova kriva zapravo predstavlja istu logaritamsku krivu koju je pomenuo Schlick [23], samo što je vrednost p invertovana u odnosu na Schlick-ovu definiciju, kako bi uzimala vrednosti iz opsega $[0,1]$. Takođe, oblik funkcije je identičan funkciji koju su koristili Bennett i McMillan [46], što se može videti ako se u izrazu (2.5.22) postavi $x_{\max} = 1$ i $\psi = p \cdot x_{\max} + 1$. Funkcija (3.1.11) ima dobro definisan opseg izlaznih vrednosti, koje se

nalaze u intervalu $[0,1]$ za ulazne vrednosti iz istog opsega. Takođe može se primetiti da ova funkcija zapravo predstavlja logaritamsku funkciju čija se osnova može kontrolisati promenom parametra p . Drago [24] je iskoristio funkciju sličnog oblika, pri čemu je osnovu logaritma kontrolisao trenutnom vrednošću piksela.

Direktna primena logaritamske funkcije na bazni sloj u linearnom domenu dovodi do značajne redukcije globalnog kontrasta. Izlazni histogram, nakon primene logaritamske funkcije, prikazan je na slici Slika 3.10, gde se može uočiti značajno povećanje minimalne vrednosti piksela. Ovo je posledica toga što su zbog ograničenja opsega u logaritamskom domenu, sve vrednosti u linearnom domenu svakako veće od 0. To se može primetiti i na histogramu baznog sloja na slici Slika 3.9. U procesu popravke kontrasta, te nenulte vrednosti bivaju dosta pojačane logaritamskom funkcijom, koja ima strm nagib za male ulazne vrednosti. Proces mapiranja je detaljnije prikazan na slici Slika 3.11. Ovaj efekat se može ublažiti, ali nikako skroz izbeći, povećanjem opsega τ_R na koji se ograničavaju vrednosti baznog sloju, tokom procesa adaptacije u logaritamskom domenu.



Slika 3.10 Histogram baznog sloja nakon popravka kontrasta logaritamskom funkcijom.



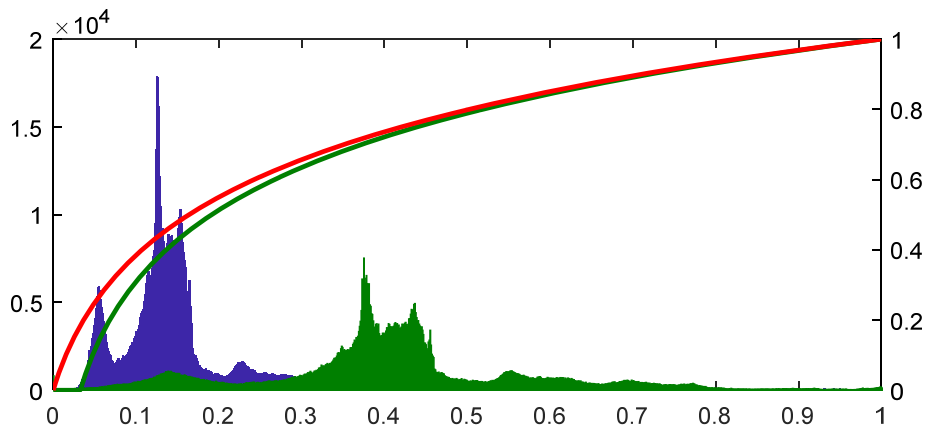
Slika 3.11 Proces popravke kontrasta baznog sloja logaritamskom funkcijom u linearnom domenu. Plavom bojom je prikazan ulazni histogram, dok su crvenom bojom prikazani korišćena logaritamska funkcija i izlazni histogram.

Mnogi autori su uočili ovaj problem smanjenja globalnog kontrasta nakon operacija redukcije dinamičkog opsega. Kao rešenje su predložili da se na kraju procesiranja obavi razvlačenje histograma izlaznog osvetljaja, kako bi se iskoristio celokupan opseg izlaznih vrednosti [37], [54], [56]. Međutim, primena operacije razvlačenja histograma, iako restaurira globalni kontrast, značajno utiče na finalni izgled slike, koji bi trebalo da se podešava promenom parametra p . Naime, sa korakom razvlačenja histograma na kraju procesiranja, teško je proizvesti konzistentan izgled izlazne slike za fiksiranu vrednost parametra p . Zbog toga se, prilikom projektovanja ELTM-a, težilo restauraciji globalnog kontrasta, bez primene operacije razvlačenja histograma na kraju procesiranja. Kako je osnovni izvor problema taj što je minimalna vrednost baznog sloja veća od nule nakon procesiranja u logaritamskom domenu, funkcija (3.1.11) je modifikovana tako da se minimalna vrednost iz baznog sloja $BP_{\min}$ mapira u 0 a maksimalna vrednost baznog sloja $BP_{\max}$ mapira u 1. Logaritamska funkcija koja ispunjava ove uslove definisana je sa:

$$BP_C = \frac{\log\left(\frac{BP - BP_{\min}}{BP_{\max} - BP_{\min}} + p\right) - \log(p)}{\log(1 + p) - \log(p)} \quad (3.1.12)$$

Navedena funkcija zapravo predstavlja primenu operacije razvlačenja histograma baznog sloja pre primene logaritamske funkcije. Popravku kontrasta baznog sloja, korišćenjem ovako modifikovane funkcije, dovodi do izlaznog histograma koji

popunjava celokupan opseg izlaznih vrednosti, što se može primetiti na slici Slika 3.12, gde su modifikovana funkcija i izlazni histogram prikazani zelenom bojom. Ovde se takođe može uočiti da se za razvlačenje kontrasta u tamnim delovima scene uvek koristi početni deo logaritamske funkcije, za razliku od slučaja kada se ova funkcija primenjuje na originalni histogram. Ovaj postupak obezbeđuje konzistentnu kontrolu nad finalnim izgledom slike, modifikacijom parametra kompresije p .



Slika 3.12 Proces popravke kontrasta baznog sloja modifikovanom logaritamskom funkcijom u linearnom domenu. Plavom bojom je prikazan ulazni histogram, dok su zelenom bojom prikazani korišćena logaritamska funkcija i izlazni histogram. Inicijalna logaritamska funkcija je prikazana crvenom bojom.

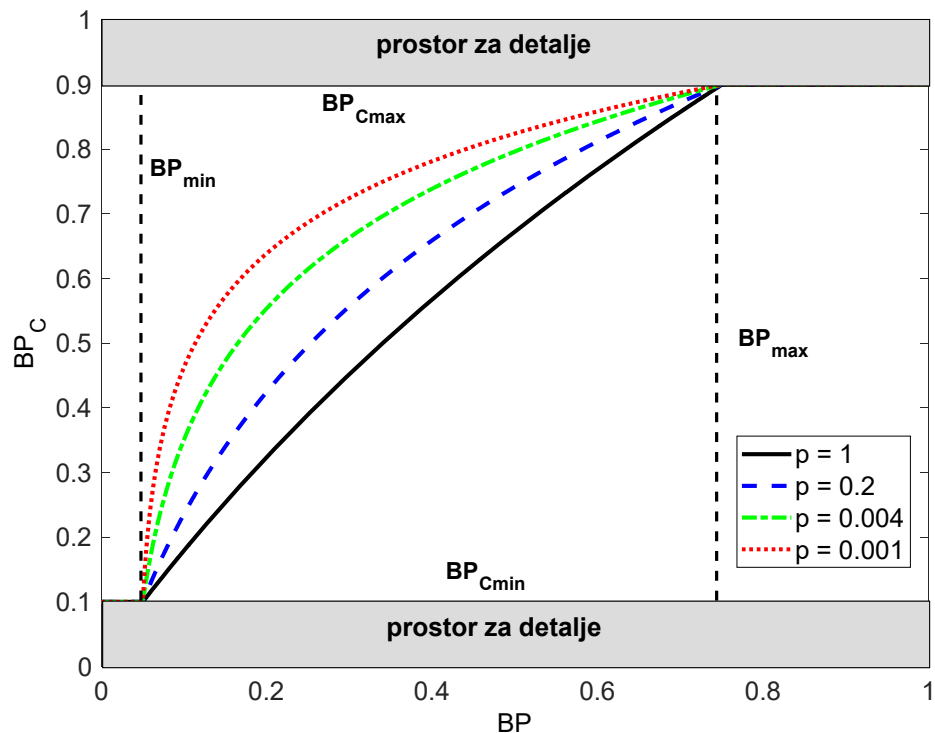
Iako je za globalni kontrast dobro da izlazni histogram popunjava celokupni opseg izlaznih vrednosti, problem nastaje prilikom vraćanja detalja. Pošto se celokupno procesiranje obavlja nad baznim slojem, koji predstavlja srednji nivo osvetljenja u određenom regionu slike, prilikom vraćanja detalja dolazi do odsecanja u najsvetlijim i najtamnijim delovima scene. Kod slika širokog dinamičkog opsega, ovi delovi scene su obično dosta važni, pa je potrebno obratiti dodatnu pažnju, kako bi se ovo odsecanje izbeglo ili ublažilo. Odsecanje detalja se izbegava, ako su minimalna i maksimalna vrednost baznog sloja, nakon popravke kontrasta, dovoljno veće od 0, odnosno manje od 1, tako da prilikom vraćanja detalja ne dolazi do probijanja ovog opsega. Odnosno, potrebno je obezbediti dovoljno prostora za detalje, na krajevima opsega, ograničavanjem izlaznih vrednosti baznog sloja. Finalni oblik logaritamske funkcije za popravku kontrasta koji uzima u obzir i proces rekonstrukcije detalja dat je sa:

$$BP_C = (BP_{C_{\max}} - BP_{C_{\min}}) \frac{\log\left(\frac{BP - BP_{\min}}{BP_{\max} - BP_{\min}} + p\right) - \log(p)}{\log(1+p) - \log(p)} + BP_{C_{\min}} \quad (3.1.13)$$

gde $BP_{C_{\min}}$ i $BP_{C_{\max}}$ predstavljaju minimalnu i maksimalnu vrednost baznog sloja nakon popravka kontrasta. Pri tom su opsezi izlaznih vrednosti $[0, BP_{C_{\min}}]$ i $[BP_{C_{\max}}, 1]$ rezervisani za proces restauracije detalja.

Familija krivih modifikovane logaritamske funkcije za različite vrednosti parametra p data je na slici Slika 3.13. Kako bi se obezbedila što bolja robusnost i otpornost na piksele čije vrednosti značajno odstupaju od ostatka scene, poput impulsnog šuma, maksimalna i minimalna vrednost baznog sloja $BP_{\min}$ i $BP_{\max}$ iz izraza (3.1.13) se određuju kao 0.1 i 99.9 percentil vrednosti baznog sloja BP . Vrednosti baznog sloja koje su izvan ovog opsega se postavljaju na $BP_{\min}$ odnosno $BP_{\max}$.

Granice izlaznog opsega $BP_{C_{\min}}$ i $BP_{C_{\max}}$ su konstante i u podrazumevanoj konfiguraciji algoritma su postavljeni na vrednosti 0.1 i 0.9. Na taj način se ostavlja po 10% opsega na krajevima za detalje u regionima ekstremne osvetljenosti. Promenom njihovih vrednosti može se menjati odnos prioriteta između lokalnog i globalnog kontrasta. Moguća je i automatska kontrola ovih parametara na osnovu maksimalne amplitude ili varijanse detalja u regionima ekstremne osvetljenosti. Međutim u ELTM algoritmu je ovo automatsko podešavanje izbegnuto iz dva razloga. Prvi razlog predstavlja dodatno procesiranje koje bi povećalo kompleksnost algoritma a drugi se odnosi na pitanje kontrole finalnog izgleda izlazne slike. Naime, automatsko podešavanje odnosa između lokalnog i globalnog kontrasta bi značilo da finalni izgled slike ne može dovoljno robusno da se kontroliše parametrom logaritamske funkcije p , već da zavisi i od nivoa detalja u sceni.



Slika 3.13 Finalni izgled modifikovane logaritamske funkcije za popravku kontrasta koja se prilagođava opsegu vrednosti ulaza. Izlazni opseg funkcije je ograničen čime se ostavlja dovoljno prostora za restauraciju detalja.

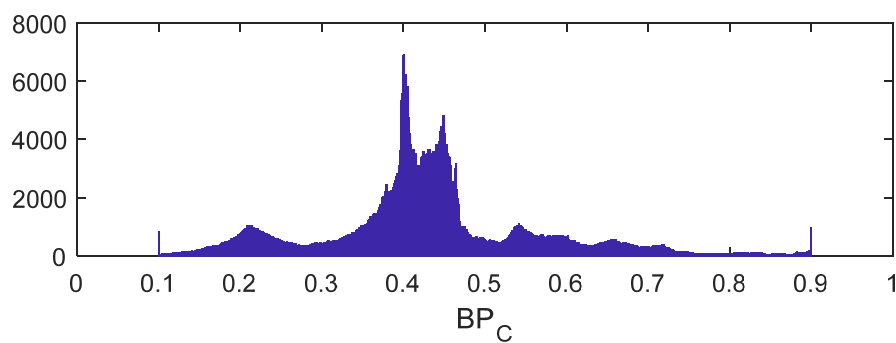
Ovde je potrebno naglasiti da opisani postupak prilagođavanja kompresione funkcije ulaznoj slici i ostavljanje prostora za detalje nije ograničen na korišćenu logaritamsku funkciju i može se primeniti u kombinaciji sa drugim funkcijama za popravku kontrasta. Takođe je potrebno naglasiti, da iako se finalni izgled izlazne slike kontroliše promenom parametra p logaritamske funkcije u linearnom domenu, ovakva konzistentna kontrola ne bi bila moguća bez prethodne adaptacije dinamičkog opsega baznog sloja u logaritamskom domenu. Operatori za reprodukciju HDR slika koji su predstavljeni u glavi 2, procesiranje obavljaju obično ili direktno u linearnom ili u logaritamskom domenu. Međutim, postoje operatori, poput [25], koji deo procesiranja obavljaju u logaritamskom domenu pripremajući sliku za finalno mapiranje u linearnom domenu. Ovakvi operatori su pokazali dosta dobre karakteristike po pitanju konzistentnosti kvaliteta izlaznog rezultata za najrazličitije tipova scena. Ovo navodi na zaključak da je pristup adaptacije u logaritamskom domenu i finalno mapiranje u linearnom domenu zapravo put ka kreiranju robusnog operatora za reprodukciju HDR

slika.

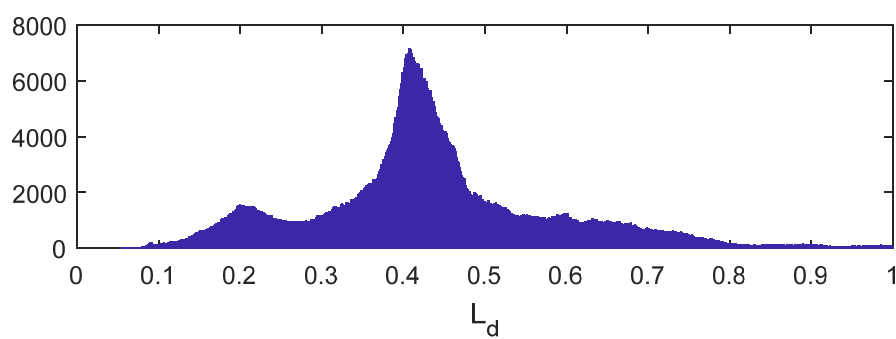
Nakon popravke kontrasta baznog sloja, izlazna luminansa Y_d se određuje jednostavnim množenjem modifikovanog baznog sloja BP_C sa slojem detalja DP :

$$Y_d = BP_C \cdot DP \quad (3.1.14)$$

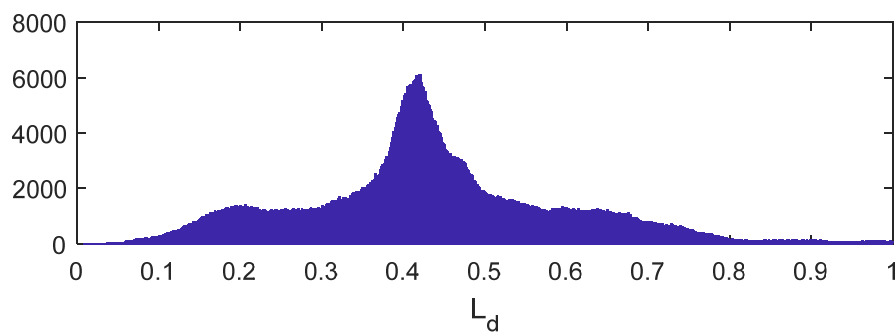
Na slici Slika 3.14 a) prikazan je histogram baznog sloja nakon popravke kontrasta, logaritamskom funkcijom, u linearnom domenu. Može se primetiti da su opsezi vrednosti $[0,0.1]$ i $[0.9,1]$ neiskorišćeni, pošto su rezervisani za detalje. Pikovi koji se javljaju na krajevima opsega su posledica toga, što su za $BP_{\min}$ i $BP_{\max}$ korišćeni percentili umesto pravih minimalnih i maksimalnih vrednosti, što dovodi do zasićenja određenog broja piksela baznog sloja na ove granične vrednosti. Nakon vraćanja detalja u bazni sloj, korišćenjem izraza (3.1.14), dobija se izlazna luminansa čiji je histogram prikazan na slici Slika 3.14 b). Ovde se primećuje da su sada opsezi vrednosti koji su bili rezervisani za detalje popunjeni, i da su granični pikovi na histogramu nestali. Da nije bilo ograničenja opsega izlaznih vrednosti baznog sloja, ovi detalji bi bili odsečeni. Takođe, može se primetiti da je opseg $[0.9,1]$ prilično ravnomerno popunjen detaljima, dok je opseg $[0,0.1]$ u određenoj meri ostao neiskorišćen. Ovo je posledica male vrednosti baznog sloja, pa samim tim i male amplitude detalja. Smanjivanjem minimalne vrednosti baznog sloja, amplituda detalja se dodatno smanjuje. Međutim, ukoliko se zadrži minimalna vrednost baznog sloja na 0.1, a pojača intenzitet detalja koji odgovaraju tamnim regionima, korišćenjem prostorno varijabilne korekcije pojačanja SG definisane izrazom (3.1.8), dobija se histogram izlazne luminanse koji je prikazan na slici Slika 3.14 c). Sada se može videti da je donji opseg detalja $[0,0.1]$ dobro iskorišćen. Izlazna slika je takva da zauzima ceo opseg izlaznih vrednosti, bez odsecanja detalja na krajevima opsega.



a)



b)



c)

Slika 3.14 Histogram baznog sloja nakon popravke kontrasta a), kao i histogrami izlazne luminanse nakon redukcije dinamičkog opsega b) i c). U primeru c) je na detalje primenjena prostorno varijabilna korekcija pojačanja.

3.1.5 Kreiranje izlazne slike u boji

Komponente izlazne slike se određuju korišćenjem izraza (2.4.26) za rekonstrukciju boja, koji su predložili Tumblin i Turk [29] i koji je ovde ponovljen radi kompletnosti opisa ELTM algoritma:

$$\begin{aligned}
 R_d &= Y_d \left(\frac{R_w}{Y_w} \right)^{\frac{s}{\gamma}} \\
 G_d &= Y_d \left(\frac{G_w}{Y_w} \right)^{\frac{s}{\gamma}} \\
 B_d &= Y_d \left(\frac{B_w}{Y_w} \right)^{\frac{s}{\gamma}}
 \end{aligned} \tag{3.1.15}$$

gde R_w, G_w, B_w i R_d, G_d, B_d predstavljaju izlazne vrednosti osvetljaja za sve tri komponente boje, Y_w i Y_d su ulazna i izlazna luminansa slike, γ predstavlja gama korekciju koja se primenjuje na sve linearne komponente slike pre prikaza a s je parametar zasićenosti boja, kojim se kontroliše intenzitet boje u izlaznoj slici. Parametar gama korekcije može biti različit kod različitih uređaja. U odsustvu preciznijih informacija, najbolje je podesiti $\gamma = 2.2$, što predstavlja vrednost definisanu sRGB standardom. Podrazumevana vrednost parametra s je podešena na 1, čime se po Schlick-u [23] čuva nijansa i zasićenost boja iz ulazne HDR slike. Slika 3.15 prikazuje finalni izgled LDR slike dobijen ELTM algoritmom u poređenju sa slikom koja je dobijena bez upotrebe operatora za redukciju dinamičkog opsega, odnosno korišćenjem običnog linearnog skaliranja i gama korekcije.



a)

b)

Slika 3.15 Izgled LDR slike nakon redukcije dinamičkog opsega pomoću linearnog skaliranja i gama korekcije a) i korišćenjem ELTM operatora b).

3.2 Podešavanje izgleda izlazne slike

Prilikom projektovanja ELTM algoritma posebna pažnja je posvećena mogućnosti podešavanja finalnog izgleda izlazne slike, tako da se postigne što bolji subjektivni utisak. U okviru ELTM algoritma postoji nekoliko parametara, kojima se nezavisno mogu kontrolisati različita svojstva izlazne slike, što je i naznačeno u tabeli Tabela 3.1. Odavde se može zaključiti da je, promenom vrednosti parametara ELTM-a, moguće nezavisno uticati na kontrolu osvetljaja izlazne slike, zasićenost boje, lokalni kontrast i oštrinu, kao i na prioritet između lokalnog i globalnog kontrasta. U tabeli su takođe navedeni preporučeni opsezi promene vrednosti parametara, kao i podrazumevane vrednosti koje su korišćene prilikom testiranja ELTM algoritma. Podrazumevane vrednosti parametara su određene tako da algoritam konzistentno proizvodi dobre rezultate za što je moguće širi opseg HDR slika. Za određivanje podrazumevanih parametara korišćen je skup od 15 slika različitog sadržaja i dinamičkog opsega i parametri su podešavani tako da se postigne što bolji subjektivni utisak.

Tabela 3.1 Uticaj parametara ELTM algoritma na svojstva izlazne slike

Svojstvo slike koji se kontroliše	Parametar algoritma [opseg vrednosti] (podrazumevana vrednost)
Osvetljaj	$p[0.00001,1](0.04)$
Odnos globalnog i lokalnog kontrasta	$BP_{C_{\min}}[0-0.4](0.1), BP_{C_{\max}}[0.6-1](0.9)$
Lokalni kontrast	$\lambda_C[0-1](1), \eta_C[0-3](1.5)$
Mikro kontrast (oštrina)	$\lambda_F[0-1](0.02), \eta_F[0-3](1)$
Zasićenost boja	$s[0-2](1)$

Mogućnost uticaja na različita svojstva izlazne slike je demonstrirana na slici Slika 3.16. Pri generisanju svih slika su korišćene podrazumevane vrednosti za sve parametre osim za onaj čija je vrednost eksplicitno naznačena ispod slike. Jedino odstupanje od ovog pravila, za potrebe prezentacije, predstavljaju parametri ograničenja i pojačanja detalja koji su bili postavljeni na vrednost 1 ($\lambda_C = \lambda_F = \eta_C = \eta_F = 1$).



Slika 3.16 Promena svojstva izlazne slike promenom odgovarajućih parametara algoritma. Prvi red predstavlja promenu osvetljaja koja se postiže promenom parametra p . Drugi i treći red demonstriraju kontrolu nad lokalnim kontrastom i oštrinom slike promenom odgovarajućih parametara pojačanja. Poslednji red demonstrira promenu prioriteta između lokalnog i globalnog kontrasta.

Iako mnogi operatori za reprodukciju HDR slika nude neki stepen kontrole nad svojstvima izlazne slike, nijedan od njih ne nudi mogućnost ovakve nezavisne kontrole nad svim najbitnijim aspektima izlazne slike. Naime, parametri u postojećim operatorima obično utiču na više svojstava scene istovremeno, čime se proces podešavanja finalnog izgleda znatno otežava. Durand i Dorsey [45], na primer, omogućavaju kontrolu nad detaljima, ali je teško podesiti željeni osvetljaj izlazne slike bez uticaja na lokalni kontrast. Gradijentni operatori [55], [56] postižu redukciju dinamičkog opsega ograničavanjem amplitude gradijenata, čime se istovremeno utiče i na finalni osvetljaj izlazne slike i na nivo detalja u njoj. Globalni operatori poput [24], [25], [27] omogućavaju dosta dobru kontrolu nad osvetljajem izlazne slike ali po cenu degradacije lokalnog kontrasta u svetlim i tamnim regionima scene.

Dva aspekta operatora za reprodukciju HDR slika su veoma bitna ako se razmatra njegova upotreba u komercijalnim proizvodima poput mobilnih telefona, kod kojih hardverske karakteristike, a samim tim i karakteristike ulaznih slika, mogu značajno varirati. Prvi je robusnost, odnosno od operatora se očekuje da za fiksirane vrednosti parametara konzistentno proizvodi dobre rezultate za najrazličitije tipove ulaznih slika. Drugi aspekt je fleksibilnost, odnosno mogućnost podešavanja ovih fiksnih parametara tako da se proizvede odgovarajući subjektivni utisak. Pri kreiranju ELTM algoritma u obzir su uzeta oba ova aspekta. Fleksibilnost podešavanja izgleda izlazne slike je demonstrirana u ovom odeljku, dok će pitanje robusnosti biti analizirano u narednim odeljcima.

3.3 Korekcija osvetljaja za ekstremne scene

Iako ELTM algoritam uglavnom proizvodi dobre izlazne slike korišćenjem podrazumevanih vrednosti parametara, koje su navedene u tabeli Tabela 3.1, primećeno je da u nekim situacijama, proizvodi nešto tamnije ili svetlije izlazne slike. Ovo se obično dešava u situacijama kada ulazne scene imaju izrazito nesimetričan histogram, odnosno dominantno su tamne ili svetle. Kako je u podrazumevanom podešavanju, parametar p konstantan za sve tipove scena, logaritamska kriva koja se koristi za popravku kontrasta ne može da se prilagodi ovim ekstremima. U cilju postizanja dodatne robusnosti, predložena je automatska kontrola parametra p , koji direktno utiče na finalni osvetljaj izlazne slike. Kao što je primetio još Reinhard [25], srednja vrednost

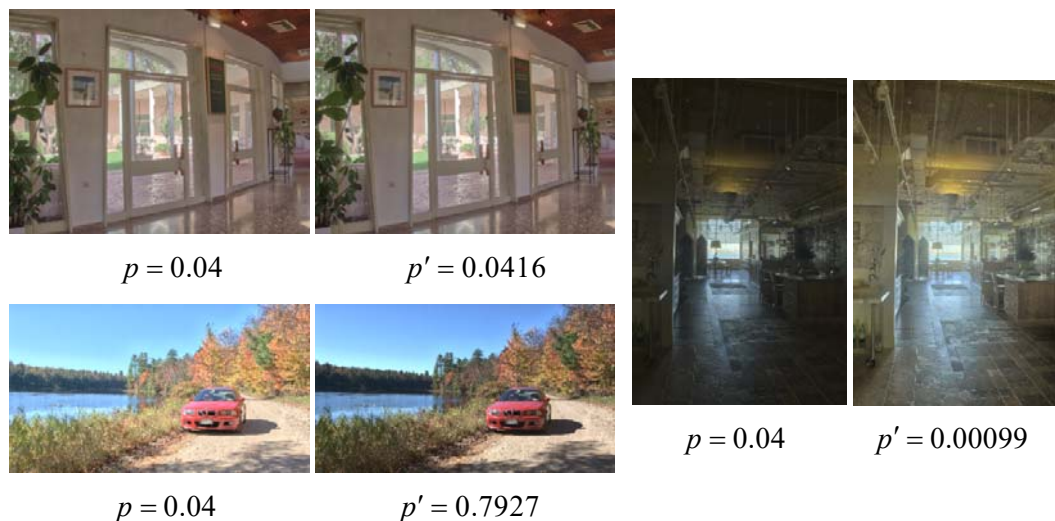
osvetljaja u logaritamskom domenu predstavlja dobru procenu dominantnog osvetljaja scene. Zbog toga je odlučeno da se za kontrolu vrednosti parametra p , koristi srednja vrednost baznog sloja u logaritamskom domenu, nakon adaptacije dinamičkog opsega $\overline{BP'_{\log}}$. Kako se nakon adaptacije dinamičkog opsega, sve vrednosti baznog sloja nalaze u jasno definisanom opsegu, srednja vrednost daje jasnu indicaciju na koju stranu je histogram polarisan. Naime, vrednosti $\overline{BP'_{\log}}$ manje od $-\tau_R / 2$ označavaju pretežno tamne scene. U suprotnom, kada je srednja vrednost veća od polovine opsega, ulazna scena je pretežno svetla. Za oblik korekcionne funkcije, empirijski je odabrana eksponencijalna funkcija sa osnovom 10, iz razloga što je prilikom podešavanja uočen ovaj tip zavisnosti između vrednosti parametra p i subjektivnog osećaja osvetljaja. Stoga je oblik za korigovanu vrednost parametra p definisan izrazom:

$$p' = p \cdot 10^{k(\overline{BP'_{\log}} - m)} \quad (3.1.16)$$

gde p' predstavlja vrednost parametra p nakon korekcije, $\overline{BP'_{\log}}$ je srednja vrednost logaritamskog osvetljaja baznog sloja nakon adaptacije dinamičkog opsega, dok su m i k parametri korekcionog algoritma. Parametar m predstavlja optimalnu vrednost srednjeg logaritamskog osvetljaja baznog sloja nakon adaptacije, za koju nije potrebno raditi nikakvu korekciju. Za vrednosti $\overline{BP'_{\log}} < m$ stepen u izrazu (3.1.16) postaje negativan, čime se smanjuje početna vrednost parametra p . Manje vrednosti parametra p dovode do veće strmine u početnom delu krive, što dovodi do agresivnijeg razvlačenja tamnih delova scene. Suprotno, u slučaju svetlijih scena gde je $\overline{BP'_{\log}} > m$ parametar p postaje veći od nominalne vrednosti, što smanjuje osvetljenost izlazne slike. Parametar k određuje jačinu korekcije parametra p .

Analiziranjem ponašanja ELTM-a na velikoj bazi slika [70] zaključeno je da vrednosti $k=1$ i $m=-2.7$ daju najbolje rezultate za različite HDR scene. Ovde je potrebno naglasiti da je bez obzira na uvođenje automatske kontrole zadržana fleksibilnost ELTM-a. Naime, osvetljenost izlaznih slika se može kontrolisati promenom nominalne vrednosti parametra p koji ulazi u algoritam korekcije. Odnosno, ako se nominalna vrednost parametra p smanji ili poveća, sve izlazne slike će postati svetlije, odnosno

tamnije. Efekat predložene korekcije je prikazan na slici Slika 3.17.



Slika 3.17 Efekat korekcije osvetljaja za različite tipove slika.

3.4 Rezultati

ELTM je razvijan sa ciljem da omogući reprodukciju HDR slika na najrazličitijim komercijalnim uređajima, poput tableta i mobilnih telefona. Kako bi se što bolje ispitala robusnost algoritma, ELTM je testiran korišćenjem slika različitog tipa iz više javno dostupnih baza HDR slika [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78]. Predstavljeni su rezultati za skup od 50 scena, različite osvetljenosti, sadržaja, rezolucije i porekla. Celokupan skup slika dat je u prilogu 1. Za generisanje rezultata postojećih rešenja, u svrhu poređenja, korišćen je javno dostupan softverski paket *LuminanceHDR* [79], koji implementira veliki broj najpoznatijih operatora za reprodukciju HDR slika. Za generisanje rezultata iCAM06 [58] algoritma korišćena je javno dostupna Matlab realizacija sa sajta autora [80].

3.4.1 Evaluacija kvaliteta operatora za reprodukciju HDR slika

Sa pojavom velikog broja operatora za reprodukciju HDR slika, pojavila se potreba za sistematičnom evaluacijom njihovog kvaliteta. Kako je cilj procesa redukcije dinamičkog opsega, reprodukcija HDR slike ljudskom posmatraču, za ocenu kvaliteta ovih operatora se često koriste subjektivne metode. Iako najrelevantnije, ukoliko su sprovedene ispravno, subjektivne metode ocene kvaliteta prate brojni problemi. Najpre, bitno je da grupa ispitanika bude dovoljno reprezentativna i dovoljno velika kako bi se

dobili statistički relevantni rezultati. Ovde nastaje prvi problem subjektivnih metoda, pošto je generalno veoma teško, skupo i vremenski zahtevno organizovati veću grupu ispitanika. Zbog toga se rezultati subjektivnih testiranja često daju za manju, nereprezentativnu grupu (obično studenata), što dovodi u pitanje njihovu relevantnost. Dalje subjektivne metode veoma zavise od postavke eksperimenta, uslova pod kojima je izveden, opreme koja je korišćena i sl. Zbog toga je ponovljivost rezultata subjektivnih testiranja veoma ograničena. I treći problem je nemogućnost automatizacije ocene kvaliteta u cilju automatskog testiranja, podešavanja parametara algoritama i sl.

Objektivne metode, s druge strane, ne pate od ovih problema. One se mogu lako iskoristiti u procesima automatskog testiranja, nisu vremenski zahtevne i imaju potpunu ponovljivost. Problem nastaje u tome, što je jako teško napraviti objektivnu metriku kvaliteta, koja dobro predviđa subjektivni utisak, koji će određeni rezultat proizvesti kod posmatrača. Problem objektivne ocene kvaliteta operatora za reprodukciju HDR scena je posebno težak. Naime, metrike koje se inače koriste za ocenu kvaliteta algoritama za obradu slike, poput PSNR-a, SSIM-a i ostalih, a koje porede izlaznu sliku sa referencom, su neupotrebljive u ovom slučaju. Problem je u tome što se referentna HDR slika i izlazna LDR slika razlikuju veoma mnogo po vrednostima, iako utisak koji proizvode kod posmatrača treba da bude sličan. Zbog toga je fokus istraživača, u prvo vreme, bio upravo na kreiranju metrika koje će omogućiti merenje perceptualne razlike između ulazne HDR i izlazne LDR slike. Proces razvijanja ovih metrika se svodi na modelovanje ljudskog vizuelnog sistema i dosta liči na razvoj operatora zasnovanih na modelima percepcije boja. Ideja je da se korišćenjem ovih modela ulazna i izlazna slika transformišu u perceptualno uniformni domen, u kojem se mogu meriti perceptualne razlike između njih. Tako su nastale metrike DRIM (*Dynamic Range Independent Metric*) [81] i HDR-VDP-2 (*High Dynamic Range Visual Difference Predictor*) [82]. Iako omogućavaju procenu distorzija nastalih u procesu redukcije dinamičkog opsega, navedene metrike se bave isključivo strukturalnim promenama. Jedan od čestih problema, koji se javlja u procesu redukcije dinamičkog opsega, je neprirodan izgled izlaznih slika, što značajno utiče na negativan subjektivni utisak posmatrača. Zbog toga je važno, pored strukturalne sličnosti između HDR i LDR slike, u proces evaluacije kvaliteta operatora, uključiti i parametar koji ocenjuje prirodnost izlazne LDR slike.

TMQI (*Tone Mapping Quality Index*) [83] predstavlja metriku za ocenu kvaliteta koja

uključuje oba ova faktora. Za ocenu strukturalne sličnosti koristi se multirezolucijska verzija adaptiranog indeksa strukturalne sličnosti SSIM, koji je prilagođen za poređenje HDR i LDR slika. Za ocenu prirodnosti posmatra se oblik histograma izlazne slike i određuje njegova sličnost sa histogramima prirodnih slika. TMQI metrika na osnovu ova dva parametra generiše jedinstvenu ocenu kvaliteta. Tokom vremena su se pojavile mnoge nadogradnje TMQI metrike. Na primer, STMQI (*Saliency TMQI*) [84] i TMQI-NSS- σ [85], uzimaju u obzir istaknutost određenih regiona scene, i na osnovu toga više penalizuje artefakte u njima. Zatim TMQI-II [86], gde je zadržana osnovna ideja TMQI metrike ali je promenjen način računanja strukturalne sličnosti i prirodnosti slika.

FSITM (*Feature Similarity Index for Tone Mapped Images*) [87] posmatra razlike u fazama različitih komponenti boje originalne HDR i rezultujuće LDR slike, kako bi okarakterisao nivo strukturalnih promena u procesu mapiranja. Autori FSITM-a su pokazali, da ovaj indeks najbolje rezultate daje u kombinaciji sa TMQI metrikom. Zbog toga su kombinovani indeks, koji predstavlja srednju vrednost rezultata pojedinačnih metrika, nazvali FSITM_TMQI.

Pored opisanih objektivnih metrika kvaliteta, koje zahtevaju referentnu HDR sliku za ocenu strukturalne sličnosti, za ocenu kvaliteta izlazne LDR slike može se koristiti bilo koja dostupna metrika, koja procenjuje kvalitet slike bez prisustva reference. Naime, kod metrika za ocenu kvaliteta slike, bez prisustva reference, nije važno na koji način je slika nastala, već samo finalni kvalitet slike. Ovde je međutim potrebno biti oprezan, pošto se ove metrike obično kreiraju tako da detektuju samo određeni tip distorzija, poput šuma, smanjenja oštine i sl. Zbog toga ove metrike često nisu pogodne za ocenu opšteg kvaliteta slike. Jedan od osnovnih ciljeva operatora za reprodukciju HDR slika je generisanje rezultata prirodnog izgleda. Zbog toga je, pri evaluaciji operatora, zgodno koristiti neku objektivnu metriku koja meri, koliko se određena LDR slika poklapa sa modelom prirodnih slika. Ovaj model se obično generiše treniranjem na velikoj bazi prirodnih slika dobrog kvaliteta. Ukoliko su dostupni rezultati subjektivnih testiranja, za slike iz baze, oni se mogu iskoristiti prilikom treniranja modela. Na taj način se metrika zapravo trenira da daje slične rezultate kao ljudski posmatrači.

Skorašnje istraživanje [88], koje je za cilj imalo ispitivanje performansi trenutno dostupnih objektivnih metrika u odnosu na rezultate subjektivnog testiranja je pokazalo

da najbolje rezultate, na skupu prirodnih slika, daje FSITM^B_TMQI metrika.

3.4.2 Rezultati poređenje ELTM-a sa postojećim metodama

Prilikom poređenja sa postojećim rešenjima, fokus je bio na tome da se pokrije što širi spektar postojećih algoritama i različitih pristupa problemu redukcije dinamičkog opsega HDR slika. Zbog toga je, u procesu poređenja, korišćeno 7 različitih operatora, od čega 3 spadaju u kategoriju globalnih, a 4 u kategoriju lokalnih operatora. U spisku operatora koji sledi, zatamnjenim slovima su naznačena imena koja su kasnije korišćena u tabelama.

Globalni operatori koji su korišćeni u poređenju su:

- 1) **Drago** [24] – globalni operator koji se bazira na logaritamskoj funkciji promenljive osnove.
- 2) **Reinhard** [25] – predstavlja jedan od najviše korišćenih operatora za redukciju dinamičkog opsega HDR slika. Bazira se na sigmoidi, s tim što koristi parcijalnu adaptaciju u logaritamskom domenu.
- 3) **Mantiuk08** [27] – globalni operator razvijen tako da se minimizuje distorzija kontrasta koja nastaje u procesu redukcije dinamičkog opsega.

Lokalni operatori koji su korišćeni u poređenju su:

- 1) **Durand i Dorsey** [45] – predstavnik algoritama koji se zasnivaju na dekompoziciji.
- 2) **Fattal** [55] – predstavnik gradijentnih operatora.
- 3) **Mantiuk06** [56] – kombinacija gradijentnog operatora i minimizacije distorzije kontrasta.
- 4) **iCAM06** [58] – predstavnik algoritama koji se baziraju na modelima percepcije boja.

Parametri svih operatora, koji su korišćeni u evaluaciji, su podešeni po preporukama iz originalnih radova u kojima su predstavljeni. Parametri ELTM-a su postavljeni u skladu sa tabelom Tabela 3.1. Nakon procesiranja *LuminanceHDR*-om, za Drago-ov operator [24] je bilo potrebno primeniti gama korekciju, kako bi slike na izlazu bile spremne za prikaz.

Što se tiče metrika za poređenje, rezultati su dati najpre za FSITM^B_TMQI [87]

metriku, koja je u [88] pokazala najbolje performanse u predviđanju subjektivnih ocena prirodnih scena. Kako bi se demonstrirala robusnost algoritma nezavisno od korišćene metrike, sprovedeno je testiranje korišćenjem 7 različitih mera kvaliteta, koje pripadaju različitim kategorijama:

- 1) **TMQI** [83]
- 2) **FSITM_TMQI** [87] (R, G i B)
- 3) **TMQI-NSS- σ** [85]
- 4) **BRISQUE** [89]
- 5) **BLIINDS-II** [90]
- 6) **IL-NIQE** [91]
- 7) **BTMQI** [92]

Prve tri metrike spadaju u kategoriju metrika sa referencom i kreirane su sa idejom evaluacije kvaliteta operatora za reprodukciju HDR slika. Ostale metrike spadaju u kategoriju metrika koje se koriste za ocenu kvaliteta LDR slika bez prisustva reference. Pri tome BRISQUE [89] i BLIINDS-II [90] uzimaju u obzir subjektivne ocene prilikom treniranja modela prirodnih slika. Za razliku od ostalih metrika za procenu kvaliteta LDR slike bez reference, koje služe za procenu opšteg kvaliteta slike, BTMQI [92] metrika je kreirana sa ciljem da se koristi upravo za evaluaciju LDR slika, koje su nastale procesom redukcije dinamičkog opsega HDR slika, ali bez upotrebe HDR reference.

Tabela 3.2 prikazuje rezultate FSITM^B_TMQI metrike na celokupnoj bazi od 50 slika za svih 8 operatora koji su korišćeni u procesu poređenja. ELTM je u ovom testu korišćen bez korekcije osvetljaja. Kako bi se bolje istakle performanse operatora, tri najbolje rangirana operatora za svaku test sliku su označena bojama. Najbolje rangirani operator je označen zelenom bojom, drugi po rangi je označen plavom dok je trećeplasirani operator označen narandžastom bojom.

Tabela 3.2 Poređenje različitih operatora korišćenjem FSITM^B_TMQI metrike. ELTM je bez korekcije osvetljaja.

Scena	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk 06	Mantiuk 08	iCAM 06	ELTM
AtriumMorning [73]	0.8914	0.9172	0.8650	0.9107	0.8550	0.8869	0.8804	0.9113
Belgium [76]	0.8692	0.8750	0.8504	0.8816	0.8293	0.8596	0.8404	0.8828
Bristolb [78]	0.8061	0.7861	0.8590	0.8255	0.8577	0.8519	0.8661	0.8578
cadik-desk02 [71]	0.8217	0.8257	0.8393	0.8449	0.8055	0.8344	0.8232	0.8365
Cathedral [76]	0.8469	0.8870	0.8311	0.8627	0.8437	0.8467	0.8387	0.8904
Clockbui [78]	0.8622	0.9078	0.9056	0.8853	0.8434	0.8968	0.8764	0.8918
designCenter [74]	0.8446	0.8149	0.8617	0.8628	0.8152	0.8325	0.8204	0.8364
office1 [74]	0.8239	0.8604	0.8846	0.8683	0.8437	0.8656	0.8830	0.8725
groveC [72]	0.9320	0.9018	0.8759	0.9545	0.8727	0.8875	0.8822	0.9396
groveD [72]	0.9510	0.9233	0.8963	0.9536	0.8974	0.9009	0.9136	0.9529
HancockKitchenInside [70]	0.8293	0.7907	0.8685	0.8385	0.8234	0.8099	0.7978	0.8571
Memorial [72]	0.9152	0.9005	0.8909	0.9525	0.8570	0.8906	0.8873	0.9051
Oaks [78]	0.8680	0.8750	0.9027	0.8839	0.8957	0.8810	0.9282	0.9268
FORTH1 [75]	0.7809	0.7994	0.8100	0.8038	0.8051	0.8164	0.8221	0.8288
paul_bunyan [70]	0.8282	0.7967	0.8935	0.8737	0.9051	0.9115	0.8966	0.8508
PeckLake [70]	0.8950	0.8899	0.9251	0.9230	0.9103	0.9151	0.9228	0.8741
FORTH3 [75]	0.7986	0.8388	0.8380	0.8204	0.8263	0.8336	0.8515	0.8359
Rosette [72]	0.9017	0.8652	0.8429	0.9116	0.8462	0.8596	0.8516	0.8773
Snowman [78]	0.8704	0.8533	0.8280	0.8787	0.8324	0.8441	0.8099	0.8725
Tinerna [78]	0.8658	0.8892	0.9176	0.8857	0.8862	0.8890	0.9180	0.9181
Vinesunset [72]	0.8070	0.8108	0.8730	0.8451	0.8620	0.8582	0.8676	0.8316
Synagogue [76]	0.8270	0.8356	0.8744	0.9178	0.9289	0.9229	0.8823	0.8724
Zurich [75]	0.7948	0.7692	0.8452	0.8202	0.8609	0.8499	0.8507	0.8342
SwissSunset [75]	0.7381	0.7920	0.7896	0.7438	0.7976	0.7941	0.8073	0.8234
RevelStoke [75]	0.8081	0.8257	0.8489	0.8303	0.7994	0.8424	0.8403	0.8552
Knossos5 [75]	0.7878	0.7620	0.7838	0.7756	0.8328	0.8265	0.8383	0.7998
MarketMires2 [75]	0.8409	0.8527	0.8724	0.8745	0.8858	0.8913	0.8886	0.8506
cadik-desk01 [71]	0.8175	0.8188	0.8465	0.8343	0.8089	0.8280	0.8199	0.8378
cadik-night_street [71]	0.6752	0.7186	0.7227	0.6928	0.7085	0.7272	0.7288	0.7042
cadik-window [71]	0.7777	0.8000	0.8204	0.7929	0.7931	0.8059	0.8066	0.8154

JesseBrownsCabin [70]	0.8984	0.9189	0.9262	0.9180	0.8879	0.8944	0.9095	0.9313
LadyBirdRedwoods [70]	0.8776	0.8619	0.8870	0.8886	0.8348	0.8463	0.8450	0.8876
LabTypewriter [70]	0.7953	0.7591	0.8158	0.8008	0.7763	0.7878	0.7647	0.8146
LasVegasStore [70]	0.8160	0.8394	0.8394	0.8396	0.7965	0.8369	0.8341	0.8333
LuxoDoubleChecker [70]	0.7251	0.7323	0.7622	0.7312	0.7329	0.7228	0.7282	0.7601
M3MiddlePond [70]	0.8555	0.8137	0.8795	0.8761	0.9092	0.8899	0.9032	0.8350
McKeesPub [70]	0.8108	0.8346	0.8273	0.8261	0.8461	0.8393	0.8707	0.8510
NorthBubble [70]	0.8194	0.8122	0.8721	0.8855	0.9238	0.8915	0.8998	0.8559
OCanadaLights [70]	0.8150	0.8180	0.8883	0.8159	0.8538	0.8482	0.8498	0.8770
OCanadaNoLights [70]	0.8220	0.7913	0.8812	0.8203	0.8708	0.8545	0.8725	0.8781
RoundStoneBarn [70]	0.8316	0.7984	0.8882	0.8480	0.8853	0.8456	0.8801	0.8587
RoundBarnInside [70]	0.8659	0.8560	0.8699	0.8797	0.8439	0.8840	0.8480	0.8728
Peppermill [70]	0.8265	0.8405	0.8343	0.8477	0.7988	0.8304	0.8274	0.8447
RITTiger [70]	0.8368	0.7638	0.8749	0.8461	0.8939	0.8771	0.8764	0.8425
mountain [77]	0.8965	0.8752	0.9397	0.9139	0.8885	0.9133	0.9388	0.9378
kitchen [77]	0.8641	0.8630	0.8196	0.8870	0.8296	0.8520	0.8338	0.8925
office [77]	0.9078	0.9224	0.8827	0.9356	0.8759	0.9119	0.8963	0.9351
woman [77]	0.9136	0.9102	0.7715	0.9242	0.8958	0.884	0.9009	0.9301
treeUnil [77]	0.9234	0.9443	0.9160	0.9587	0.9117	0.9417	0.9337	0.9359
BenJerrys [70]	0.8619	0.9135	0.8938	0.8842	0.9085	0.9182	0.9246	0.9014

Iz tabele Tabela 3.2 se uočava da je na većini scena ELTM rangiran na jednoj od prve tri pozicije. Kako bi se dobio bolji uvid u odnos performansi testiranih operatora, usvojen je pristup koji se inače koristi kod subjektivnih metoda za testiranje. Naime, jedan od pristupa subjektivnom testiranju je da se ispitanicima prikažu različiti rezultati iste scene, pri čemu se od njih zahteva da ih poređaju po kvalitetu, od najbolje ka najgoroj. Na sličan način su, u ovom testiranju su, umesto ispitanika, za rangiranje izlaznih slika korišćeni rezultati objektivnih metrika. Dakle, svakom operatoru je, za svaku scenu, dodeljen rang od 1 do 8 u zavisnosti od rezultata objektivne metrike, pri čemu je rang 1 dodeljen najboljem a rang 8 najgorem operatoru. Vrednosti rangova, za svih 8 testiranih operatora, dobijenih na osnovu FSITM^B_TMQI metrike su usrednjene na celoj bazi HDR slika i prikazane su u tabeli Tabela 3.3. Ovde se uočava da je ELTM

postigao najbolje performanse od testiranih operatora, sa prosečnim rangom od 3.2.

Tabela 3.3 Prosečan rang različitih operatora na osnovu FSITM^B-TMQI metrike. ELTM je bez korekcije osvetljaja.

	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk 06	Mantiuk 08	iCAM 06	ELTM
FSITM ^B -TMQI	6.00	5.32	3.88	3.86	5.38	4.28	4.08	3.20
prosečan rang								

Analizom rezultata prikazanih u tabeli Tabela 3.2, može se zaključiti da je ELTM postigao rang lošiji od treće pozicije uglavnom na veoma svetlim scenama, poput *paul_bunyan*, *PeckLake*, *M3MiddlePond* i na veoma tamnim scenama, poput *designCenter*, *LasVegasStore*, *cadik-night_street*. Uvođenjem korekcije osvetljaja za scene ekstremnim vrednostima osvetljaja, koja je predstavljena u odeljku 3.3, povećava se robusnost ELTM-a. Rezultati testiranja, dobijeni nakon uvođenja korekcije osvetljaja, su prikazani u tabeli Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Poređenje različitih operatora korišćenjem FSITM^B-TMQI metrike. ELTM je sa korekcijom osvetljaja.

Scena	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk 06	Mantiuk 08	iCAM 06	ELTM+ CTRL
AtriumMorning [73]	0.8914	0.9172	0.8650	0.9107	0.8550	0.8869	0.8804	0.9174
Belgium [76]	0.8692	0.8750	0.8504	0.8816	0.8293	0.8596	0.8404	0.8827
Bristol [78]	0.8061	0.7861	0.8590	0.8255	0.8577	0.8519	0.8661	0.8728
cadik-desk02 [71]	0.8217	0.8257	0.8393	0.8449	0.8055	0.8344	0.8232	0.8473
Cathedral [76]	0.8469	0.8870	0.8311	0.8627	0.8437	0.8467	0.8387	0.8903
Clockbui [78]	0.8622	0.9078	0.9056	0.8853	0.8434	0.8968	0.8764	0.8920
designCenter [74]	0.8446	0.8149	0.8617	0.8628	0.8152	0.8325	0.8204	0.8987
office1 [74]	0.8239	0.8604	0.8846	0.8683	0.8437	0.8656	0.8830	0.8732
groveC [72]	0.9320	0.9018	0.8759	0.9545	0.8727	0.8875	0.8822	0.9634
groveD [72]	0.9510	0.9233	0.8963	0.9536	0.8974	0.9009	0.9136	0.9530
HancockKitchenInside [70]	0.8293	0.7907	0.8685	0.8385	0.8234	0.8099	0.7978	0.8632
Memorial [72]	0.9152	0.9005	0.8909	0.9525	0.8570	0.8906	0.8873	0.9504
Oaks [78]	0.8680	0.8750	0.9027	0.8839	0.8957	0.8810	0.9282	0.9261
FORTH1 [75]	0.7809	0.7994	0.8100	0.8038	0.8051	0.8164	0.8221	0.8279
paul_bunyan [70]	0.8282	0.7967	0.8935	0.8737	0.9051	0.9115	0.8966	0.9160
PeckLake [70]	0.8950	0.8899	0.9251	0.9230	0.9103	0.9151	0.9228	0.9246

FORTH3 [75]	0.7986	0.8388	0.8380	0.8204	0.8263	0.8336	0.8515	0.8390
Rosette [72]	0.9017	0.8652	0.8429	0.9116	0.8462	0.8596	0.8516	0.9242
Snowman [78]	0.8704	0.8533	0.8280	0.8787	0.8324	0.8441	0.8099	0.8739
Tinerna [78]	0.8658	0.8892	0.9176	0.8857	0.8862	0.8890	0.9180	0.9195
Vinesunset [72]	0.8070	0.8108	0.8730	0.8451	0.8620	0.8582	0.8676	0.8685
Synagogue [76]	0.8270	0.8356	0.8744	0.9178	0.9289	0.9229	0.8823	0.9275
Zurich [75]	0.7948	0.7692	0.8452	0.8202	0.8609	0.8499	0.8507	0.8580
SwissSunset [75]	0.7381	0.7920	0.7896	0.7438	0.7976	0.7941	0.8073	0.8238
RevelStoke [75]	0.8081	0.8257	0.8489	0.8303	0.7994	0.8424	0.8403	0.8560
Knossos5 [75]	0.7878	0.7620	0.7838	0.7756	0.8328	0.8265	0.8383	0.8384
MarketMires2 [75]	0.8409	0.8527	0.8724	0.8745	0.8858	0.8913	0.8886	0.8916
cadik-desk01 [71]	0.8175	0.8188	0.8465	0.8343	0.8089	0.8280	0.8199	0.8570
cadik-night_street [71]	0.6752	0.7186	0.7227	0.6928	0.7085	0.7272	0.7288	0.7202
cadik-window [71]	0.7777	0.8000	0.8204	0.7929	0.7931	0.8059	0.8066	0.8195
JesseBrownsCabin [70]	0.8984	0.9189	0.9262	0.9180	0.8879	0.8944	0.9095	0.9354
LadyBirdRedwoods [70]	0.8776	0.8619	0.8870	0.8886	0.8348	0.8463	0.8450	0.8901
LabTypewriter [70]	0.7953	0.7591	0.8158	0.8008	0.7763	0.7878	0.7647	0.8349
LasVegasStore [70]	0.8160	0.8394	0.8394	0.8396	0.7965	0.8369	0.8341	0.8442
LuxoDoubleChecker [70]	0.7251	0.7323	0.7622	0.7312	0.7329	0.7228	0.7282	0.7804
M3MiddlePond [70]	0.8555	0.8137	0.8795	0.8761	0.9092	0.8899	0.9032	0.9131
McKeesPub [70]	0.8108	0.8346	0.8273	0.8261	0.8461	0.8393	0.8707	0.8564
NorthBubble [70]	0.8194	0.8122	0.8721	0.8855	0.9238	0.8915	0.8998	0.9207
OCanadaLights [70]	0.8150	0.8180	0.8883	0.8159	0.8538	0.8482	0.8498	0.8784
OCanadaNoLights [70]	0.8220	0.7913	0.8812	0.8203	0.8708	0.8545	0.8725	0.8822
RoundStoneBarn [70]	0.8316	0.7984	0.8882	0.8480	0.8853	0.8456	0.8801	0.8954
RoundBarnInside [70]	0.8659	0.8560	0.8699	0.8797	0.8439	0.8840	0.8480	0.8814
Peppermill [70]	0.8265	0.8405	0.8343	0.8477	0.7988	0.8304	0.8274	0.8578
RITTiger [70]	0.8368	0.7638	0.8749	0.8461	0.8939	0.8771	0.8764	0.8985
mountain [77]	0.8965	0.8752	0.9397	0.9139	0.8885	0.9133	0.9388	0.9388
kitchen [77]	0.8641	0.8630	0.8196	0.8870	0.8296	0.8520	0.8338	0.8966
office [77]	0.9078	0.9224	0.8827	0.9356	0.8759	0.9119	0.8963	0.9364
woman [77]	0.9136	0.9102	0.7715	0.9242	0.8958	0.8840	0.9009	0.9343
treeUnil [77]	0.9234	0.9443	0.9160	0.9587	0.9117	0.9417	0.9337	0.9389

BenJerrys [70]	0.8619	0.9135	0.8938	0.8842	0.9085	0.9182	0.9246	0.9371
----------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Posmatranjem rezultata poređenja, nakon dodavanja kontrole osvetljaja, primećuje se znatno poboljšanje performansi ELTM algoritma. ELTM je sada, po tabeli Tabela 3.4, u 60% scena rangiran kao najbolji operator, u 32% scena kao drugi po rang, dok ni u jednoj sceni nije postigao rang lošiji od 4. Ove performanse se ogledaju i u značajnom poboljšanju prosečnog ranga na celoj bazi slika, koji je prikazan u tabeli Tabela 3.5. Uvođenjem kontrole osvetljaja, prosečan rang ELTM-a na celoj bazi slika je skočio sa 3.2 na 1.54, čime je ELTM postao značajno bolji od ostalih operatora korišćenih u testiranju.

Tabela 3.5 Prosečan rang različitih operatora na osnovu FSITM^B-TMQI metrike. ELTM je sa korekcijom osvetljaja.

	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk 06	Mantiuk 08	iCAM 06	ELTM+ CTRL
FSITM ^B -TMQI	6.10	5.46	4.22	4.20	5.58	4.52	4.38	1.54
prosečan rang								

Prosečan rang svih operatora, na celoj bazi slika, dobijen korišćenjem različitih metrika kvaliteta prikazan je u tabelama Tabela 3.6 i Tabela 3.7. Pri tome je u tabeli Tabela 3.6 ELTM korišćen bez korekcije osvetljaja, dok je u tabeli Tabela 3.7 ELTM korišćen sa korekcijom osvetljaja. Iz ovih tabela se zaključuje da je prosečan rang ELTM-a dobijen korišćenjem različitih metrika kvaliteta uvek na prvom ili na drugom mestu. Pri tome, sve metrike koje su namenjene za evaluaciju kvaliteta operatora za reprodukciju HDR slika, rangiraju ELTM kao najbolji od testiranih operatora.

Tabela 3.6 Prosečan rang različitih operatora za različite metrike kvaliteta. ELTM je bez korekcije osvetljaja.

	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk 06	Mantiuk 08	iCAM 06	ELTM
FSITM ^B -TMQI [51]	6.00	5.32	3.88	3.86	5.38	4.28	4.08	3.20
FSITM ^R -TMQI [51]	6.16	5.54	3.78	3.98	5.42	3.80	4.54	2.78
FSITM ^G -TMQI [51]	5.72	5.74	3.52	3.98	5.42	4.34	4.38	2.90
TMQI-NSS- σ [54]	6.06	6.88	3.94	5.06	3.42	5.56	4.06	1.02
TMQI [50]	5.44	5.84	3.18	3.96	5.24	4.72	4.48	3.14
BRISQUE [55]	5.88	6.40	3.22	5.68	2.58	5.12	4.54	2.58

IL-NIQE [57]	5.38	4.72	5.52	4.16	4.94	4.54	2.86	3.88
BLIINDS2 [56]	5.90	5.27	5.00	4.96	3.19	5.18	4.58	1.92
BTMQI [53]	4.94	6.06	3.62	4.12	4.94	4.96	4.32	3.04

Tabela 3.7 Prosečan rang različitih operatora za različite metrike kvaliteta. ELTM je sa korekcijom osvetljaja.

	Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk06	Mantiuk08	iCAM06	ELTM+CTRL
FSITM ^B -TMQI [51]	6.10	5.46	4.22	4.20	5.58	4.52	4.38	1.54
FSITM ^R -TMQI [51]	6.26	5.64	4.04	4.20	5.64	4.10	4.78	1.34
FSITM ^G -TMQI [51]	5.84	5.84	3.84	4.22	5.62	4.60	4.60	1.44
TMQI-NSS- σ [54]	6.06	6.88	3.94	5.06	3.42	5.56	4.04	1.04
TMQI [50]	5.60	5.96	3.52	4.30	5.32	4.98	4.66	1.66
BRISQUE [55]	5.88	6.38	3.24	5.68	2.48	5.14	4.56	2.64
IL-NIQE [57]	5.42	4.80	5.62	4.20	5.06	4.66	2.92	3.32
BLIINDS2 [56]	5.93	5.26	4.99	4.98	3.23	5.20	4.62	1.79
BTMQI [53]	5.08	6.10	3.92	4.30	5.08	5.18	4.54	1.80

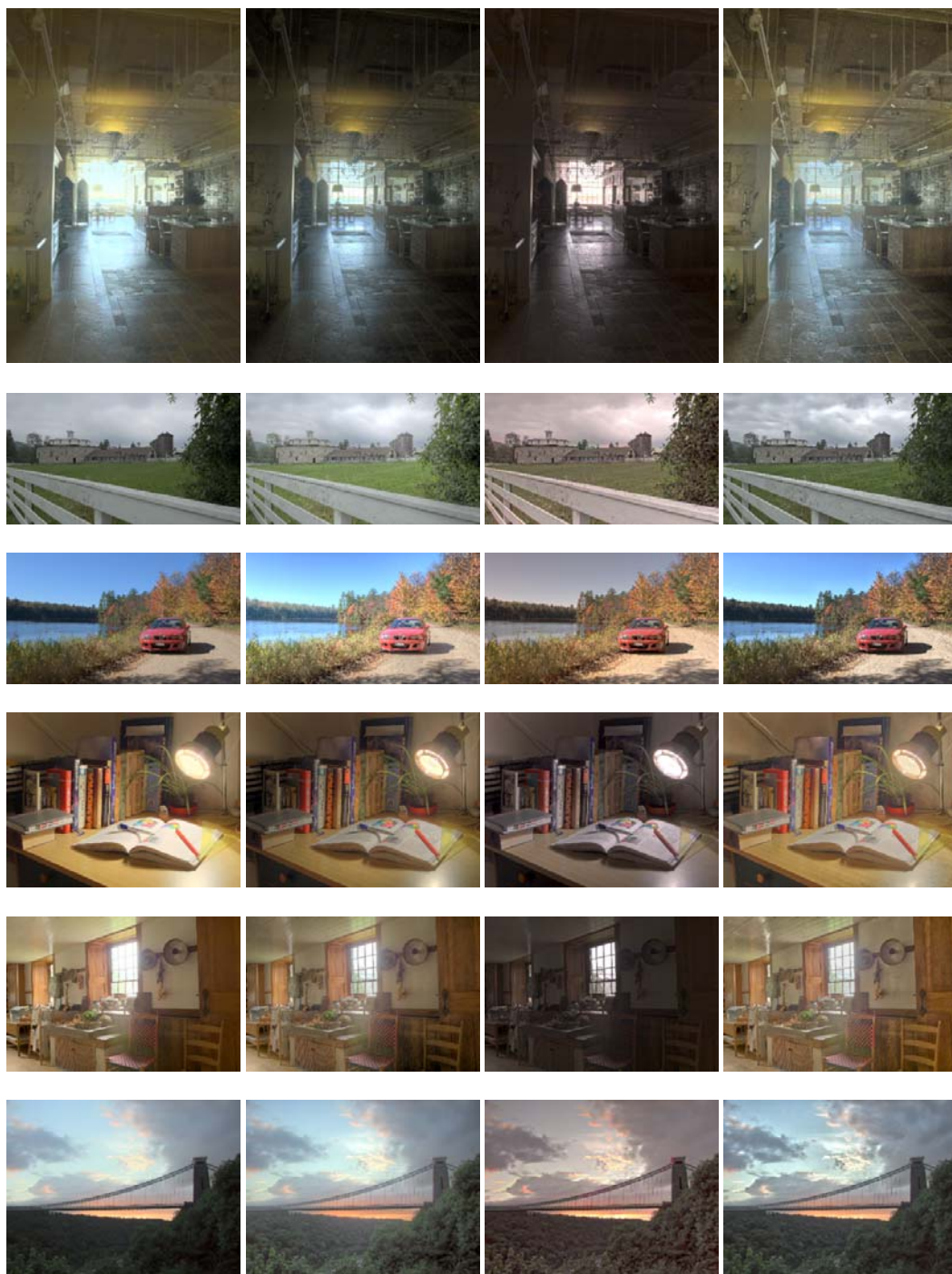
Konačno tabele Tabela 3.8 i Tabela 3.9 predstavljaju rangove testiranih operatora usrednjene za sve scene iz baze i sve korišćene metrike. Pri tom je u tabeli Tabela 3.8 ELTM korišćen bez korekcije osvetljaja dok je u tabeli Tabela 3.9 ELTM korišćen sa korekcijom osvetljaja. Oдавde se može zaključiti da ELTM u proseku ima najbolje performanse od svih testiranih operatora s prosečnim rangom od 2.74, ukoliko se ne koristi korekcija osvetljaja. Po uključenju korekciju osvetljaja prosečni rang se znatno poboljšava i postaje 1.84.

Tabela 3.8 Prosečan rang različitih operatora usrednjen po različitim metrikama kvaliteta. ELTM je bez korekcije osvetljaja.

Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk06	Mantiuk08	iCAM06	ELTM
5.72	5.75	3.96	4.42	4.50	4.72	4.20	2.74

Tabela 3.9 Prosečan rang različitih operatora usrednjen po različitim metrikama kvaliteta. ELTM je sa korekcijom osvetljaja.

Drago	Durand	Fattal	Reinhard	Mantiuk06	Mantiuk08	iCAM06	ELTM+CTRL
5.80	5.81	4.15	4.57	4.60	4.88	4.34	1.84



Slika 3.18 Poređenje izlaznih slika najbolje rangiranih operatora. S leva na desno prikazani su rezultati sledećih operatora: Reinhard [25], Fattal [55], iCAM06 [58] i ELTM [69] sa korekcijom osvetljaja.

Izgled izlaznih slika 4 najbolje rangirana operatora, za različite tipove scena, je prikazan na slici Slika 3.18. Ovde se može uočiti da ELTM daje konzistentno dobre rezultate, uz

očuvanje detalja u svetlim regionima scene, što je posebno uočljivo u regionima scene koji predstavljaju pogled kroz prozorsko okno. Interesantno je primetiti, da po ukupnom utisku, rezultati ELTM-a dosta liče na izlaze koje proizvodi gradijentni operator, koji je predstavio Fattal [55], ali bez prenaplašavanja detalja, koje je za gradijentni operator uočljivo na sceni sa kolima u slici Slika 3.18. Dodatna prednost ELTM-a u odnosu na gradijentni operator je manja računska zahtevnost, jer je izbegnuto rešavanje Poasonove jednačine.

Pri poređenju računskih performansi korišćen je *LuminanceHDR* [79] softverski paket, koji uključuje C implementacije različitih operatora za reprodukciju HDR slika. Vreme procesiranja je mereno za nekoliko slika različitih rezolucija. U svrhu ovog poređenja, kreirana je i C verzija ELTM algoritma. Rezultati testiranja su pokazali da procesiranje 1 Mpix ulazne slike, korišćenjem neoptimizovane C implementacije ELTM-a, traje 223ms, na PC-u sa procesorom koji radi na 3.2GHz. Ove performanse se skaliraju linearno sa povećanjem broja piksela. Prosečna vremena procesiranja 1 Mpix ulazne slike, korišćenjem postojećih operatora za reprodukciju, dobijena pomoću *LuminanceHDR* paketa, kreću se u intervalima 0.5-1.8s za lokalne i 130-180ms za globalne operatore. Navedena merenja pokazuju samo okvirne tendencije, i nisu veoma precizna, s obzirom da vreme procesiranja zavisi od trenutnog zauzeća procesora i stanja operativnog sistema. Na osnovu ovih rezultata, može se uočiti da se ELTM pozicionira i po računskim performansama između lokalnih i globalnih operatora za reprodukciju HDR slika.

4 PRIMENA ELTM-A U VIDEO SEKVENCAMA

4.1 Problem redukcije dinamičkog opsega video sekvenci

U prethodnim glavama, detaljno je izložen problem redukcije dinamičkog opsega statičnih HDR slika, kao i različiti pristupi rešavanju ovog problema. Međutim, primena ovih algoritama u svrhu reprodukcije HDR videa predstavlja posebni izazov, koji poslednjih godina sve više zaokuplja pažnju istraživača u ovoj oblasti [20]. Naime, direktna primena operatora za reprodukciju statičnih HDR slika, nezavisno na svaki frejm video sekvence, obično proizvodi video sa izraženim treperenjem (*flickering artifact*). Uzrok ovog problema predstavlja adaptacija operatora na statistiku svake pojedinačne ulazne slike, kako bi se maksimalno iskoristio dostupni dinamički opseg displeja. Iako poželjna prilikom mapiranja statičnih slika, ova osobina je problematična prilikom redukcije dinamičkog opsega video sekvence. Naime, stalna promena parametara operatora, od frejma do frejma, dovodi do toga da se susedni frejmovi u izlaznom videu mogu znatno razlikovati po osvetljaju. Značajne razlike u osvetljaju susednih frejmova video sekvence dovode do treperenja prilikom reprodukcije videa.

Osnovne osobine, koje operator za reprodukciju HDR videa mora da ispuni su: mala kompleksnost, robusnost i kontrolabilnost. Kako je prilikom reprodukcije HDR videa potrebno primeniti operator za redukciju dinamičkog opsega na svaki frejm scene ponaosob, važno je da kompleksnost operatora bude dovoljno niska, da podrži

standardne brzine reprodukcije video sekvence, koje obično iznose minimalno 30 frejmova po sekundi. Robusnost podrazumeva da operator konzistentno proizvodi dobre rezultate, bez obzira na trenutni sadržaj scene. Ova osobina je od izuzetne važnosti prilikom reprodukcije HDR videa, pošto se reprodukuje veliki broj frejmova, i svaka nekonzistentnost dovodi do pojave artefakata u izlaznom videu. Kontrolabilnost podrazumeva mogućnost jednostavne kontrole operatora u cilju izbegavanja treperenja izlaznog videa.

Globalni operatori se dosta dobro uklapaju u gore navedeni opis i zbog toga su prva komercijalna rešenja video HDR-a bila bazirana na globalnim operatorima. Naime, globalni operatori su veoma jednostavni, pošto obično definišu jednu krivu preslikavanja koja se primenjuje na sve piksele slike. Takođe, s obzirom da se adaptiraju samo na globalne karakteristike scene, ovi operatori su obično veoma robusni. Kontrola globalnih operatora se obično svodi na podešavanje veoma malog broja parametara krive mapiranja. Ovi parametri zavise od globalnih statistika scene, tako da se temporalnim procesiranjem, ovih parametara ili globalnih statistika, mogu relativno lako kontrolisati. Međutim, globalni operatori imaju tendenciju potiskivanja detalja i nisu veoma dobri u reprodukciji lokalnog kontrasta.

Lokalni operatori s druge strane, iako omogućavaju superioran kvalitet prilikom reprodukcije statičnih HDR slika, uglavnom ne ispunjavaju nijedan od gore navedenih uslova za reprodukciju HDR videa. Lokalna adaptivnost i očuvanje lokalnog kontrasta obično se postiže adaptacijom na lokalne karakteristike scene. Za izračunavanje parametara lokalne adaptacije se koristi multirezolucijski pristup ili veliki filtri osetljivi na ivice. Drugi pristup je redukcija gradijenata ulazne slike, koja zahteva rešavanje Poasonove jednačine. Sve ovo vodi ka velikoj računskoj kompleksnosti lokalnih operatora. Lokalna adaptivnost takođe može predstavljati problem kada je reč o temporalnoj robusnosti i kontrolabilnosti. Naime, kao što se kod globalnih operatora javlja problem treperenja u izlaznom videu, lokalni operatori mogu dodatno proizvesti efekat lokalnog treperenja videa. Kontrola ovih operatora je takođe otežana, s obzirom da je sada potrebno temporalno procesirati lokalne statistike scene. Ovo procesiranje lokalnih statistika može dovesti do lokalnih nekonzistentnosti u izlaznom videu, koje se ogledaju u pojavi lokalnih artefakata poput „duhova“.

Pored podele na osnovu prostornog procesiranja, na globalne i lokalne operatore, operatori za reprodukciju HDR videa se mogu podeliti, na osnovu temporalnih karakteristika, na temporalno adaptivne (TC) i temporalno koherentne (TA) operatore. Temporalno adaptivni operatori se adaptiraju na trenutni nivo osvetljaja u sceni, tako da se maksimalno iskoristi izlazni dinamički opseg displeja i postigne što bolji prostorni kontrast izlaznog videa. Ovo međutim može dovesti do inverzije temporalnog kontrasta [93], koja se ogleda u tome da dva frejma iz HDR sekvence, koja su bila u određenom poretku osvetljaja (prvi HDR frejm svetliji od drugog ili obrnuto), nakon redukcije dinamičkog opsega imaju obrnuti poredak osvetljaja (drugi LDR frejm svetliji od prvog ili obrnuto). Održavanje poretka osvetljaja među frejmovima video sekvence, tokom procesa redukcije dinamičkog opsega, naziva se temporalna koherentnost i operatori koji imaju ovu osobinu spadaju u klasu temporalno koherentnih operatora.

Temporalna koherentnost, odnosno temporalni kontrast, se postižu po cenu prostornog kontrasta, s obzirom da nije moguće koristiti celokupan izlazni dinamički opseg displeja za sve frejmove u videu. Zapravo, temporalni i prostorni kontrast predstavljaju oprečne karakteristike video sekvence i povećanje jednog od njih neminovno vodi smanjenju drugog. Maksimalni prostorni kontrast znači da su svi frejmovi idealno eksponirani, odnosno da svi frejmovi u videu imaju približno jednak srednji nivo osvetljaja, što za posledicu ima nulti temporalni kontrast. Maksimalni temporalni kontrast znači da će, u odnosu na idealno eksponirane frejmove, postojati frejmovi koji su svetliji ili tamniji od njih i koji zauzimaju samo deo izlaznog dinamičkog opsega. Kod ovih izlaznih frejmova je značajno smanjen prostorni kontrast i mogućnost reprodukcije detalja. Upravo iz ovog razloga, prilikom projektovanja operatora za reprodukciju HDR videa, prioritet se postavlja ili na stranu temporalne adaptivnosti ili na stranu temporalne koherentnosti.

Lokalni operator ELTM, predstavljen u prethodnom poglavlju, ima dobre predispozicije za korišćenje pri reprodukciji HDR videa. Naime, robusnost algoritma je demonstrirana u okviru prethodnog poglavlja, korišćenjem velikog broja raznorodnih scena i velikog broja različitih metrika kvaliteta. Što se tiče kompleksnosti, ELTM se pozicionira između lokalnih i globalnih operatora. Iako performanse izmerene u prethodnom poglavlju nisu dovoljne za procesiranje video signala u realnom vremenu, treba imati u vidu da je reč o neoptimizovanoj C implementaciji testiranoj na računaru opšte namene.

Najkompleksniji deo algoritma zapravo predstavlja postupak dekompozicije, koji se bazira na korišćenju velikog i malog filtra koji su osetljivi na ivice. Analiza optimizacije ovih filtara i njihova hardverska realizacija predstavljani su u glavi 5. Predmet ove glave je zapravo treći aspekt operatora koji je potreban za primenu u HDR videu, a to je temporalna kontrola. Kao u prethodnom poglavlju, prilikom projektovanja operatora, tako i ovde prilikom projektovanja kontrole, poseban akcenat je stavljen na fleksibilnost algoritma. Naime, umesto da se usvoji jedan od pravaca, temporalne adaptivnosti ili temporalne koherentnosti, odlučeno je da se razvije fleksibilna kontrola, koja omogućava postizanje željenog odnosa između temporalnog i prostornog kontrasta.

U odeljku 4.2 su prikazani osnovni pravci pristupa redukciji dinamičkog opsega HDR videa. Temporalna kontrola ELTM-a je opisana u odeljku 4.3, dok su u odeljku 4.4 prikazani rezultati mapiranja HDR video sekvence, korišćenjem ELTM algoritma u poređenju sa 8 postojećih algoritama.

4.2 Postojeći operatori za reprodukciju HDR videa

Globalni operatori za reprodukciju HDR slika su dugo vremena držali primat u HDR video rešenjima, iz razloga navedenih u prethodnom odeljku. Od globalnih operatora predstavljenih u glavi 2.1, za potrebe HDR videa, najviše je korišćen upravo Reinhard-ov operator [25]. Razlog za to je izuzetna jednostavnost i robusnost ovog operatora, koja je demonstrirana i u glavi 3.4.2. Reinhard-ov operator se bazira na sigmoidnoj funkciji, koja je kontrolisana srednjom vrednošću logaritamskog osvetljaja ulazne slike.

Prvi pristup temporalnoj kontroli Reinhard-ovog operatora predstavio je Kang [94]. Ideja je da se ublaže brze promene funkcije mapiranja, od frejma do frejma, tako što se srednja vrednost logaritamskog osvetljaja, kojom se kontroliše sigmoidna funkcija, umesto na trenutnom, računa korišćenjem konstantnog broja prethodnih frejmova video sekvence. Kako bi omogućio brzu adaptaciju na velike promene osvetljaja scene (paljenje svetla, ulazak/izlazak iz tunela), Ramsey [95] je predložio da se prilikom usrednjavanja koristi promenljivi broj frejmova. Ideja je da se broj frejmova, koji se koriste pri usrednjavanju, smanjuje ukoliko se detektuje velika promena osvetljaja, čime se ubrzava adaptacija, a povećava ukoliko je osvetljaj približno konstantan, čime se otklanja treperenje. Kiser [96] je zaključio da se umesto filtriranja srednje vrednosti,

bolja kontrola može postići ukoliko se filtriraju parametri sigmoidne funkcije. Takođe, predložio je da se u procesu filtriranja koriste IIR filtri, što otklanja potrebu za čuvanjem prethodnih frejmova u memoriji.

Za razliku od prethodnih pristupa, kojima se temporalna kontrola postiže filtriranjem statistika scene, Mantiuk [27] predlaže da se sama kriva, koja se koristi za mapiranje, a koja je definisana kao deo po deo linearna karakteristika, filtrira tokom vremena. Sličan pristup redukciji dinamičkog opsega i temporalne kontrole korišćen je u [64], s tim što je, umesto jedne globalne, korišćeno više lokalnih krivi, za mapiranje različitih regiona scene. U [64] se takođe koristi dekompozicija na bazni sloj i sloj detalja, kako bi se bolje sačuvao lokalni kontrast.

Posebnu kategoriju predstavljaju operatori, koji su bazirani direktno na rezultatima bioloških ispitivanja i koji modeluju prostorne i temporalne karakteristike ljudskog vizuelnog sistema. Model temporalne adaptacije se kod ovih operatora uglavnom predstavlja niskofrekventnim eksponencijalnim filtrom, koji zapravo predstavlja filter IIR tipa. Pattanaik [97] je koristio eksponencijalnu funkciju da modeluje temporalnu adaptaciju fotoreceptora, pri promeni globalnog osvetljaja. Ledda [98] uvodi model lokalne adaptacije koji se određuju korišćenjem bilateralnog filtra. Temporalna kontrola se obavlja eksponencijalnim filtriranjem ovih lokalnih nivoa adaptacije. Van Harten [99] je bazirao svoj operator na eksperimentalnim merenjima dinamičkog odziva čepića i horizontalnih ćelija kod primata, pri čemu je funkcija temporalne adaptacije takođe eksponencijalnog oblika. Reinhard [100] predlaže model percepcije HDR slika, koji se bazira na postojećim modelima percepcije boja, pri čemu je model kalibrisan, tako da daje što bolje poklapanje sa postojećim psihofizičkim merenjima percepcije HDR scena. Što se tiče temporalne dimenzije i ovde je korišćen IIR filter kako bi se modelovala vremenska promena nivoa adaptacije fotoreceptora. Benoit [101] modeluje procesiranje koje se odvija unutar mrežnjače, po neuralnim slojevima, pri čemu se adaptacija na lokalne nivoe osvetljaja i promene osvetljaja tokom vremena, modeluje prostorno vremenskim filtriranjem odziva fotoreceptora.

Jedan od osnovnih problema prilikom vremenskog filtriranja parametara lokalne adaptacije, predstavljaju brze promene unutar lokalnih regiona scene, koje uglavnom nastaju usled kretanja objekata. Filtriranje ovih lokalnih karakteristika u vremenu,

usporava njihovu adaptaciju na brze promene u sceni. Neadekvatni nivo lokalne adaptacije dovodi do artefakata u izlaznom videu, koji se uglavnom ogledaju u vidu pojave „duhova“ iza objekata koji se kreću. Kako bi izbegao ovaj problem, Aydin [102] estimira pomeraje objekata između susednih frejmova i obavlja usrednjavanje po linijama kretanja. Velika promena u sadržaju lokalnog regiona u slici može se posmatrati i kao ivica u temporalnom domenu. Zbog toga Bennet i McMillan [46] koriste bilateralni filter prilikom temporalnog usrednjavanja. Oni zapravo, ne usrednjavaju statistike scene, već cele frejmove. Na ovaj način oni nameću koherentnost između susednih frejmova, sprečavaju treperenje, a upotrebom temporalnog bilateralnog filtra smanjuju i mogućnost pojave „duhova“. Temporalno usrednjavanje celih frejmova takođe povoljno utiče na smanjenje šuma u video sekvenci.

Pitanje temporalne koherentnosti je prvi pokrenuo Boitard [93], koji problem inverzije temporalnog kontrasta ističe kao jedan od glavnih problema HDR videa, pored problema treperenja scene. Kako bi nametnuo temporalni kontrast, Boitard predlaže postupak postprocesiranja izlaza, nakon redukcije dinamičkog opsega, kojim se vraća poredak osvetljaja frejmova unutar video sekvence. Iako restaurira temporalni kontrast, ovaj postupak neminovno vodi ka smanjenju prostornog kontrasta izlaznog videa. Kako bi razrešio problem smanjenog prostornog kontrasta, Boitard [103] predlaže segmentaciju frejmova na regione slične osvetljenosti i nametanje temporalne koherentnosti na različite regione scene. Ovaj postupak se međutim ne može iskoristiti za reprodukciju HDR videa u realnom vremenu, pošto zahteva analizu celokupnog videa, kako bi se odredili međusobni odnosi osvetljaja svih frejmova u video sekvenci.

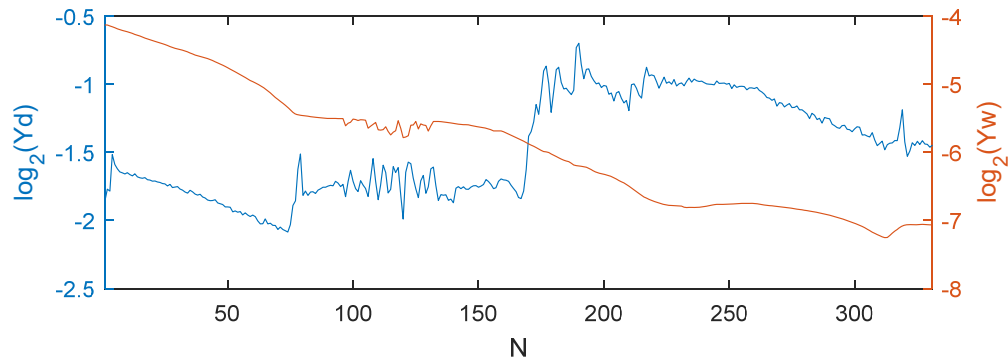
Prve detaljne analize operatora za reprodukciju HDR videa su se pojavile pre par godina [104], [105], [106]. U ovim studijama, Maniuk-ov operator DA-TM (*Display Adaptive Tone Mapping*) [27] i Boitard-ov operator TC-TM (*Temporal Coherency Tone Mapping*) [93] su označeni kao dva najbolja rešenja za reprodukciju HDR videa, pri čemu je prvi najbolji po pitanju prostornog kontrasta, dok je drugi najbolji po pitanju temporalne koherentnosti. U najnovijoj studiji, koja se bavi evaluacijom operatora za reprodukciju HDR videa [20], DA-TM i TC-TM su opet svrstani među najbolja rešenja po pitanju otpornosti na temporalne artefakte, poput treperenja i „duhova“. Po pitanju lokalnog kontrasta, dva nova operatora, koja su se pojavila poslednjih godina su izbila na prvo mesto, i to su Aydin-ov MPF-TM (*Motion Path Filtering Tone Mapping*) [102]

i Eilertsen-ov NA-TM (*Noise Aware Tone Mapping*) [64].

4.3 Temporalna kontrola ELTM operatora

Temporalne karakteristike ELTM operatora su testirane na bazi HDR video sekvenci koje su dostupne na sajtu Linkoping univerziteta [107]. Detaljna analiza kontrole ELTM-a i poređenje sa postojećim rešenjima prikazano je za sekvencu *Hallway* iz ove baze. Ova sekvenca je pogodna za testiranje temporalne koherentnosti, pošto sadrži prelaze iz svetlog spoljašnjeg prostora, osvetljenog dnevnom svetlošću, u znatno tamniji hodnik, osvetljen sijalicama. Naime, prvi deo sekvence predstavlja prostor ispred fakultetske kantine, koji je osvetljen dnevnom svetlošću. Kamera zatim dolazi do vrata kantine i okreće se ka hodniku, koji je znatno tamniji od prostora ispred. Hodnikom prolaze studenti, čija je tamna odeća u kontrastu sa belim zidovima, što predstavlja odličan test za ispitivanje pojave lokalnih treperenja i „duhova“ u izlaznim sekvencama.

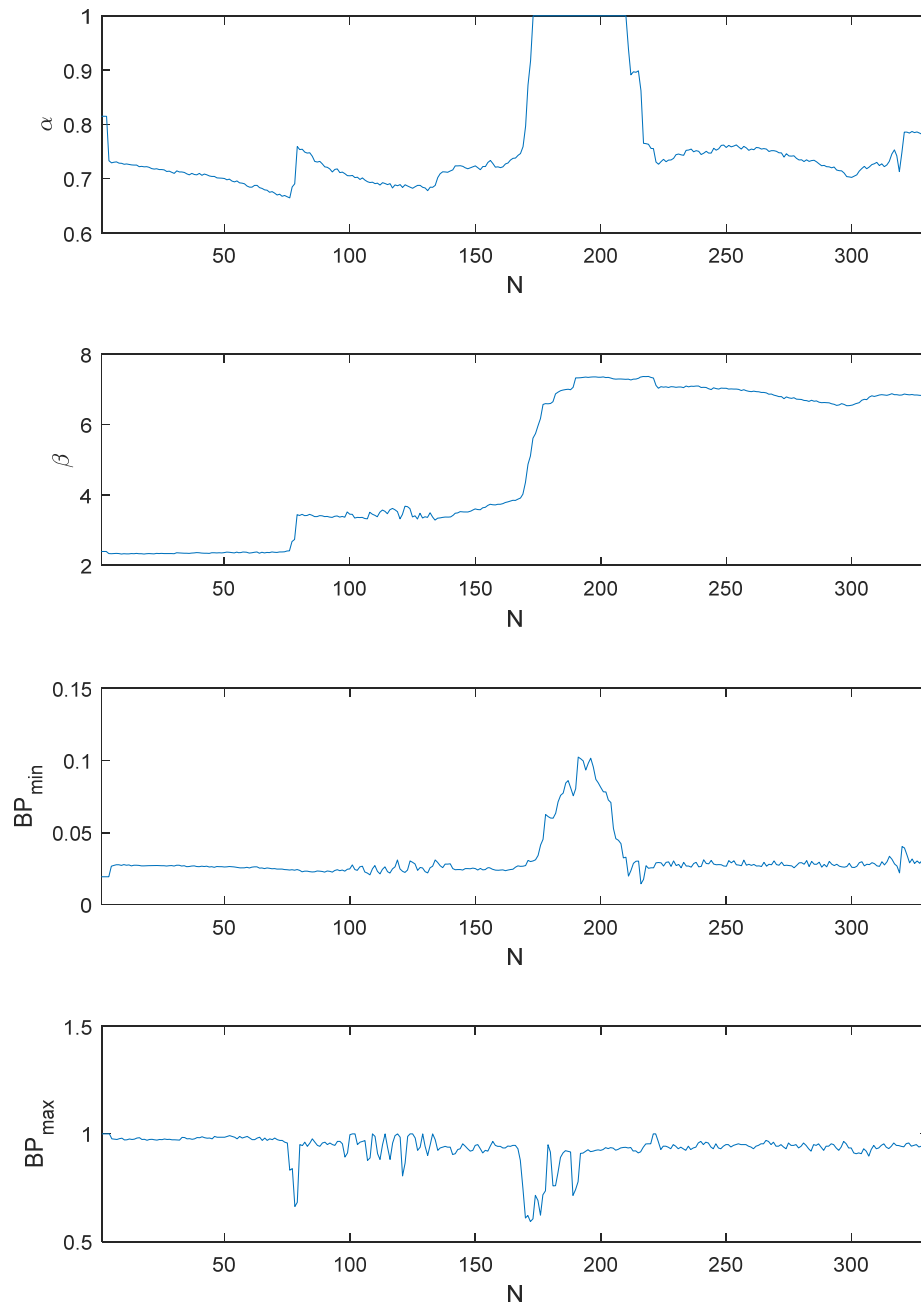
Na slici Slika 4.1 je plavom bojom prikazan prosečan osvetljaja frejmova, u logaritamskom domenu, nakon primene ELTM-a bez temporalne kontrole. Narandžastom bojom je prikazan prosečan osvetljaj frejmova, u logaritamskom domenu, ulazne HDR video sekvence. Može se uočiti da u izlaznoj sekvenci postoje značajne oscilacije osvetljaja između susednih frejmova, koje se ne mogu uočiti na ulaznoj HDR sekvenci. Ove oscilacije osvetljaja dovode do izraženog treperenja izlazne video sekvence. Takođe, može se uočiti da je u procesu redukcije dinamičkog opsega, došlo do inverzije temporalnog kontrasta. Naime, u izlaznom videu je drugi deo sekvence, većeg prosečnog osvetljaja od prvog dela sekvence, dok je u ulaznom videu situacija obrnuta.



Slika 4.1 Prosečna vrednost osvetljaja pojedinačnih frejmova pre (narandžasto) i posle (plavo) redukcije dinamičkog opsega primenom ELTM operatora bez temporalne kontrole parametara.

Iako ELTM predstavlja lokalni operator u pogledu reprodukcije detalja, redukcija dinamičkog opsega se zapravo postiže primenom globalne funkcije mapiranja na bazni sloj osvetljaja. Ovo automatski znači, da se ELTM zapravo može kontrolisati na sličan način kao i globalni operatori, temporalnim filtriranjem parametara globalne funkcije mapiranja. Operacija redukcije dinamičkog opsega kod ELTM algoritma je zapravo podeljena u dva koraka. Prvi korak predstavlja adaptaciju dinamičkog opsega baznog sloja u logaritamskom domenu, koja je definisana izrazom (3.1.5) i koja se kontroliše parametrima skaliranja α i ofseta β . Dok drugi korak predstavlja popravka kontrasta u linearnom domenu, koja je definisana izrazom (3.1.13) i koja se adaptira na osnovu minimalne $BP_{\min}$ i maksimalne vrednosti $BP_{\max}$ trenutnog baznog sloja.

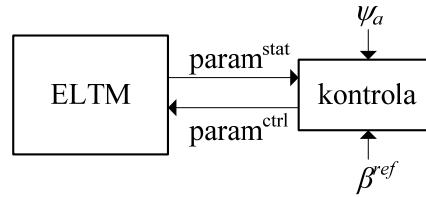
Posmatranjem promene vrednosti ovih parametara, koje su prikazane na slici Slika 4.2, uočava se da postoje značajne oscilacije između susednih frejmova video sekvence. Upravo ove oscilacije parametara ELTM-a dovode do velikih razlika u osvetljaju izlaznih LDR frejmova, a samim tim i do treperenja izlazne video sekvence.



Slika 4.2 Promena vrednosti pojedinačnih parametara ELTM algoritma tokom vremena u odsustvu temporalne kontrole algoritma.

Osnovna ideja temporalne kontrole ELTM algoritma je definisana na slici Slika 4.3. Parametri algoritma koji se računaju na osnovu statistike trenutnog frejma obeleženi su oznakom *stat* i predstavljaju ulaz u kontrolni blok. Ovi parametri ne utiču na reprodukciju trenutnog ulaznog frejma. Za reprodukciju trenutnog frejma, koriste se isfiltrirane vrednosti parametara, koje dolaze iz kontrolnog bloka i obeležene su

oznakom *ctrl*. Značenje ulaznih parametara ψ_a i β^{ref} biće dato u nastavku teksta.



Slika 4.3 Temporalna kontrola parametara ELTM algoritma.

Stepen adaptacije na trenutni nivo osvetljaja u ELTM algoritmu je određen vrednošću parametra ofseta β . Njegova svrha je da maksimalnu vrednost osvetljaja ulazne scene, postavi na maksimalnu vrednost osvetljaja izlazne luminanse. Ovakvo podešavanje ofseta zapravo odgovara potpunoj adaptiranosti i vodi ka temporalno adaptivnom algoritmu. S druge strane, ako se vrednost ofseta drži konstantnom, za sve frejmove video sekvence, isključuje se mogućnost adaptacije na različite nivoe osvetljaja i dobija se temporalno koherentan algoritam. Parcijalna adaptacija se postiže podešavanjem nivoa ofseta između ova dva ekstrema na osnovu izraza:

$$\beta_a^{ctrl} = \psi_a \cdot \beta^{ctrl} + (1 - \psi_a) \cdot \beta^{ref} \quad (3.1.17)$$

gde β^{ref} predstavlja referentnu vrednost ofseta i određuje referentni nivo adaptacije. Parametar β^{ctrl} predstavlja vrednost ofseta, koji se dobija iz kontrolnog bloka i kojim se postiže potpuna adaptiranost na trenutni osvetljaj scene. Step adaptiranosti se određuje parametrom ψ_a . Vrednost 0 ovog parametra označava stanje bez adaptacije, u kome se za svaki frejm koristi vrednost ofseta β^{ref} , što odgovara temporalno koherentnom rešenju. S druge strane, vrednost 1 ovog parametra, označava stanje maksimalne adaptacije, pri čemu se vrednost ofseta za svaki frejm podešava tako da se postigne maksimalni prostorni kontrast, što odgovara temporalno adaptivnom rešenju. Menjanjem vrednosti ovog parametra između ova dva ekstrema moguće je postići različite stepene parcijalne adaptacije, odnosno željeni odnos između temporalnog i prostornog kontrasta.

Vrednost referentnog ofseta β^{ref} se može podesiti na osnovu bilo kog dela video sekvence. Deo video sekvence čiji ofset se poklapa sa vrednošću referentnog ofseta će

zapravo imati maksimalno iskorišćen prostorni kontrast, čak i u slučaju temporalno koherentnog rešenja. Za ostale frejmove video sekvence, trenutna vrednost ofseta se nalazi između idealnog i referentnog, i predstavlja kompromis između prostornog i temporalnog kontrasta. U slučaju procesiranja u realnom vremenu, gde vrednosti osvetljaja narednih frejmova video sekvence nisu poznate, vrednost referentnog ofseta se može podesiti ili na osnovu prvog frejma ili na osnovu očekivanih vrednosti osvetljaja bitnih delova video sekvence.

Pored kompenzacije ofseta u logaritamskom domenu, adaptacija krive za popravku kontrasta u linearnom domenu takođe proizvodi rezultat koji odgovara stanju potpune adaptiranosti. Zbog toga se, čak i u slučaju uvođenja parcijalne adaptacije u logaritamskom domenu, nakon popravke kontrasta, izlaz opet svodi na temporalno adaptivni slučaj. Naime, u slučaju parcijalne adaptacije, maksimalna vrednost osvetljaja baznog sloja u linearnom domenu će biti manja od 1. Logaritamska kriva za popravku kontrasta prilagodiće se ovom baznom sloju i popraviti kontrast tako da se maksimalni osvetljaj mapira na maksimalnu vrednost izlazne luminanse, čime se poništava efekat parcijalne adaptacije. Zbog toga je prilikom primene ELTM algoritma na HDR video sekvence, u slučajevima koji treba da podrže parcijalnu adaptaciju, potrebno u izrazu (3.1.13) postaviti vrednost parametra $BP_{\max} = 1$. U narednih par jednačina redefinisani su izrazi ELTM algoritma, tako da se jasno razdvoje ulazi kontrolnog bloka, označeni sa *stat* od izlaza kontrolnog bloka, koji su označeni sa *ctrl* :

$$BP'_{\log} = \alpha^{ctrl} \cdot (BP_{\log} + \beta_a^{ctrl}) \quad (3.1.18)$$

$$\alpha^{stat} = \frac{\tau_R}{\max(BP_{\log}) - \min(BP_{\log})} \quad (3.1.19)$$

$$\beta^{stat} = -\max(BP_{\log}) \quad (3.1.20)$$

$$BP_C = (BP_{C\max}^{ctrl} - BP_{C\min}) \frac{\log\left(\frac{BP - BP_{\min}^{ctrl}}{1 - BP_{\min}^{ctrl}} + p\right) - \log(p)}{\log(1 + p) - \log(p)} + BP_{C\min} \quad (3.1.21)$$

$$BP_{\min}^{stat} = \min(BP) \quad (3.1.22)$$

$$BP_{Cmax}^{stat} = \max\left(\frac{1}{Y_{dmax}}, 1\right) \quad (3.1.23)$$

Kao i u osnovnoj verziji ELTM algoritma, minimalne i maksimalne vrednosti se, radi povećanja robusnosti, određuju kao odgovarajući percentili umesto pravih minimalnih i maksimalnih vrednosti.

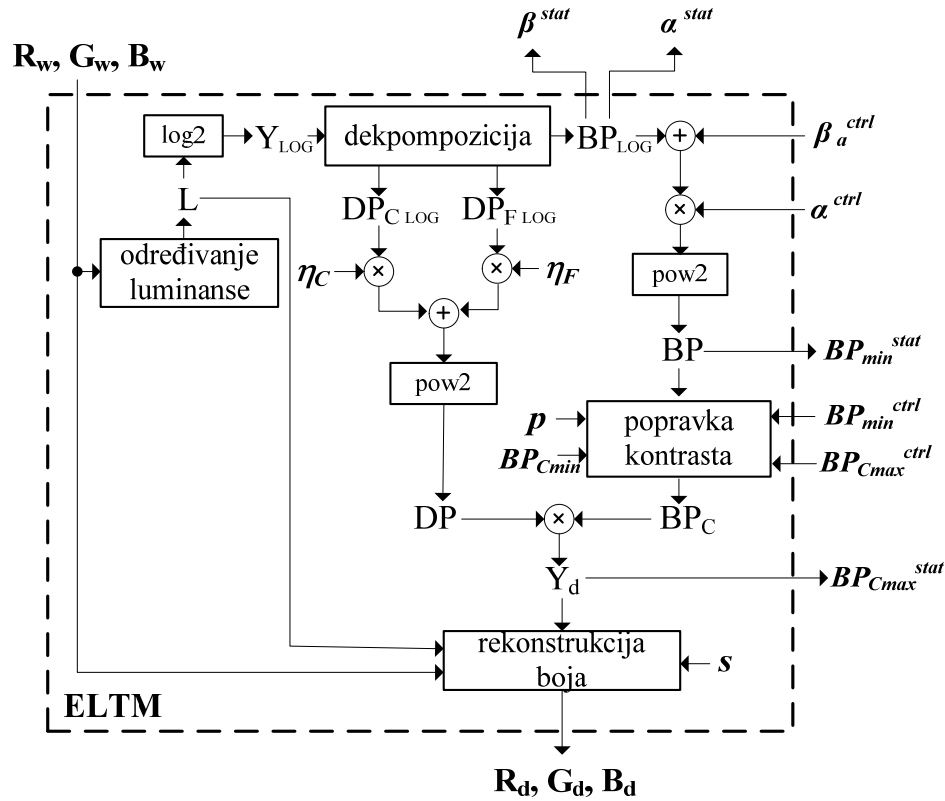
U prethodnim izrazima, iskorišćena je još jedna prednost video sekvence i to za automatsko podešavanje parametra BP_{Cmax} . Ovim parametrom se određuje koji deo izlaznog opsega se rezerviše za detalje u svetlim regionima. Visoke vrednosti ovog parametra, koje su bliske vrednosti 1, dovode do najboljeg globalnog kontrasta ali mogu dovesti do odsecanja detalja u svetlim regionima. Niže vrednosti sprečavaju odsecanje detalja ali degradiraju globalni kontrast. Automatsko podešavanje ovog parametra kod statičnih scena je problematično, pošto nije unapred poznato, pre koraka restauracije detalja, koja vrednost granice baznog sloja je optimalna, tako da se maksimalno iskoristi globalni kontrast a ne odseku detalji. Zbog toga je usvojena vrednost od 0.9 koja daje najbolje rezultate na velikom broju testiranih sekvenci. Međutim, prilikom mapiranja video signala, ova informacija se može dobiti na osnovu prethodnog frejma. Naime, u slučaju da je nakon restauracije detalja maksimalna vrednost izlazne luminanse bila veća od 1, to znači da je došlo do odsecanja detalja i da u narednom frejmu treba ostaviti više prostora za detalje u svetlim regionima scene. Ovaj postupak je definisan izrazom (3.1.23).

Blok šema ELTM algoritma sa naznačenim vezama ka kontrolnom bloku prikazana je na slici Slika 4.4.

Temporalna kontrola parametara ELTM algoritma se postiže jednostavnim IIR filtrom prvog reda:

$$param^{ctrl}[n] = \xi \cdot param^{stat}[n-1] + (1 - \xi) \cdot param^{ctrl}[n-1] \quad (3.1.24)$$

gde parametar ξ predstavlja brzinu odziva IIR filtra. Interesantno je primetiti da se ovako definisanom kontrolom, omogućava mapiranje trenutnog frejma i računanje statistika u paraleli, s obzirom da parametri dobijeni na osnovu statistike trenutnog frejma utiču na mapiranje tek sledećeg frejma.



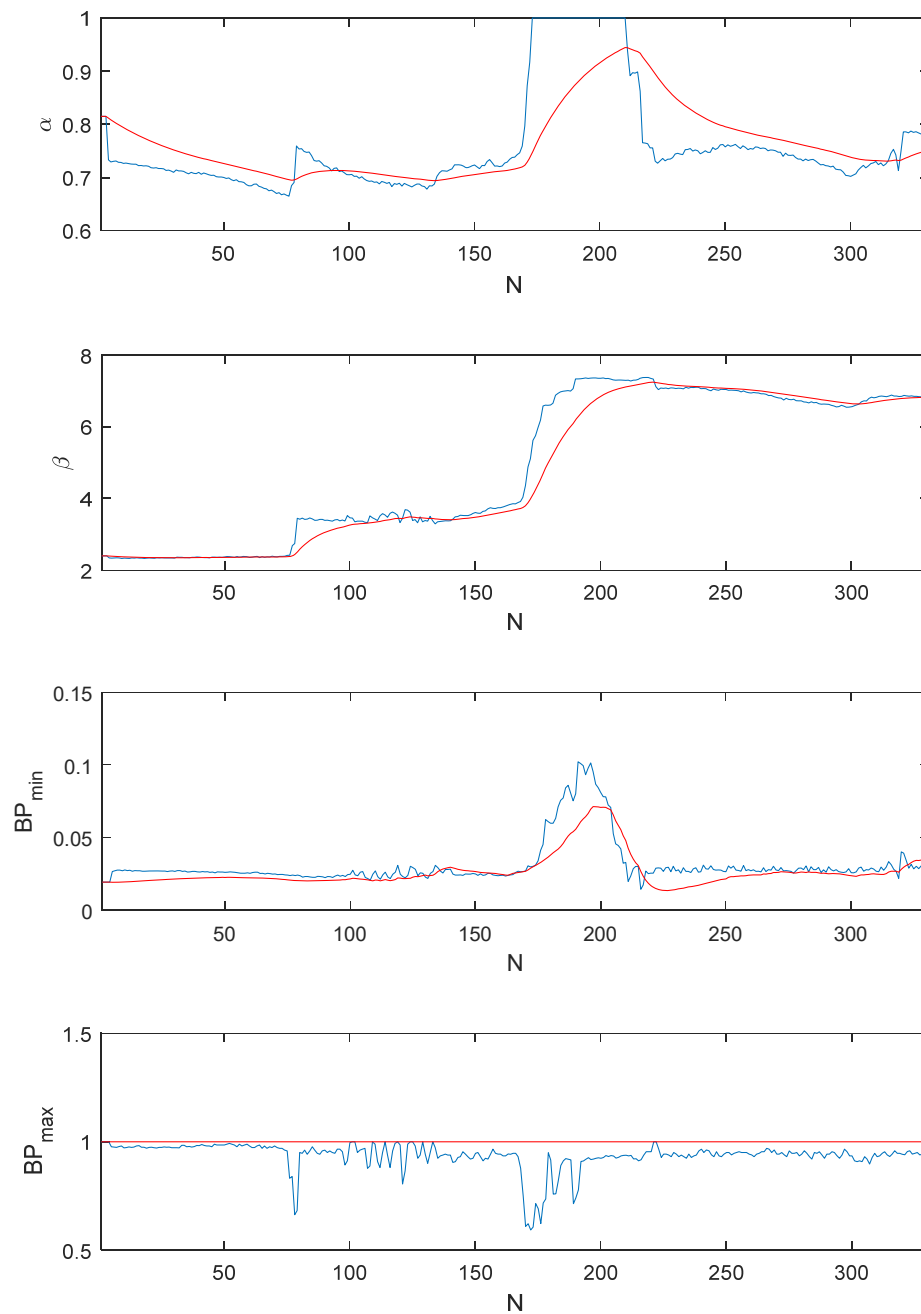
Slika 4.4 Blok dijagram ELTM algoritma sa vezama ka kontrolnom bloku.

Brzina odziva IIR filtra (ξ) pojedinih parametara ELTM algoritma, prikazana je u tabeli Tabela 4.1. Može se primetiti da su brzine odziva parametara ofseta β i minimalne vrednosti baznog sloja BP_{min} najveće, s obzirom da ovi parametri direktno utiču na brzinu adaptacije nakon promene nivoa osvetljaja u sceni. Posebno je kritičan parametar BP_{min} . Naime, svi pikseli baznog sloja koji imaju vrednost manju od BP_{min} se zasićuju u BP_{Cmin} , dok pikseli koji su malo veću vrednost dobijaju veliko pojačanje, s obzirom da je strmina logaritamske funkcije u tom regionu najveća. Upravo iz ovog razloga je brzina odziva IIR filtra koji kontroliše parametar BP_{min} postavljena na 0.2. Manje brzine odziva značajno usporavaju proces adaptacije, dok veće brzine odziva mogu dovesti do pojave treperenja izlaznog videa.

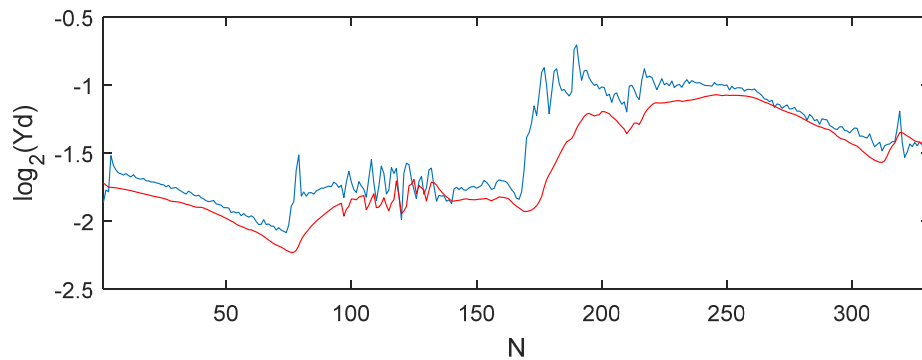
Tabela 4.1 Brzina odziva IIR filtra za svaki od parametara koji se kontroliše

Parametar koji se kontroliše	Brzina odziva IIR filtra (ξ)
α	0.04
β	0.08
$BP_{\min}$	0.2
$BP_{C\max}$	0.04

Na slici Slika 4.5 je crvenom bojom prikazana promena parametara ELTM algoritma nakon uvođenja temporalne kontrole. Može se uočiti da su nagle promene parametara između susednih frejmova znatno ublažene, što kao rezultat ima temporalno konzistentno mapiranje video sekvence bez treperenja. Ovo se može potvrditi posmatranjem prosečnih vrednosti osvetljaja izlaznih frejmova, nakon uvođenja temporalne kontrole, koji su na slici Slika 4.6 označeni crvenom bojom. Vidi se da su nagle promene osvetljaja otklonjene u svim delovima video sekvence, osim u onim delovima, gde ove brze promene postoje i u ulaznoj HDR sekvenci (interval između 100. i 130. frejma).



Slika 4.5 Promena vrednosti pojedinačnih parametara ELTM algoritma tokom vremena pre (plavo) i nakon (crveno) uvođenja temporalne kontrole.

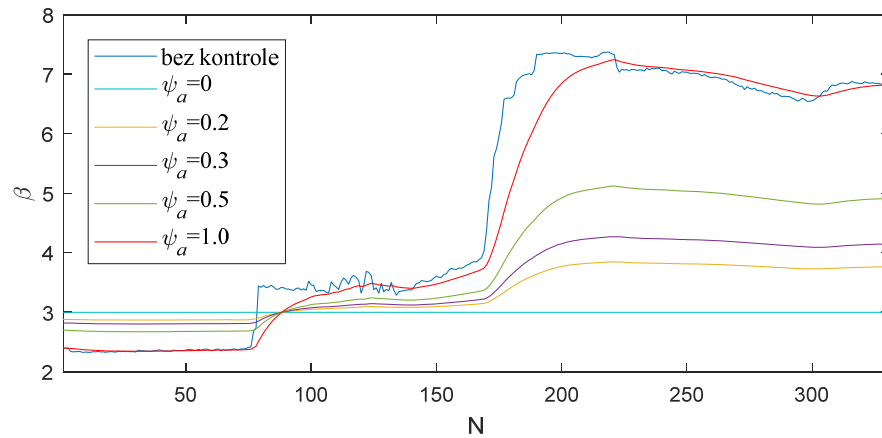


Slika 4.6 Prosečna vrednost osvetljaja izlaznih frejmova pre (plavo) i posle (crveno) uvođenja temporalne kontrole parametara ELTM algoritma.

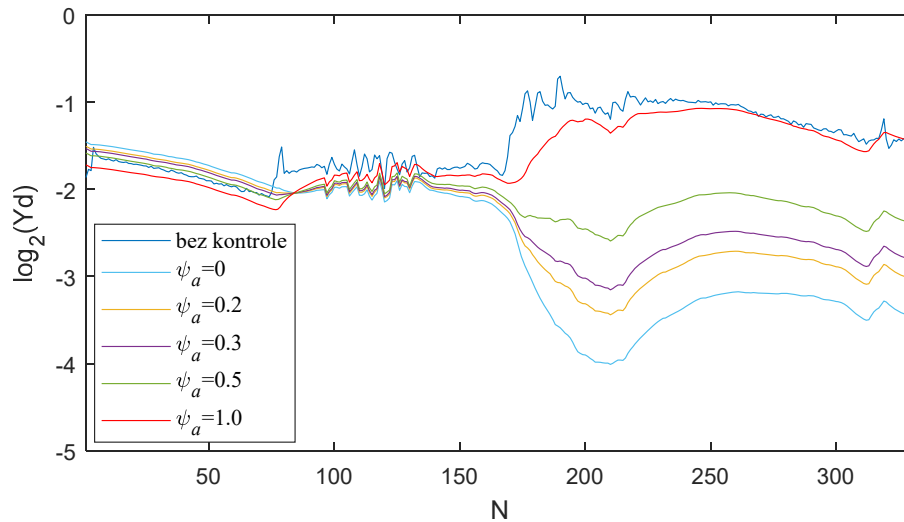
Kao što je ranije navedeno, proces adaptacije ELTM algoritma se ogleda u prilagođavanju parametra ofseta svakom pojedinačnom frejmu. U slučaju tamnijih delova video sekvence, vrednost parametra ofseta raste, čime se obavlja kompenzacija osvetljaja i dobija maksimalna iskorišćenost izlaznog dinamičkog opsega. Ovo ponašanje se može uočiti i na primeru sekvence *Hallway*, za koju je detaljno analizirano ponašanje ELTM algoritma. Naime, u drugom delu sekvence, koji se odnosi na tamniji hodnik, parametar ofseta ima značajno veću vrednost nego u prvom delu sekvence. Posledica ove adaptacije je povećanje osvetljenosti drugog dela sekvence, koja sada, zbog dominantnih svetlijih površina, poput zidova hodnika ima veći prosečan osvetljaj nego frejmovi prvog dela sekvence, koji odgovaraju prostoru ispred kantine. Parcijalna adaptacija ograničava varijaciju parametra ofseta, pa samim tim i nameće temporalnu koherentnost u izlazni video. Uticaj parametra adaptacije ψ_a na vrednost parametra ofseta β je prikazan na slici Slika 4.7. Može se uočiti da u slučaju potpune adaptacije, koja se postiže za $\psi_a = 1$, vrednost ofseta koja se koristi pri mapiranju teži da dostigne trenutnu vrednost ofseta pojedinačnih frejmova. Za slučaj bez adaptacije, koji se postiže za $\psi_a = 0$, vrednost ofseta je konstantna za sve frejmove i ima vrednost β^{ref} . Za ostale vrednosti adaptacije, između 0 i 1, vrednost ofseta se uvek nalazi između ova dva ekstrema.

Slika 4.8 prikazuje prosečne osvetljaje frejmova video sekvence, nakon primene ELTM algoritma, za različite vrednosti stepena adaptacije. Može se uočiti da je za vrednosti stepena adaptacije $\psi_a < 0.5$ zadržana temporalna koherentnost, odnosno da su frejmovi

koji odgovaraju tamnijem holu manje prosečne osvetljenosti od frejmova koji odgovaraju prostoru ispred kantine.



Slika 4.7 Uticaj stepena adaptacije na vrednost parametra ofseta.



Slika 4.8 Uticaj stepena adaptacije na prosečni osvetljaj video sekvence.

4.4 Rezultati

Rezultati reprodukcije HDR videa, korišćenjem ELTM operatora sa temporalnom kontrolom, su najpre upoređeni sa 8 postojećih operatora koji su projektovani za mapiranje video sekvenci. Rezultati su prikazani na primeru *Hallway* video sekvence. Za svaki od operatora su izdvojena dva karakteristična frejma, koja odgovaraju svetlom delu scene ispred kantine i tamnom delu scene hodnika. Ideja je da

se, na osnovu ovih frejmova, stekne utisak o temporalnoj koherentnosti i prostornom kontrastu koji postižu testirani operatori. Pored toga, za svaki od testiranih operatora, prikazani su prosečni osvetljaji frejmova unutar cele video sekvence, kako bi se demonstrirala temporalna konzistentnost (odsustvo/prisustvo treperenja) i temporalna koherentnost izlaznog videa.

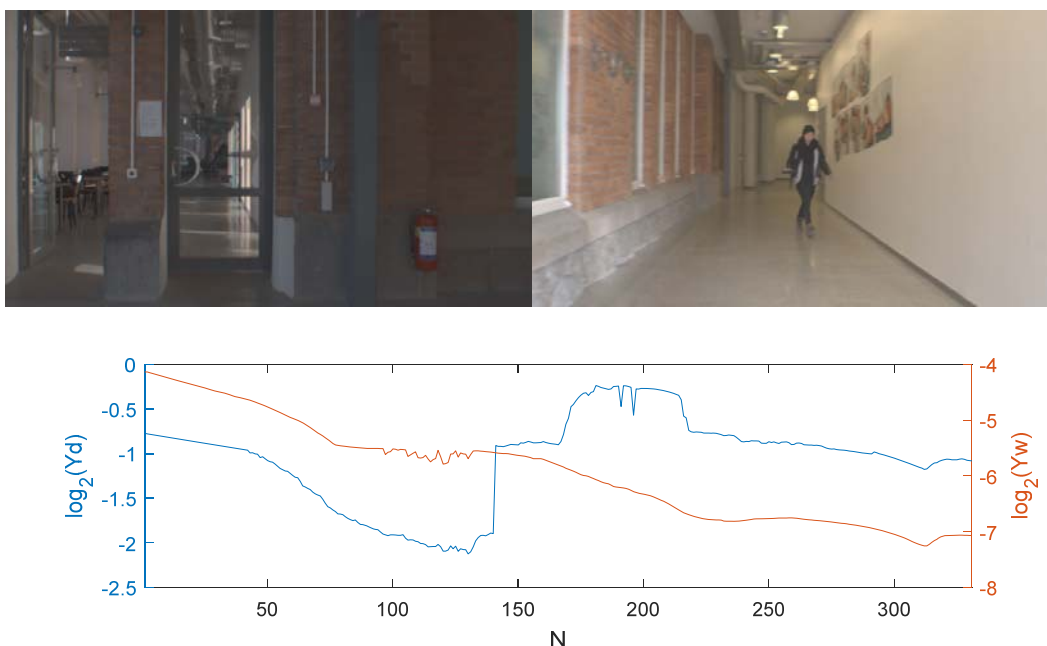
Operatori koji su korišćeni u procesu poređenja su:

- 1) **Virtual exposure TM** [46] – lokalni operator koji se bazira na dekompoziciji korišćenjem bilateralnog filtra. Temporalna konzistentnost se postiže filtriranjem susednih frejmova video sekvence, upotrebom bilateralnog filtra.
- 2) **Time-dependent TM** [97] – globalni operator koji se bazira na modelu ljudskog vizuelnog sistema. Temporalna konzistentnost se postiže temporalnim filtriranjem globalnog stepena adaptacije, korišćenjem eksponencijalnog filtra.
- 3) **Cone model TM** [99] – globalni operator koji se bazira na biološkim ispitivanjima funkcionisanja čepića kod primata. Temporalna konzistentnost se postiže temporalnim filtriranjem globalnog stepena adaptacije, korišćenjem eksponencijalnog filtra.
- 4) **Retina model TM** [101] – lokalni operator koji modeluje procesiranje koje se odvija u različitim slojevima mrežnjače. Lokalna adaptacije i temporalna konzistentnost se postižu primenom prostorno temporalnih filtara na vrednosti odziva fotoreceptora, koje se modeluju sigmoidnom funkcijom,
- 5) **Local adaptation TM** [98] – lokalni operator koji se takođe bazira na modelu ljudskog vizuelnog sistema. Bazira se na segmentaciji slike na regione slične osvetljenosti, korišćenjem bilateralnog filtra, kako bi se odredili lokalni stepeni adaptacije. Temporalna konzistentnost se postiže temporalnim filtriranjem ovih lokalnih vrednosti stepena adaptacije.
- 6) **Color apperance TM** [100] – lokalni operator kalibrisan tako da se subjektivni utisak prilikom reprodukcije na odgovarajućem displeju što više približi posmatranju realne scene. Temporalna konzistentnost se postiže vremenskim filtriranjem parametara adaptacije.
- 7) **Display adaptive TM (DA-TM)** [27] – globalni operator projektovan tako da se što više smanje perceptualne distorzije kontrasta, koje nastaju u procesu redukcije dinamičkog opsega HDR slike. Temporalna konzistentnost se postiže

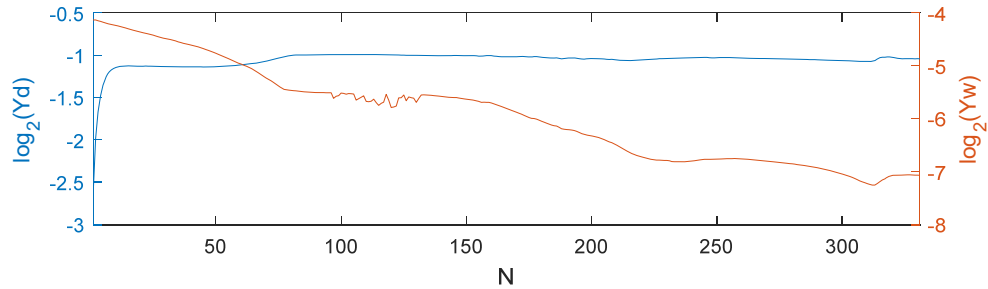
vremenskim filtriranjem čvornih tačaka koje definišu funkciju mapiranja.

- 8) **Temporal coherency TM (TC-TM)** [93] – koristi se lokalna verzija Reinhard-ovog operatora [25]. Temporalna konzistentnost se postiže vremenskim filtriranjem parametara adaptacije. Temporalna koherentnost se nameće postprocesiranjem, koje podrazumeva skaliranje frejmova izlazne video sekvence.

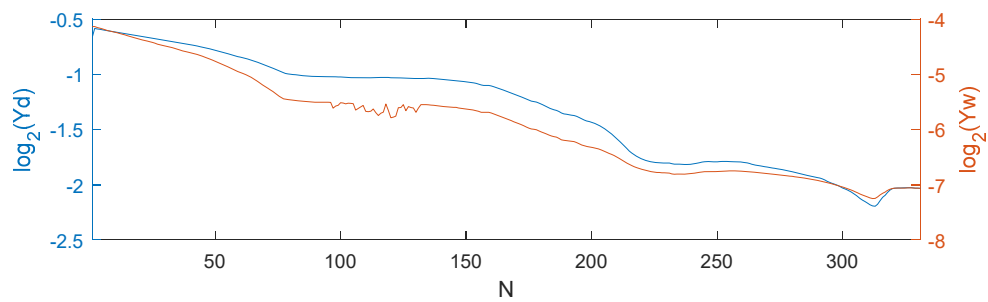
Video sekvence koje predstavljaju rezultate primene postojećih algoritama na video sekvencu *Hallway* su preuzeti sa [107]. Na slikama Slika 4.9 do Slika 4.18 su prikazani karakteristični frejmovi i promene vrednosti osvetljaja tokom vremena, za svaki operator korišćen u poređenju. Za ELTM su prikazana dva rezultata i to jedan u slučaju potpune adaptacije, koja se dobija za $\psi_a = 1$ (Slika 4.17) i drugi za slučaj parcijalne adaptacije za $\psi_a = 0.3$ (Slika 4.18), pri čemu se u drugom slučaju zadržava temporalna koherentnost video sekvence.



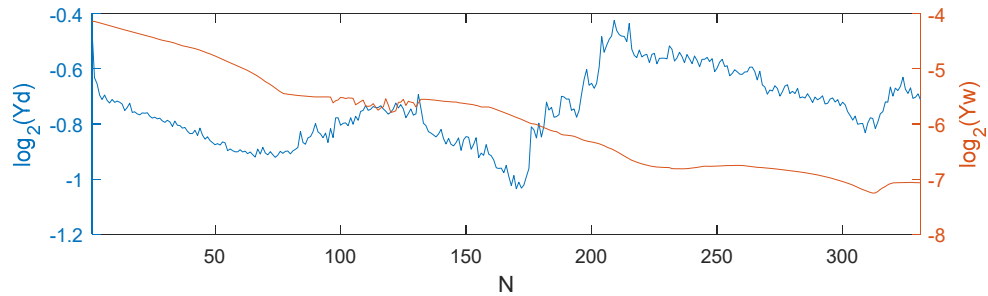
Slika 4.9 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Virtual exposure TM [46].



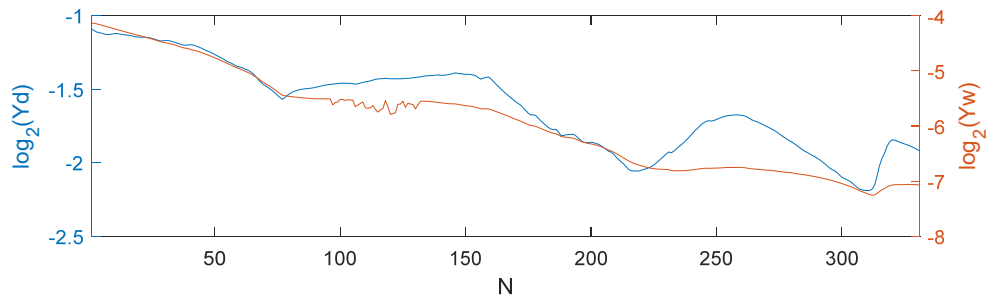
Slika 4.10 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Time-dependent TM [97].



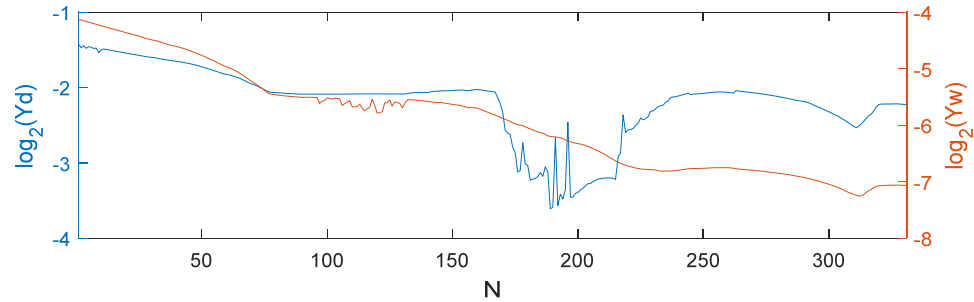
Slika 4.11 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Cone model TM [99].



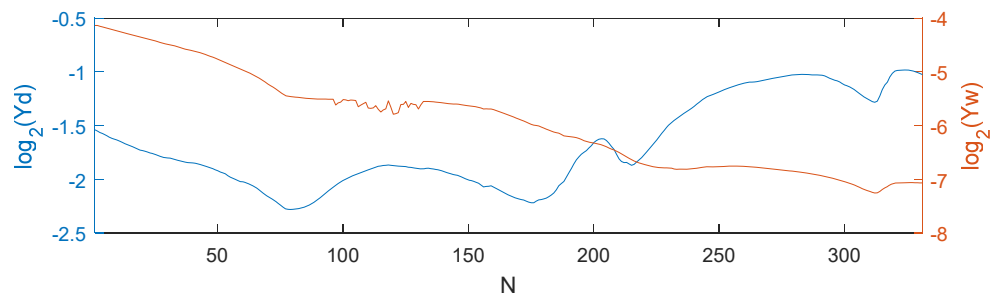
Slika 4.12 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Retina model TM [101].



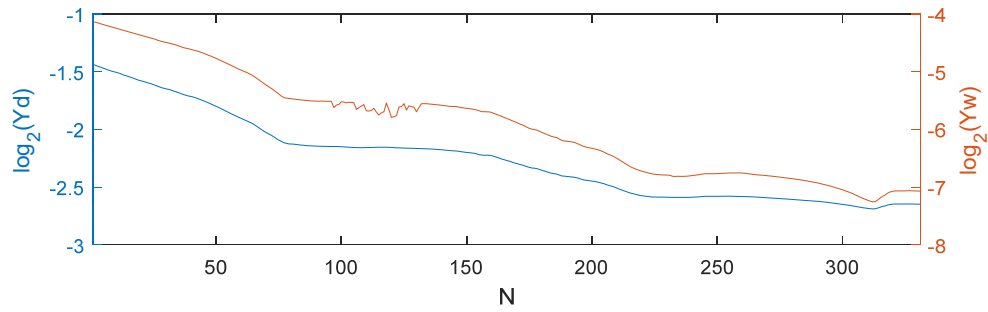
Slika 4.13 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Local adaptation TM [98].



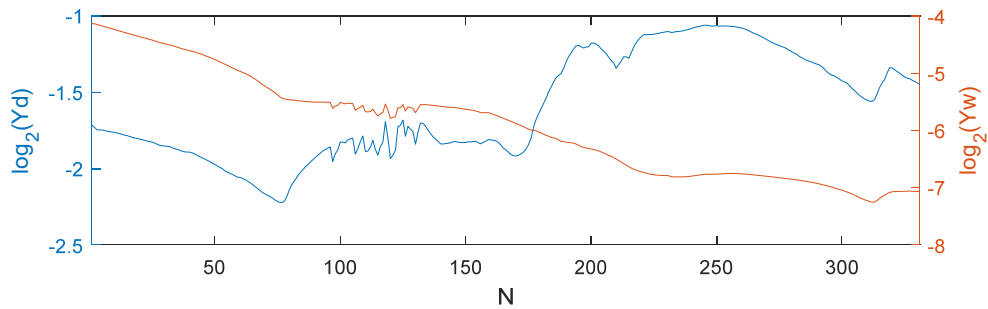
Slika 4.14 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator Color appearance TM [100].



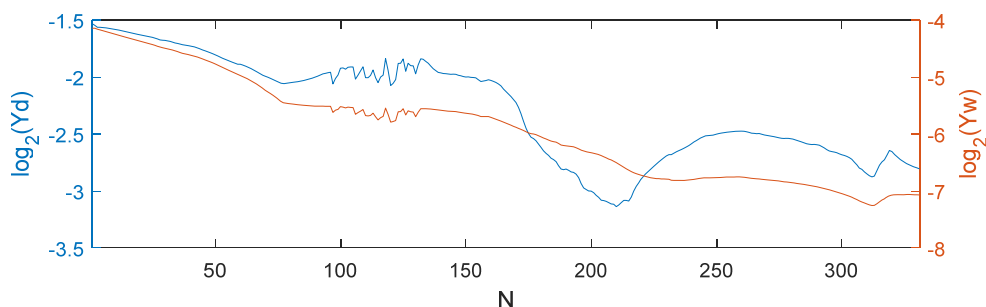
Slika 4.15 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator DA-TM [27].



Slika 4.16 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator TC-TM [93].



Slika 4.17 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator ELTM za slučaj potpune adaptacije $\psi_a=1$.

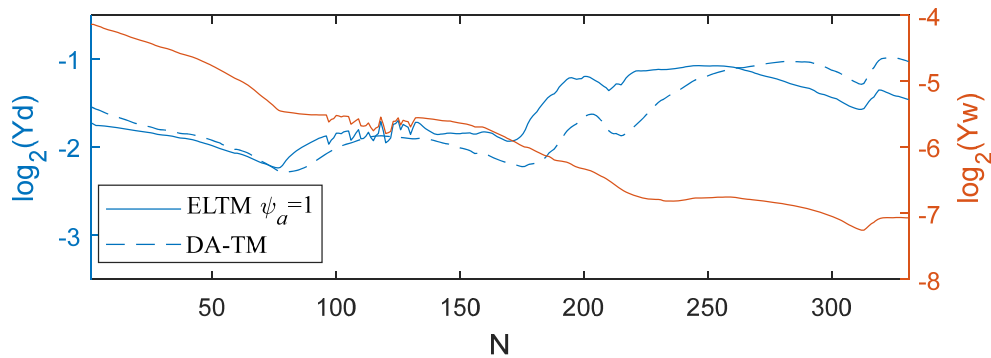


Slika 4.18 Karakteristični frejmovi i prosečni osvetljaj LDR videa, *Hallway* sekvence, za operator ELTM za slučaj parcijalne adaptacije $\psi_a=0.3$.

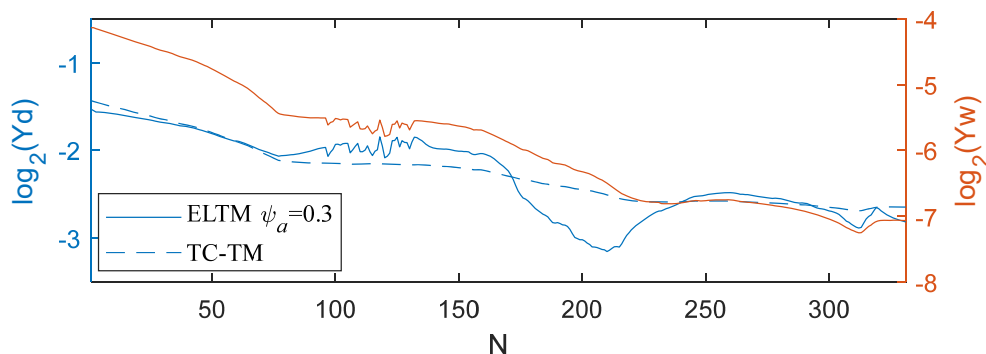
Na osnovu prikazanih rezultata može se primetiti da Virtual exposure TM (Slika 4.9), Retina model TM (Slika 4.12) i Color apperance TM (Slika 4.14), imaju značajan problem sa brzim varijacijama osvetljaja susednih frejmova izlaznog videa, što se u video sekvenci manifestuje kao problem treperenja. Local adaptation TM (Slika 4.13) nema problem sa globalnim treperenjem izlaznog videa ali zato ima jako izražene lokalne artefakte u vidu „duhova“, koji se jasno vide na prikazanim karakterističnim frejmovima, a posledica su filtriranja lokalnih nivoa adaptacije. Cone model TM (Slika 4.11) generiše temporalno koherentan izlazni video, bez problem sa treperenjem slike, međutim zasićenost boja na izlazu je previše izražena, što daje neprirodan izgled sceni. S druge strane, Time-dependent TM (Slika 4.10) proizvodi rezultat koji ima jako malu zasićenost boja, zbog čega izlazni video izgleda „isprano“. Takođe, može se primetiti da je temporalni kontrast kod ovog operatora skoro nula. Rezultat generisan korišćenjem DA-TM (Slika 4.15) postiže veoma dobar prostorni kontrast i nema problema sa globalnim i lokalnim temporalnim artefaktima. Izlazni video nije temporalno koherentan, što se jasno vidi iz vremenske promene osvetljaja, pri čemu dolazi do inverzije temporalnog kontrasta. S druge strane, TC-TM (Slika 4.16) postiže temporalnu

koherentnost ali po cenu prostornog kontrasta.

Kako su DA-TM i TC-TM, u studijama koje se bave evaluacijom operatora za reprodukciju HDR videa, označeni kao dva najbolja operatora, u nastavku je izdvojeno poređenje ova dva operatora sa ELTM-om. DA-TM predstavlja klasu temporalno adaptivnih operatora, čiji je prioritet postizanje što boljeg prostornog kontrasta, dok TC-TM predstavlja klasu temporalno koherentnih operatora, čiji je prioritet očuvanje temporalnog kontrasta. Na slikama Slika 4.19 i Slika 4.20 su prikazana poređenja temporalnih karakteristika ELTM-a sa ova dva referentna algoritma. Interesantno je primetiti da, iako su ova dva algoritma projektovana sa potpuno drugim ciljevima, DA-TM sa ciljem maksimalne adaptacije a TC-TM sa ciljem očuvanja temporalne koherentnosti, fleksibilna kontrola ELTM-a omogućava da se, menjanjem stepena adaptacije ψ_a , postigne sličan efekat izlazne video sekvence kao DA-TM ili TC-TM. Na ovaj način se demonstrira fleksibilnost projektovane kontrole, a samim tim i ELTM operatora.



Slika 4.19 Prosečna vrednost osvetljaja izlaznih frejmova dobijenih mapiranjem *Hallway* HDR scene (narandžasto) pomoću DA-TM operatora i ELTM operatora za slučaj potpune adaptacije $\psi_a=1$.



Slika 4.20 Prosečna vrednost osvetljaja izlaznih frejmova dobijenih mapiranjem *Hallway* HDR scene (narandžasto) pomoću TC-TM operatora i ELTM operatora za slučaj parcijalne adaptacije $\psi_a=0.3$.

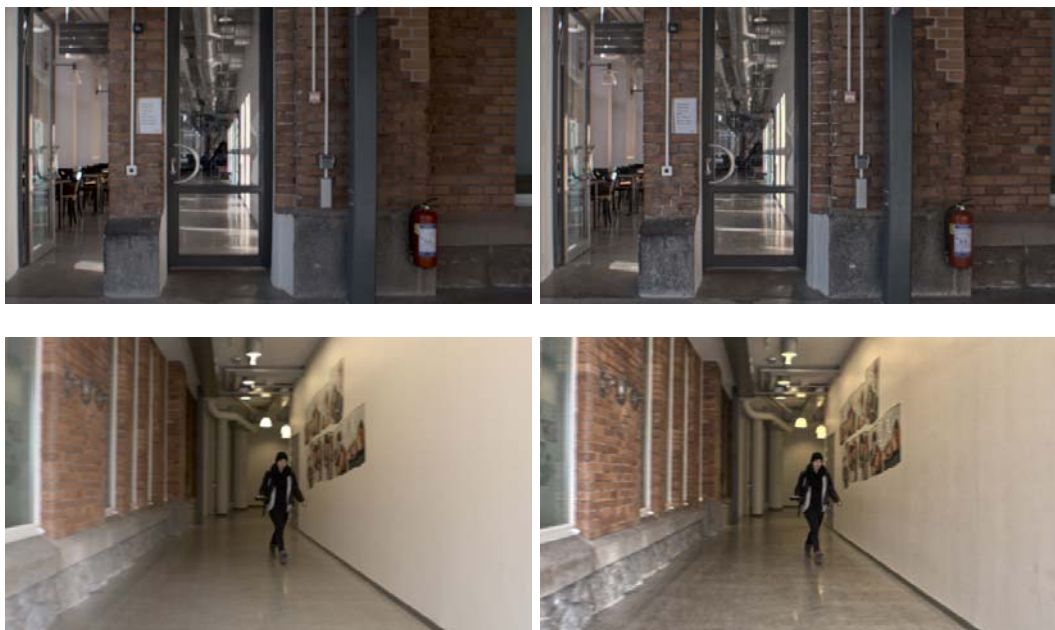
Na slici Slika 4.20 može se uočiti smanjenje srednjeg osvetljaja oko 200-tog frejma koji predstavlja prelazak iz svetlog regiona u tamniji region hodnika. Ovo smanjenje srednjeg osvetljaja narušava temporalnu koherentnost i javlja se kao posledica vremenske adaptacije parametra $BP_{\min}$. Naime, prilikom prelaska iz svetlog u tamni region video sekvence, vrednost $BP_{\min}$ je u početku znatno veća od prave minimalne vrednost baznog sloja. To znači da će svi pikseli baznog sloja, čija je vrednost manja od $BP_{\min}$, a što je prilikom ovog prelaza znatno veći broj od 0.01%, biti zasićeni na $BP_{\min}$. Iz ovog razloga dolazi do agresivnijeg odsecanja detalja u tamnim delovima scene. Vremenom, kako se uspostavlja odgovarajuća vrednost $BP_{\min}$, ovi detalji postaju vidljivi i restaurira se osvetljaj. Uvođenje temporalnog filtra osetljivog na ivice bi rešilo ovaj problem, međutim u ovom radu je odlučeno da se zadrži obično IIR filtriranje iz više razloga. Prvi razlog je jednostavnost osnovnog rešenja, a drugi je taj što ovaj proces adaptacije podseća na realan proces adaptacije ljudskog vizuelnog sistema pri prelasku sa svetlog u taman deo neke scene.

Na slikama Slika 4.21 - Slika 4.25 prikazano je poređenje različitih algoritama sa ELTM-om na osnovu karakterističnih frejmova iz dve video sekvence *Hallway* i *Exhibition area* [107]. Cilj je da se uporede prostorni kontrast i temporalna koherentnost ELTM-a sa trenutno najboljim postojećim rešenjima.

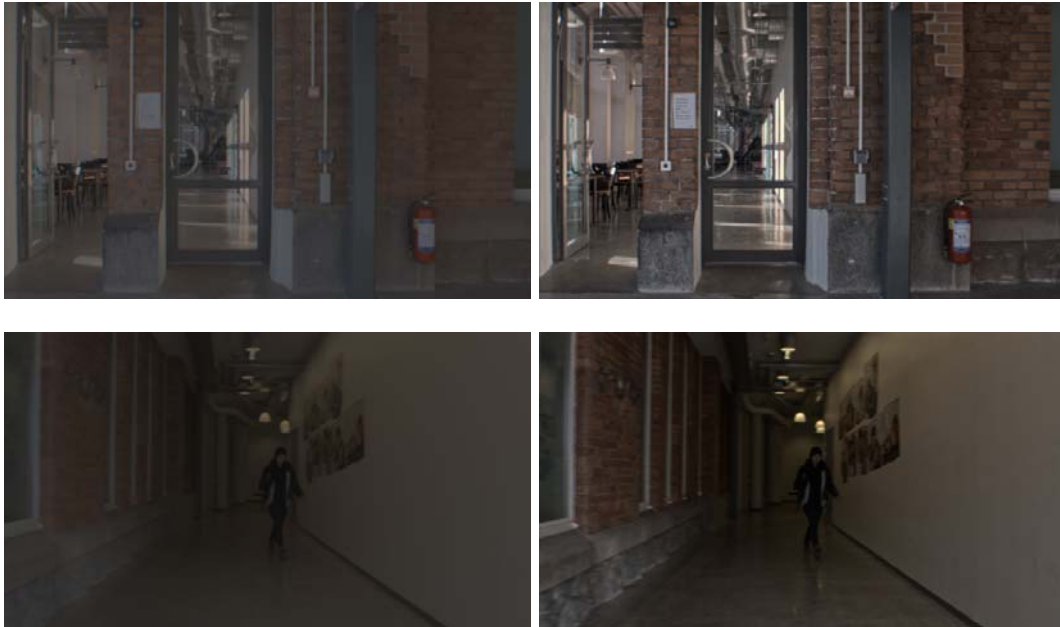
Po pitanju prostornog kontrasta, DA-TM [27] daje najbolje rezultate, što se može primetiti i u slikama Slika 4.21 i Slika 4.24. Međutim, ovaj operator dovodi do inverzije temporalnog kontrasta, što se jasno vidi u činjenici da su frejmovi koji odgovaraju

unutrašnjim prostorijama svetliji od frejmova koji odgovaraju spoljašnosti. ELTM, u slučaju potpune adaptacije $\psi_a = 1$, proizvodi rezultate koji su po globalnom kontrastu isti kao kod DA-TM operatora. Lokalni kontrast i reprodukcija detalja je ipak bolja kod ELTM algoritma, što je posledica lokalnog procesiranja, odnosno dekompozicije na bazni sloj i sloj detalja, dok je DA-TM globalni operator.

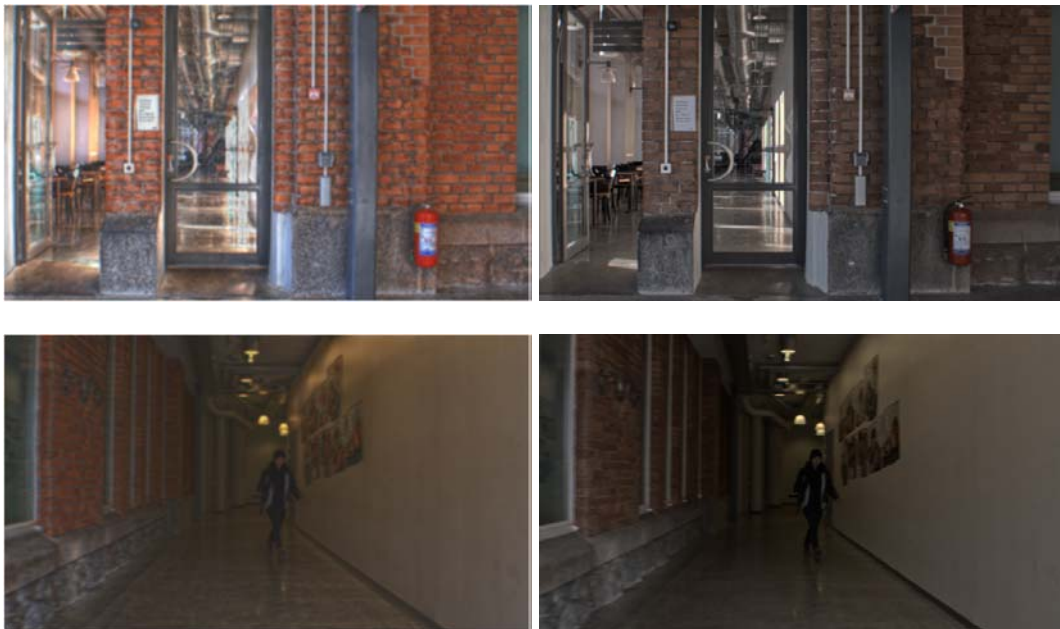
Poređenje sa temporalno koherentnim algoritmima TC-TM [93] i MPF-TM [102] prikazano je na slikama Slika 4.22, Slika 4.23 i Slika 4.25, pri čemu je za MPF-TM bio dostupan samo rezultat za *Hallway* sekvencu. ELTM je u ovim poređenjima podešen sa parcijalnom adaptacijom $\psi_a = 0.3$, tako da se postiže temporalna koherentnost. Može se uočiti da u svim navedenim primerima ELTM održava poredak osvetljaja, odnosno postiže temporalnu koherentnost, uz znatno bolji prostorni kontrast od navedenih koherentnih operatora.



Slika 4.21 Karakteristični frejmovi *Hallway* sekvence za DA-TM (levo) i ELTM za $\psi_a=1$ (desno).



Slika 4.22 Karakteristični frejmovi *Hallway* sekvence za TC-TM (levo) i ELTM za $\psi_a=0.3$ (desno).



Slika 4.23 Karakteristični frejmovi *Hallway* sekvence za MPF-TM (levo) i ELTM za $\psi_a=0.3$ (desno).



Slika 4.24 Karakteristični frejmovi *Exhibition area* sekvence za DA-TM (levo) i ELTM za $\psi_a=1$ (desno).



Slika 4.25 Karakteristični frejmovi *Exhibition area* sekvence za TC-TM (levo) i ELTM za $\psi_a=0.3$ (desno).

Na slici Slika 4.26 su prikazani karakteristični frejmovi iz HDR video sekvenci *Cars fullshot*, *Poker fullshot*, *Showgirl* i *Smith hammering* [108], koji su korišćeni za evaluaciju različitih operatora za reprodukciju HDR videa u najnovijoj Eilertsen-ovoj

[20] studiji. Prikazani frejmovi su dobijeni redukcijom dinamičkog opsega korišćenjem ELTM operatora. Može se primetiti da ELTM dobro čuva detalje i u svetlim i u tamnim regionima scene, bez značajnog pojačanja šuma. Osnovna prednost ELTM operatora je, pored robusnosti, fleksibilnost u podešavanju izgleda izlazne slike, kao i fleksibilnost u temporalnoj kontroli algoritma koja omogućava biranje željenog odnosa između prostornog i temporalnog kontrasta.



Slika 4.26 Karakteristični frejmovi iz različitih video sekvenci predstavljenih u [108] i korišćenih u [20]. Prikazani su rezultati nakon procesiranja ELTM operatorom.

5 ANALIZA UBRZANJA I HARDVERSKA REALIZACIJA VOĐENOG FILTRA VELIKIH DIMENZIJA

Posmatrajući arhitekturu ELTM operatora, može se zaključiti da je najveća kompleksnost sadržana u koraku dekompozicije, na bazni sloj i slojeve detalja, koji je ključan za očuvanje detalja i lokalnog kontrasta u procesu redukcije dinamičkog opsega. Ovaj korak se bazira na korišćenju filtara osetljivih na ivice, kako bi se izbegla pojava halo artefakata na granicama oblasti različitih osvetljenosti. Za izdvajanje informacije o lokalnom kontrastu, odnosno krupnim detaljima na slici, potrebno je koristiti filter čije dimenzije zavise od dimenzije slike koja se mapira. Dakle, u slučaju slika visoke rezolucije, potrebno je koristiti filtre velikih dimenzija. Zbog toga je za efikasnu realizaciju ELTM algoritma, ključno obezbediti mogućnost efikasnog izračunavanja velikih filtara osetljivih na ivice.

Značaj filtara osetljivih na ivice, uveliko nadilazi problem redukcije dinamičkog opsega slike. Naime, u poslednjih 30 godina, ovi filteri su postali jedan od osnovnih alata u obradi slike, pri čemu su našli primenu u širokom spektru aplikacija kompjuterske vizije poput uklanjanja šuma, fuzije različitih slika, združenog filtriranja, procesiranja

stereoskopskih slika, segmentacije i sl. Od filtara osjetljivih na ivice predstavljenih u glavi 2.2.1.1 najviše popularnosti je stekao bilateralni filtar, uglavnom zahvaljujući jednostavnoj i neiterativnoj formulaciji. Međutim, i pored jednostavne formulacije, kompleksnost bilateralnog filtra je veoma velika, s obzirom da nije moguće primeniti klasične metode optimizacije linearnih filtara. Velika popularnost i široka primena bilateralnog filtra, motivisala je mnoge istraživače da se bave problemom efikasne implementacije. Vremenom se pojavio čitav niz rešenja, koja u većini slučajeva predstavljaju kompromis između preciznosti i računske kompleksnosti. Vođeni filtar se pojavio kao rezultat ove prirodna težnja ka što efikasnijoj realizaciji filtara osjetljivih na ivice. Ovaj filtar, za razliku od bilateralnog, omogućava dosta efikasnu realizaciju bez ikakvog smanjenja preciznosti.

Poslednjih godina javlja se sve veća potreba za efikasnim hardverskim realizacijama filtara osjetljivih na ivice. Naime, koncept „internet stvari“ (IoT – *Internet of Things*) podrazumeva povezivanje najrazličitijih „pametnih“ namenskih uređaja u jedinstven komunikacioni sistem. Veliki broj uređaja ima ogromne zahteve za protokom informacija, pogotovo u slučaju uređaja mašinske i kompjuterske vizije, gde su informacije koje se šalju zapravo video signali. Zbog toga je, radi smanjenja protoka, ključno omogućiti što više lokalnog procesiranja na samim namenskim uređajima. Kako su filtri osjetljivi na ivice jedna od osnovnih komponenti velikog broja algoritama mašinske i kompjuterske vizije, postaje jako važno obezbediti efikasnu realizaciju ovih filtara i to ne samo u pogledu broja operacija po pikselu, već i u pogledu zauzeća hardverskih resursa, memorije i potrošnje energije. Interesovanje za ovu oblast je prilično novo i rešenja koja nude efikasne hardverske realizacije filtara osjetljivih na ivice su počele da se pojavljuju tek u prethodnih nekoliko godina.

Ovo je predstavljalo motiv, da se razmotre mogućnosti efikasne realizacije filtra osjetljivog na ivice. Analizirane su performanse i kvalitet aproksimacije brzog vođenog filtra i predloženo je unapređenje ovog algoritma. Zatim je predstavljena hardverska realizacija unapređenog brzog vođenog filtra, pri čemu je poseban akcenat stavljen na smanjenje potrošnje.

U nastavku ove glave najpre je u odeljku 5.1 analizirana kompleksnost i opisani su pristupi optimizaciji bilateralnog i vođenog filtra. Nakon toga su u odeljcima 5.2 i 5.3

predstavljani koraci osnovne i optimizovane verzije vođenog filtra, dok je u odeljku 5.4 analiziran kvalitet ove aproksimacije. Hardverska arhitektura unapređenog brzog vođenog filtra je prikazana u odeljku 5.5. Analiza performansi i zauzeća resursa predstavljene arhitekture data je u odeljku 5.6, dok su poređenja sa postojećim rešenjima predstavljena u odeljku 5.7.

5.1 Efikasne realizacije filtara osetljivih na ivice

Najpopularniji algoritam u klasi filtara osetljivih na ivice je bilateralni filter i u nastavku će biti predstavljene mogućnosti njegove efikasne realizacije. Bilateralni filter je definisan izrazom (2.2.10) u glavi 2.2.1.1 i ovde je ponovljen taj izraz, s obzirom na to da se nastavak diskusije uglavnom bazira na njemu:

$$J(\mathbf{p}) = \frac{1}{k(\mathbf{p})} \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{q})\|) \cdot I(\mathbf{q}) \quad (3.1.25)$$

$$k(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{q})\|)$$

Kompleksnost bilateralnog filtra definisanog prethodnim izrazom je $O(N \cdot R^2)$, gde N predstavlja broj piksela slike koja se filtrira, a R veličinu lokalnog susedstva. Vidi se da ova kompleksnost raste kvadratno sa povećanjem veličine filtra, što čini implementaciju filtara velikih dimenzija veoma zahtevnom. Problem koji se javlja kod bilateralnog filtra je taj, što je uvođenje težinskog faktora po intenzitetima w_r dovelo do toga da filter više nije linearan i prostorno invarijantan, tako da nije moguće primeniti metode koje se inače koriste za ubrzanje linearnih filtara. Naime, naivna implementacija linearnog filtra takođe podrazumeva kompleksnost $O(N \cdot R^2)$. Međutim, ukoliko je filter separabilan, operacija filtriranja se može obaviti prvo po redovima a zatim po kolonama, ili obrnuto, čime se kompleksnost smanjuje na $O(N \cdot R)$ i umesto kvadratno, linearno zavisi od veličine filtra. Takođe, ukoliko je filter linearan, može se iskoristiti osobina da je konvolucija u prostornom domenu zapravo jednaka množenju u frekvencijskom domenu. Time se postupak filtriranja svodi na prelazak u frekvencijski domen, množenje svakog piksela odgovarajućim koeficijentom, koji odgovara spektralnoj komponenti filtra na toj lokaciji i vraćanje u prostorni domen. Prelazak u frekvencijski domen se može obaviti dosta efikasno, korišćenjem brze Furijeove transformacije FFT,

čija je kompleksnost $O(N \cdot \log N)$. Za filtre malih dimenzija i dalje je najefikasnije direktno raditi u prostornom domenu, međutim kako veličina filtra raste efikasnost korišćenja FFT daleko nadilazi efikasnost osnovne realizacije, s obzirom da efikasnost ovog postupka ne zavisi od veličine filtra. Na žalost, bilateralni filter nije ni separabilan ni linearan, tako da nijednu od ovih optimizacija nije moguće primeniti.

Posmatranjem izraza (3.1.25) može se primetiti da je bilateralni filter „za malo“ linearan, odnosno da jedini problem pravi faktor težina intenziteta w_r , koji se menja u zavisnosti od vrednosti piksela koji se procesira. Polazeći od ovog zapažanja, Durand i Dorsey [74] primećuju da se bilateralni filter zapravo može razbiti na niz linearnih filtera definisanih kao:

$$\begin{aligned} J^i(\mathbf{p}) &= \frac{1}{k^i(\mathbf{p})} \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|i - I(\mathbf{q})\|) \cdot I(\mathbf{q}) \\ k^i(\mathbf{p}) &= \sum_{\mathbf{q} \in \Omega} w_s(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) \cdot w_r(\|i - I(\mathbf{q})\|) \end{aligned} \quad (3.1.26)$$

gde i uzima sve moguće vrednosti intenziteta piksela. Vrednost izlaznog piksela $J(\mathbf{p})$ se uzima iz onog izlaznog rezultata filtriranja, koje odgovara intenzitetu tog piksela u ulaznoj slici, odnosno iz $J^{I(\mathbf{p})}(\mathbf{p})$. Filter (3.1.26) predstavlja linearan filter i može se efikasno izračunati primenom ranije navedenih optimizacionih metoda. Problem je što je sada potrebno ovaj postupak filtriranja primeniti veliki broj puta, koji je jednak broju mogućih različitih intenziteta piksela. Ovaj broj raste eksponencijalno sa bitskom širinom piksela. Zbog toga, Durand i Dorsey predlažu da se celokupan opseg vrednosti piksela podeli na određeni broj segmenata i da se opisani postupak primeni samo na granice segmenata. Finalna vrednost izlaznog piksela se u ovom slučaju dobija interpolacijom rezultata, koji su dobijeni za granice segmenta, kojem pripada trenutni ulazni piksel. U svrhu dodatnog ubrzanja, Durand i Dorsey predlažu da se operacije filtriranja obavljaju nad decimiranim slikama, pri čemu pokazuju da ovakav postupak ima mali uticaj na kvalitet rezultata. Naime, kako težinske funkcije, definisane u okviru izraza (3.1.26), predstavljaju niskofrekventne filtre, operacije filtriranja se slobodno mogu obaviti u decimiranom domenu, odnosno sa smanjenom učestanošću odabiranja. Na ovaj način se značajno dobija na efikasnosti, s obzirom da se procesira značajno manji broj piksela. Što je filter koji se realizuje u prostornom domenu veći, to je

njegova granična učestanost niža, tako da se može primeniti veći stepen decimacije. Ovo dovodi do paradoksalne osobine ovih filtara, a to je da realizacija postaje efikasnija sa povećanjem širine lokalnog susedstva. To znači da su realizacije koje uključuju decimaciju, idealne za realizaciju filtara velikih dimenzija. Opisani postupak segmentacije i decimacije bilateralnog filtra su detaljnije matematički razradili Paris i Durand [109], dok je Yang [110] unapredio postupak finalne interpolacije, tako da se bolje sačuva informacija o tankim ivicama.

Drugi pravac optimizacije bilateralnog filtra, išao je u smeru pojednostavljenja težinskih funkcija w_s i w_r , tako da se koriste forme koje se mogu efikasnije računati. Ukoliko se, na primer, umesto Gausove koristi boks funkcija, onda se bilateralni filter može pomoću lokalnih histograma opisati kao:

$$\begin{aligned} J(\mathbf{p}) &= \frac{1}{k(\mathbf{p})} \sum_i i \cdot h_{\Omega}(i) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - i\|) \\ k(\mathbf{p}) &= \sum_i h_{\Omega}(i) \cdot w_r(\|I(\mathbf{p}) - i\|) \end{aligned} \quad (3.1.27)$$

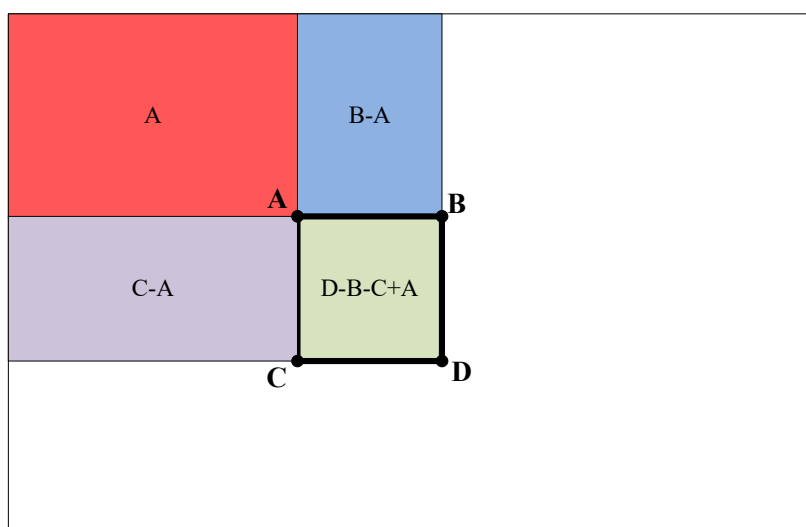
gde h_{Ω} predstavlja histogram lokalnog susedstva Ω , a i predstavljaju sve moguće intenzitete piksela. Postupak definisan izrazom (3.1.27) ne zavisi od veličine lokalnog susedstva, već samo od preciznosti piksela. Na primer, za ulazne vrednosti od 8-bita gornja suma ima uvek 256 elemenata, bez obzira na veličinu filtra. Jedino ograničenje koje je postavljeno je, da prostorna težinska funkcija w_s bude boks funkcija, dok je za težinsku funkciju intenziteta w_r moguće koristiti funkciju proizvoljnog oblika. Kako bi se ubrzao opisani postupak, potrebno je pronaći što efikasniji način određivanja lokalnih histograma slike. Weiss [111] je predložio metod koji postiže kompleksnost $O(N \cdot \log R)$, koristeći velika preklapanja susednih regiona i primenom pogodnog načina procesiranja, kako bi se ova preklapanja što efikasnije iskoristila i količina redundantnog procesiranja svela na minimum.

Još efikasnija realizacija može se dobiti korišćenjem integralnih slika i histograma slike. Integralne slike su prvi uveli Viola i Jones [112], u cilju efikasne realizacije njihovog algoritma za detekciju lica, koji se zasniva na određivanju sume piksela u okviru različitih pravougaonih regiona slike. Integralna slika zapravo predstavlja matricu istih dimenzija kao i ulazna slika, pri čemu se vrednost svakog elementa ove matrice

određuje kao:

$$G(x, y) = \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y I(i, j) \quad (3.1.28)$$

gde G predstavlja integralnu sliku a I ulaznu sliku. Integralne slike zapravo predstavljaju 2D ekvivalent kumulativne sume. Suma elemenata bilo kog pravougaonog regiona ulazne slike, može se odrediti čitanjem svega 4 elementa integralne slike i obavljanjem 2 oduzimanja i jednog sabiranja, nezavisno od veličine regiona. Ovaj postupak je prikazan na slici Slika 5.1.

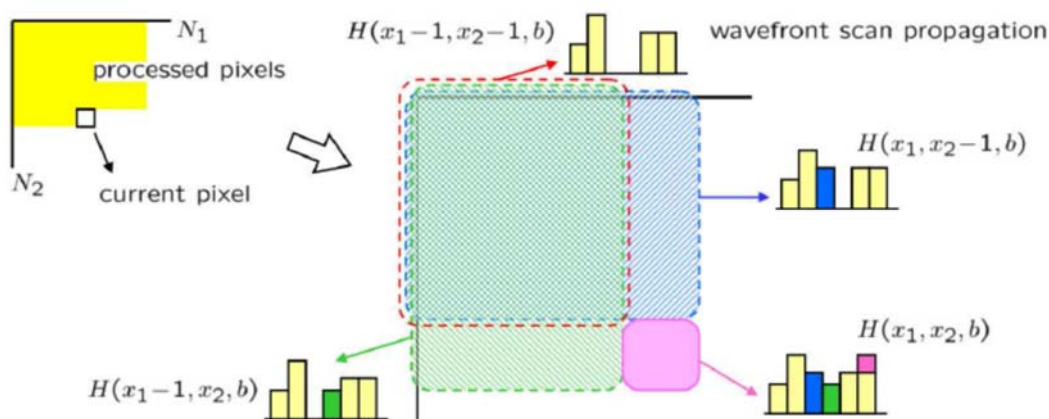


Slika 5.1 Određivanje sume piksela unutar pravougaonog regiona korišćenjem integralne slike.

Integralne slike pružaju veoma moćan alat za realizaciju boks filtera, koji imaju sve prostorne koeficijente jednake. Korišćenjem integralne slike efikasnost boks filtra postaje $O(N)$, odnosno više uopšte ne zavisi od veličine samog filtra. Interesantno je primetiti da se uzastopnom primenom boks filtra mogu realizovati funkcije, koje imaju blaže prelaze ka krajevima prozora. Na primer, dvostruka primena boks filtra predstavlja zapravo trougaoni filter, dok beskonačna primena boks filtra na osnovu centralne granične teoreme teži Gausovom filtru.

Jedina informacija koja se može saznati o nekom pravougaonom regionu slike, korišćenjem integralnih slika, je zbir vrednosti svih piksela koji se nalaze unutar tog regiona. Međutim, raspodela vrednosti piksela unutar regiona je izgubljena. Kako bi

omogućio efikasno izračunavanje lokalnih histograma, proizvoljnih pravougaonih regiona slike, Porikli [113] je predložio korišćenje integralnih histograma. Ideja je identična kao kod integralnih suma, s tim što se sada umesto proste sume za svaku poziciju ulazne slike čuva integralni histogram. Postupak izračunavanja integralnih histograma je prikazan na slici Slika 5.2.



Slika 5.2 Određivanje histograma lokalnih regiona slike korišćenjem integralnih histograma [113].

Porikli [114] je iskoristio postupak integralnih histograma, kako bi definisao bilateralni filter kompleksnosti $O(N)$ koji je opisan izrazom (3.1.27). On takođe predstavlja metod za efikasno izračunavanje proizvoljnih polinomijalnih prostornih filtara. Za izračunavanje prostornog filtra proizvoljnog oblika, Porikli predlaže korišćenje polinomijalnog razvoja funkcije željenog filtra.

Yang [115] polazi od postupka koji su predložili Durand i Dorsey [74], a koji se sastoji od rastavljanja bilateralnog filtra na skup linearnih filtara, od koji je svaki filter definisan za jednu vrednost intenziteta piksela (odnosno podskup vrednosti, ako se koristi interpolacija na izlazu). On pokazuje, da primenom ovog postupka kompleksnost izračunavanja bilateralnog filtra se svodi na kompleksnosti linearnog filtra. U slučaju Gausove funkcije, koju su koristili Durand i Dorsey, ova kompleksnost je $O(N \cdot \log N)$, dok u slučaju boks filtra, uz primenu integralnih suma, ova kompleksnost pada na $O(N)$. Generalni problem kod pristupa koji koriste integralne sume, je velika zahtevnost za memorijskim resursima kako bi se skladištili svi

međurezultati. Zbog toga Igarashi [116] predlaže postupak izračunavanja integralnih suma i finalnog rezultata, kojim se efikasnije koristi memorija.

Svi prethodno opisani postupci ubrzanja bilateralnog filtra se zasnivaju na ograničenom broju različitih intenziteta piksela, što može predstavljati problem prilikom primene na HDR slike. Naime, broj linearnih filtara koje koriste Durand i Dorsey, direktno zavisi od opsega intenziteta ulaznih piksela i preciznosti koju je potrebno postići. Veličine lokalnih histograma, u rešenjima koja se baziraju na njima, takođe direktno zavise od opsega i preciznosti ulaznih podataka.

Za razliku od bilateralnog filtra, koji se mora „linearizovati“ navedenim kvantizacijama intenziteta, vođeni filtar koji je definisao He [40] se u svojoj originalnoj formulaciji bazira na izračunavanju svega 4 boks filtra. Kao što je pokazano ranije u ovom odeljku, boks filtri se mogu efikasno izračunati korišćenjem integralnih suma uz kompleksnost $O(N)$, koja ne zavisi od veličine filtra. S obzirom da su boks filtri zapravo niskofrekventni filtri, u tehničkoj noti [117] He i Sun primećuju da se kompleksnost vođenog filtra može drastično smanjiti računanjem u decimiranom domenu. Naime, ukoliko se dimenzije filtra predstave kao $R = K \cdot S$, onda se određivanje koeficijenata a i b linearne funkcije definisane izrazom (2.2.16), može obaviti primenom filtara veličine K , na sliku koja je decimirana S puta po obe dimenzije. Na ovaj način kompleksnost vođenog filtra pada sa $O(N)$ na $O\left(\frac{N}{S^2}\right)$. Ovo zapravo znači da se veće

ubrzanje može postići korišćenjem filtara većih dimenzija, s obzirom da se na njih može primeniti veći stepen decimacije S . Iako su pokazali da navedeni postupak proizvodi rezultate koji su vizuelno identični originalnom algoritmu, na primeru nekoliko karakterističnih primena vođenog filtra, He i Sun zapravo nisu kvantifikovali gubitak koji nastaje usled ove aproksimacije. Zbog toga je sprovedena analiza odstupanja rezultata ove optimizacije od originalne formulacije vođenog filtra. U toku ovog ispitivanja zaključeno je da He i Sun, u svom originalnom predlogu, nisu uključili proces filtriranja pre smanjenja dimenzija slike, što može dovesti do problema alijasinga. Dodavanje ovih filtara, koji se zapravo mogu veoma efikasno izračunati, je podiglo PSNR rezultata aproksimacije, u odnosu na originalno rešenje, u proseku za 21dB. Rezultati ovog istraživanja su objavljeni na konferenciji Infotech 2016 [118].

Detaljniji opis ovog postupka biće dat u narednim odeljcima.

Postojeće hardverske realizacije bilateralnog filtra su uglavnom projektovane za potrebe uklanjanja šuma i podrazumevaju filtre relativno malih dimenzija ili ne postižu odgovarajuće protoke potrebne za procesiranje videa u realnom vremenu. Vinh [119] je predstavio FPGA realizaciju bilateralnog filtra dimenzija 3×3 , koja koristi boks funkciju za prostorne i polinimijalnu funkciju za težine intenziteta. Ova realizacija postiže protok od 60fps (*frames per second*) za video 1080p (rezolucije 1920×1080 piksela). Gabiger-Rose [120] je predstavila FPGA realizaciju originalnog bilateralnog filtra, dimenzija 5×5 sa Gausovim težinama. Pored malih dimenzija filtra, ova realizacija postiže relativno skromne protoke od oko 30 Mpix/s, pri čemu za interno procesiranje koristi takt koji je 4 puta veći od takta po kome stižu pikseli. Na ovaj način se povećava potrošnja energije u sistemu. Johnson [121] je takođe predložio hardversku realizaciju bilateralnog filtra dimenzija 5×5 , koja za interno procesiranje koristi 4 puta veći takt. Za razliku od prethodnog rešenja, Johnson nudi fleksibilnu arhitekturu koja se može rekonfigurisati, tako da se stavi akcenat na različite karakteristike sistema kao što su protok, energetska efikasnost, adaptibilnost i sl. Nešto veće filtre, dimenzija 15×15 i 17×17 realizovali su redom Charoensak [122], za potrebe popravke kvaliteta televizijske slike i Yang [123], za potrebe kreiranja stereo slike. Prva realizacija predstavlja pravolinijsku realizaciju bilateralnog filtra i ostvaruje skroman protok od 4.8Mpix/s. Druga realizacija koristi piramidalnu reprezentaciju, kako bi se omogućila realizacija filtara velikih dimenzija, što značajno povećava zahteve za memorijskim resursima. Tseng [124] je predstavio arhitekturu bilateralnog filtra, koja se bazira na integralnim histogramima [114]. Kako bi smanjili zahteve za memorijskim resursima, koji su proporcionalni širini slike, autori su predložili procesiranje slike po vertikalnim trakama manjih dimenzija. Ovakva realizacija bilateralnog filtra je skalabilna, omogućava efikasnu realizaciju velikih filtara i postiže protoke od 124Mpix/s, što je dovoljno za procesiranje 1080p videa brzinom 60fps.

U poslednjih par godina počele su da se pojavljuju i hardverske realizacije vođenog filtra. U cilju smanjenja zahteva za memorijskim resursima i povećanja protoka, ove realizacije uglavnom ili koriste procesiranje po trakama [125], [126] uz upotrebu integralnih histograma ili koriste aproksimacije algoritma vođenog filtra [127]. Procesiranje slike po trakama, zahteva da se ceo frejm nalazi u memoriji pre početka

procesiranja, što otežava integraciju ovog algoritma u sistem sa protočnom obradom [128]. Zbog toga je Ttofis [127] predstavio realizaciju koja omogućava protočnu obradu. Međutim, kako bi izbegao čuvanje velike količine podataka u memoriji, finalno filtriranje koeficijenata vođenog filtra a i b obavlja samo u horizontalnom pravcu. Ovakva aproksimacija može uneti strukturalne artefakte u rezultat filtriranja, čime se znatno ograničava spektar mogućih primena. Najnovije rešenje, koje je početkom godine predstavio Zhang [128], predstavlja VLSI realizaciju originalnog algoritma vođenog filtra, koja ne zahteva procesiranje po linijama i koja se može efikasno integrisati u sistem protočne obrade. Ova realizacija postiže performanse dovoljne za procesiranje u realnom vremenu, odnosno može se iskoristiti za filtriranje 1080p videa brzinom od 60fps. Takođe, značajno unapređuje zauzeće memorijskih resursa i smanjuje zahtev za protokom ka eksternoj memoriji, u odnosu na prethodno najbolju realizaciju vođenog filtra koju je predstavio Kao [125]. Iako su memorijski zahtevi značajno smanjeni i većina procesiranja se odvija protočno, i dalje je postoji potreba za jednim frejm baferom u kojem se čuva slika vodilja (*guidance image*), koja se koristi u određivanju finalnog rezultata filtriranja. Ova komunikacija sa eksternom memorijom značajno podiže ukupnu potrošnju sistema.

Hardverska realizacija vođenog filtra, koja će biti predstavljena u okviru ovog poglavlja, zapravo predstavlja hardversku arhitekturu unapređenog brzog vođenog filtra koji je predstavljen u [118]. Ova realizacija se bazira na procesiranju u decimiranom domenu, čime se omogućava značajno smanjenje memorijskih i hardverskih resursa. Procesiranje u decimiranom domenu omogućava korišćenje takta čija je učestanost S^2 puta niža od takta po kom stižu pikseli. Takođe, predložena arhitektura omogućava protočnu obradu bez zahteva za komunikacijom sa eksternom memorijom. Sve ovo omogućava veoma malu potrošnju sistema, koja iznosi 79.89mW na FPGA čipu Cyclone V kompanije Intel FPGA, za procesiranje 1080p videa brzinom 60fps, korišćenjem filtara dimenzija 35x35 sa faktorom decimacije $S = 7$. Ova potrošnja je značajno manja od postojećih rešenja, kada se posmatra ukupna potrošnja sistema iako je predstavljeni dizajn implementiran na FPGA dok je većina postojećih rešenja zapravo ASIC.

5.2 Opis algoritma vođenog filtra

Radi kompletnosti, u ovom odeljku su ponovljeni ključni izrazi kojim se definiše vođeni filter. Ovaj filter je već predstavljen u glavi 2.2.1.1, za slučaj kada su slika vodilja (*guidance image*) i ulazna slika identične, pri čemu se vođeni filter svodi na klasičan filter osetljiv na ivice. Kako bi se omogućilo što jednostavnije poređenje sa postojećim rešenjima, prilikom opisa su, za sve promenljive, korišćene oznake iz osnovnog rada, u kojem je predstavljen vođeni filter [40].

Osnovni cilj vođenog filtra je, da izlazna slika J , koja se dobija filtriranjem ulazne slike p , ima ivice na istim mestima kao slika vodilja I . Ovo se postiže tako što se lokalni regioni izlazne slike, predstavljaju kao linearna funkcija lokalnih regiona slike vodilje, odnosno važi:

$$J_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (3.1.29)$$

gde su a_k i b_k parametri linearnog modela, koji su konstantni u okviru lokalnog susedstva ω_k , a i predstavlja indeks piksela unutar lokalnog susedstva ω_k . Koeficijenti a_k i b_k se dobijaju minimizacijom odgovarajuće optimizacione funkcije i definisani su izrazima:

$$a_k = \frac{\frac{1}{R^2} \sum_{i \in \omega_k} I_i \cdot p_i - \mu_k \cdot \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (3.1.30)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (3.1.31)$$

gde ε predstavlja regularizacioni parametar, kojim se definiše stepen osetljivost filtra na ivice. Promenljive μ_k i σ_k^2 označavaju srednju vrednost i varijansu unutar lokalnog susedstva ω_k slike vodilje I , a $\bar{p}_k$ predstavlja srednju vrednost unutar lokalnog susedstva ω_k ulazne slike p . Srednje vrednosti i varijanse u okviru lokalnog susedstva ω_k dimenzija $R \times R$ definisane su sa:

$$\mu_k = \frac{1}{R^2} \sum_{i \in \omega_k} I_i \quad (3.1.32)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{R^2} \sum_{i \in \omega_k} I_i^2 - \mu_k^2 \quad (3.1.33)$$

$$\bar{p}_k = \frac{1}{R^2} \sum_{i \in \omega_k} p_i \quad (3.1.34)$$

Kako svaki piksel upada u više različitih lokalnih susedstava istovremeno, od kojih svako ima drugačiju vrednost parametara linearnog modela a_k i b_k , parametri linearnog modela koji se primenjuju za izračunavanje izlazne vrednosti piksela, zapravo predstavljaju srednju vrednost parametara svih lokalnih susedstava koje sadrže zadati piksel. Odnosno važi:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{R^2} \sum_{k \in \omega_i} a_k \quad (3.1.35)$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{R^2} \sum_{k \in \omega_i} b_k \quad (3.1.36)$$

gde ω_i predstavlja lokalno susedstvo dimenzija $R \times R$ oko trenutno procesiranog piksela i .

Izlazna slika se izračunava kao:

$$J_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \forall i \in I \quad (3.1.37)$$

U velikom broju primena, uključujući i redukciju dinamičkog opsega, slika vodilja i ulazna slika koja se filtrira predstavljaju jednu te istu sliku ($I \equiv p$). Na ovaj način se vođeni filter svodi na filter osetljiv na ivice, pošto se sada obavlja usrednjavanje pri čemu se zadržavaju značajne ivice iz ulazne slike. Kako je glavni fokus ovog rada, efikasna implementacija vođenog filtra velikih dimenzija, koji se može primeniti u redukciji slika velikog dinamičkog opsega, većina diskusije u ovom poglavlju je radi jednostavnosti ograničena na ovaj slučaj. Generalizacija za slučaj $I \neq p$ je trivijalna i prikazana je na kraju ovog poglavlja.

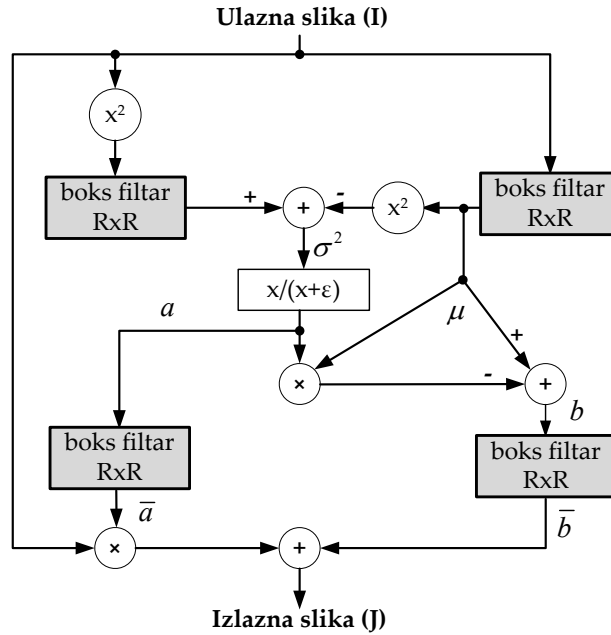
Za slučaj $I \equiv p$ izrazi (3.1.30) i (3.1.31) se pojednostavljaju i postaju:

$$a_k = \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (3.1.38)$$

$$b_k = (1 - a_k) \mu_k \quad (3.1.39)$$

5.3 Opis algoritma unapređenog brzog vođenog filtra

Blok dijagram algoritma vođenog filtra za slučaj $I \equiv p$, koji je opisan u prethodnom odeljku je prikazan na slici Slika 5.3.

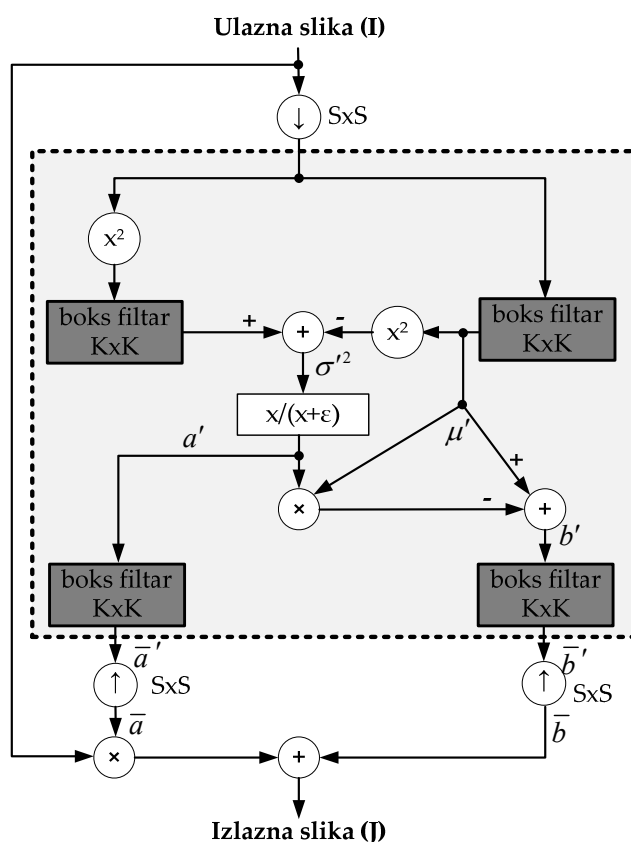


Slika 5.3 Blok dijagram algoritma vođenog filtra (GF) [40].

Iako vođeni filter omogućava znatno efikasniju realizaciju od bilateralnog filtra i dalje ostaje problem implementacije velikih boks filtera dimenzija $R \times R$, pošto je kompleksnost ovog rešenja $O(N \cdot R)$, uzimajući u obzir separabilnost boks filtera. Boks filteri se mogu izračunati sa kompleksnošću $O(N)$ korišćenjem integralnih slika, kao što je opisano u prethodnom odeljku. Međutim, ovaj pristup postavlja značajne zahteve za memorijskim resursima, potrebnim za skladištenje integralnih slika. Kako bi se optimizovalo zauzeće resursa, koje je proporcionalno širini slike, mnogi autori koriste procesiranje slike po trakama konstantne širine, koja je znatno manja od širine slike. Na taj način se, međutim, pored uvođenja komunikacije sa eksternom memorijom, što povećava potrošnju, znatno otežava integracija u sistem koji koristi protočnu obradu.

Autori vođenog filtra He i Sun sugerisali su u [117] da se vođeni filter može značajno

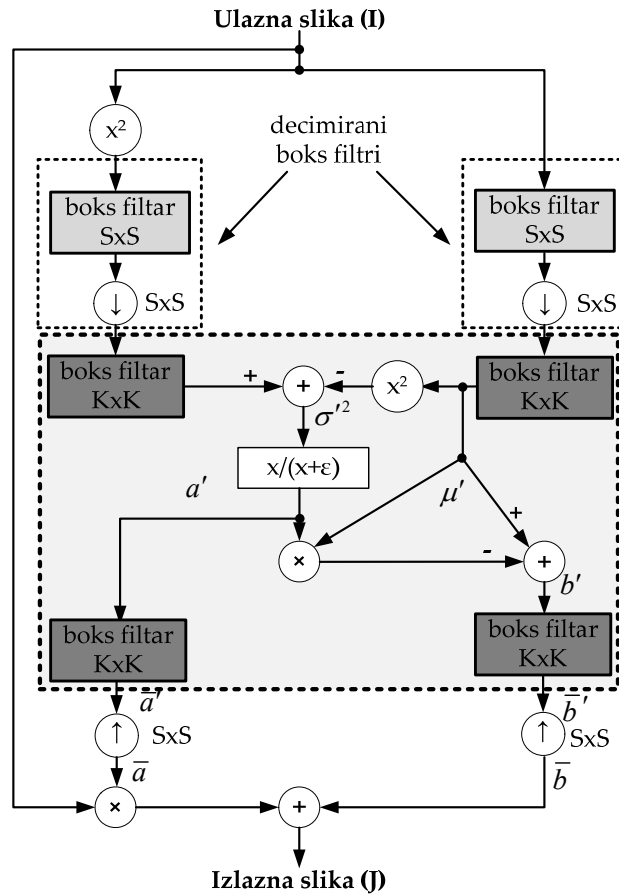
ubrzati za filtre velikih dimenzija korišćenjem postupka decimacije. Naime, ideja je da se veliki filter dimenzija $R = S \cdot K$, realizuje korišćenjem filtera dimenzije $K \times K$ nakon što se ulazna slika decimira za faktor S . Ovaj optimizovani postupak su nazvali brzi vođeni filter FGF (**F**ast **G**uided **F**ilter). Kompleksnost FGF-a je $O\left(\frac{N}{S^2}\right)$, ukoliko se koriste integralne slike ili $O\left(\frac{R \cdot N}{S^3}\right)$ u slučaju direktne implementacije filtera dimenzija $K \times K$. Blok dijagram algoritma brzog vođenog filtra, kako su ga predložili He i Sun, je prikazan na slici Slika 5.4.



Slika 5.4 Blok dijagram algoritma brzog vodenog filtra (FGF) [117].

Na osnovu blok dijagrama brzog vođenog filtra, može se zaključiti da se postupak decimacije obavlja jednostavnim zadržavanjem svakog S -tog piksela polazne slike, bez ikakvog filtriranja ulaznih piksela. Decimacija bez prethodnog filtriranja, može dovesti do preklapanja u spektru, odnosno alijasinga, čime se degradira kvalitet aproksimacije. Zbog toga je u [118] predloženo unapređenje brzog vođenog filtra dodavanjem blokova

za filtriranje pre operacije decimacije. Blok dijagram unapređenog brzog vođenog filtra iFGF (*improved FGF*) je prikazan na slici Slika 5.5. Združena operacija boks filtriranja i decimacije se može implementirati veoma efikasno, s obzirom da nije potrebno računati odziv filtra za sve tačke polazne slike, već samo za one koje će biti zadržane nakon postupka decimacije. Zbog toga je boks filter iza koga odmah sledi decimacija nazvan decimirani boks filter – DBF i posmatra se kao zaseban računski blok.



Slika 5.5 Blok dijagram algoritma unapređenog brzog vođenog filtra (iFGF) [118].

U nastavku su predstavljeni izrazi, kojim se definiše unapređeni brzi vođeni filter. Prvi korak procesiranja predstavljaju operacije filtriranja i decimacije, koje zapravo predstavljaju decimirani boks filter:

$$I' = \left(\frac{1}{S^2} \sum_{i \in \omega_k^*} I_i \right) \downarrow_{S \times S} = DBF(I) \quad (3.1.40)$$

$$I^{2'} = \left(\frac{1}{S^2} \sum_{i \in \omega_k''} I_i^2 \right) \downarrow_{S \times S} = DBF(I^2) \quad (3.1.41)$$

gde apostrof označava promenljive koje se koriste u decimiranom domenu, $\downarrow_{S \times S}$ predstavlja oznaku 2D decimacije za faktor S , koja se obavlja odbacivanjem svakog S -tog piksela, a ω_k'' predstavlja lokalno susedstvo trenutno procesiranog piksela dimenzija $S \times S$.

Ostatak procesiranja je isti kao kod originalnog vođenog filtra, s tim što se sada koriste promenljive iz decimiranog domena:

$$\mu'_k = \frac{1}{K^2} \sum_{i \in \omega'_k} I'_i \quad (3.1.42)$$

$$\sigma_k^{2'} = \frac{1}{K^2} \left(\sum_{i \in \omega'_k} I_i^{2'} \right) - \mu_k'^2 \quad (3.1.43)$$

$$a'_k = \frac{\sigma_k^{2'}}{\sigma_k^{2'} + \varepsilon} \quad (3.1.44)$$

$$b'_k = (1 - a'_k) \mu'_k \quad (3.1.45)$$

gde ω'_k predstavlja lokalno susedstvo piksela dimenzija $K \times K$ u decimiranom domenu. Nakon usrednjavanja parametara linearnog modela u decimiranom domenu, obavlja se postupak interpolacije na punu rezoluciju ulazne slike:

$$\hat{\hat{a}}_i = \left(\frac{1}{K^2} \sum_{k \in \omega'_i} a'_k \right) \uparrow_{S \times S} \quad (3.1.46)$$

$$\hat{\hat{b}}_i = \left(\frac{1}{K^2} \sum_{k \in \omega'_i} b'_k \right) \uparrow_{S \times S} \quad (3.1.47)$$

gde ω'_i predstavlja lokalno susedstvo piksela dimenzija $K \times K$ u decimiranom domenu, a oznaka $\uparrow_{S \times S}$ predstavlja postupak bilinearne interpolacije za faktor S .

Finalna vrednost piksela izlazne slike računa se kao:

$$\hat{J}_i = \hat{\hat{a}}_i \cdot I_i + \hat{\hat{b}}_i, \forall i \in I \quad (3.1.48)$$

U idealnom slučaju izlazna slika, koja se dobija decimacijom za faktor S i korišćenjem filtara dimenzija $K \times K$, jednaka je onoj koja se dobija originalnim postupkom iz (3.1.37) korišćenjem filtara dimenzija $R \times R$ gde je $R = S \cdot K$. Međutim, u opštem slučaju $\hat{J} \neq J$, pošto dolazi do izvesnog gubitka informacija u procesu decimacije, tako da je veoma važno kvantifikovati grešku ove optimizacije, što je urađeno u narednom odeljku.

5.4 Analiza performansi unapređenog brzog vođenog filtra

Za određivanje greške aproksimacije, korišćene su slike prikazane na slici Slika 5.6. Ove slike su odabrane tako da sadrže različit odnos ivica i glatkih regiona. Sve slike su dimenzija 6Mpix. Za levo prikazanu sliku se u narednom tekstu koristi naziv *statua*, za sliku u gornjem desnom uglu *devojčica* dok je za sliku u donjem desnom uglu korišćen naziv *kuće*.



Slika 5.6 Slike korišćene prilikom analize kvaliteta aproksimacija FGF i iFGF.

Kvalitet aproksimacije je meren kao odnos signal šum PSNR, između rezultata J dobijenog originalnim algoritmom vođenog filtra (GF) i rezultata $\hat{J}$ dobijenih aproksimacijama (FGF i iFGF):

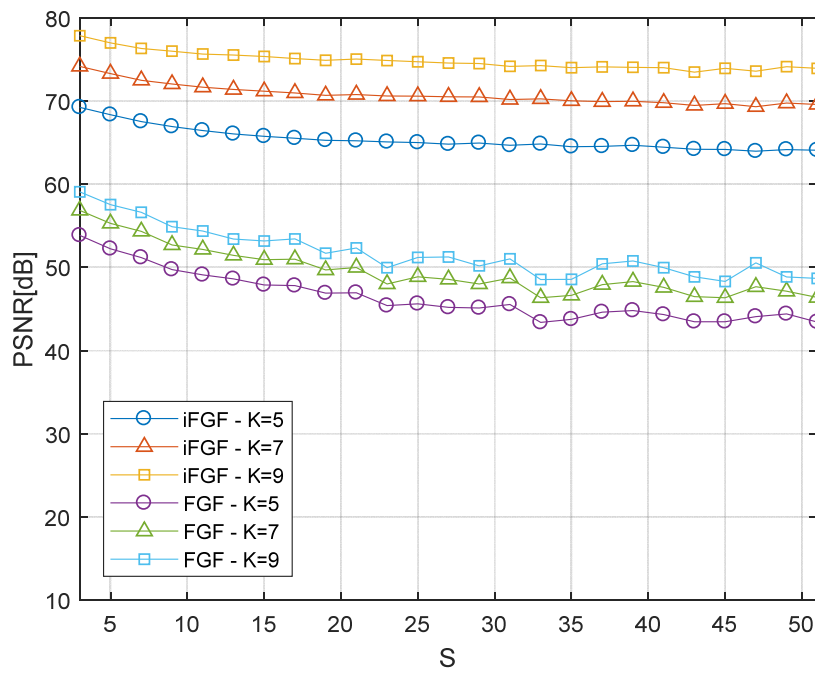
$$PSNR = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (\hat{J}_i - J_i)^2 \right) \quad (3.1.49)$$

U svim testovima rezultati aproksimacija su dobijeni za faktor decimacije S i veličinu

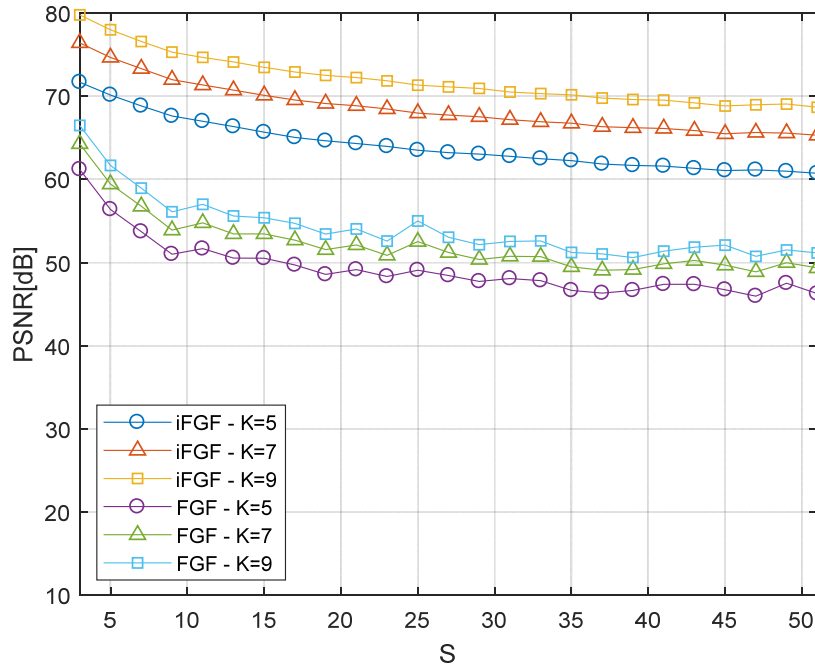
filtra u decimiranom domenu $K \times K$, dok je referentni rezultat dobijen primenom originalnog filtra dimenzija $R \times R$, pri čemu je $R = S \cdot K$. Regularizacioni parametar vođenog filtra je u svim testovima u ovom odeljku postavljen na fiksnu vrednost $\varepsilon = 0.04$, koja predstavlja dobar kompromis između usrednjavanja i izdvajanja ivica za većinu primena. U narednom odeljku je, takođe, ispitivan uticaj ovog parametra na kvalitet aproksimacije.

5.4.1 Uticaj veličine filtra na kvalitet aproksimacije

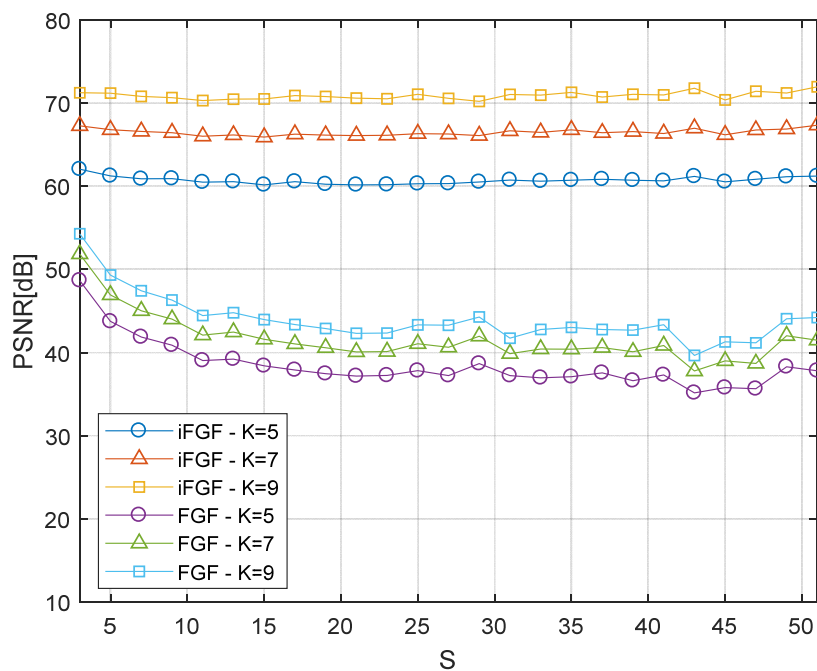
Rezultati ispitivanja kvaliteta aproksimacije sa promenom veličine filtra i za različite odnose S i K su prikazani na slikama Slika 5.7 do Slika 5.9. Veličina internog filtra je postavljena na 3 različite vrednosti 5, 7, i 9, dok je decimacioni faktor variran u opsegu od 3 do 51. Može se uočiti da je kvalitet aproksimacije dosta postojan sa povećanjem decimacionog faktora, za konstantnu veličinu internog filtra K , što sugerise da se dosta veliki filtri mogu realizovati povećanjem stepena decimacije. Sa povećanjem veličine internog filtra K raste i kvalitet aproksimacije, ali se s druge strane povećava se zahtev za resursima. Kvalitet aproksimacije takođe pokazuje konzistentno ponašanje na različitim slikama. Nešto manji kvalitet aproksimacije je dobijen za sliku *kuće*. Razlog leži u tome, što ova slika sadrži veliki broj ivica različitih tipova. Zbog toga ona ima izražen visokofrekventni sadržaj koji se gubi u procesu decimacije. Iz ovih dijagrama se takođe uočava da je uvođenje operacije filtriranja pre decimacije u iFGF, značajno unapredilo kvalitet aproksimacije u poređenju sa osnovnom verzijom FGF. Ovo unapređenje je 21dB u proseku. Najveće unapređenje, od 24dB postiže se za sliku *kuće*, koja ima dosta visokofrekventnog sadržaja, koji dovodi do preklapanja u spektru, ako se ne primeni filtriranje pre procesa decimacije. Najmanje unapređenje, od 16dB je postignuto za sliku *devojčica*, koja se uglavnom sastoji iz glatkih površina, tako da ovde i FGF daje dobre performanse, pa je prostor za unapređenje manji.



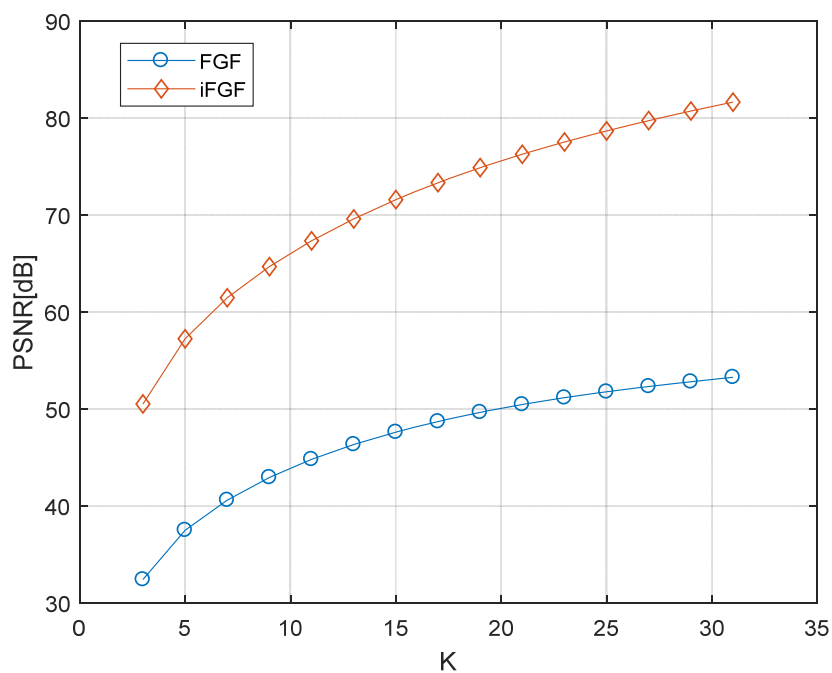
Slika 5.7 Kvalitet aproksimacije pri promeni veličine filtra za sliku *statua*.



Slika 5.8 Kvalitet aproksimacije pri promeni veličine filtra za sliku *devojčica*.



Slika 5.9 Kvalitet aproksimacije pri promeni veličine filtra za sliku *kuće*.



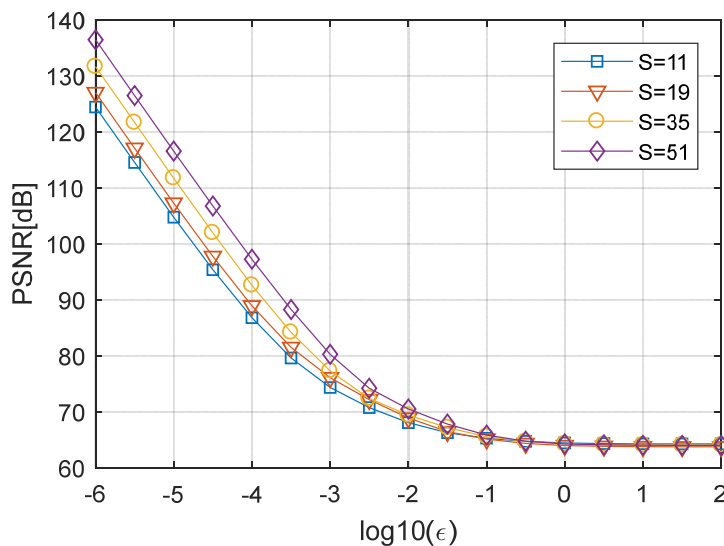
Slika 5.10 Kvalitet aproksimacije za konstantan decimacioni faktor $S=25$

Slika 5.10 prikazuje kvalitet aproksimacije za konstantan decimacioni faktor $S = 25$, i

za varijacije veličine internog filtra K od 3 do 31. Uočava se da kvalitet aproksimacije raste sa povećanjem internog filtra, međutim ovi dobici postaju manji što je veličina internog filtra veća.

5.4.2 Uticaj regularizacionog parametra vođenog filtra na kvalitet aproksimacije

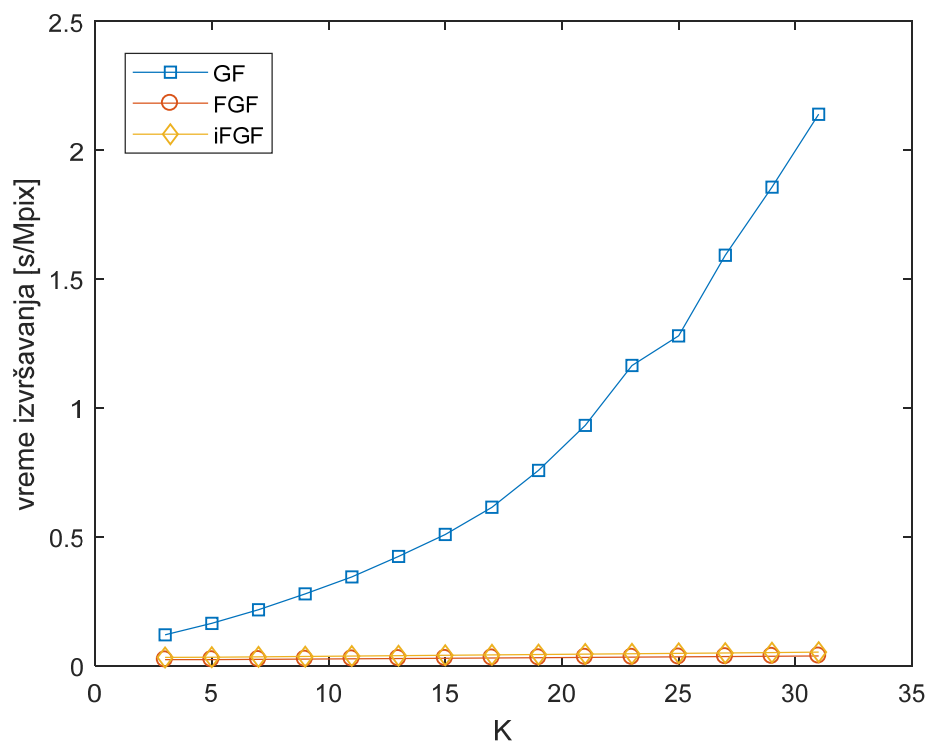
Svi prethodni testovi su koristili konstantu vrednost regularizacionog parametra vođenog filtra $\varepsilon = 0.04$. Ovaj parametar je jako važan, s obzirom da definiše osetljivost vođenog filtra na ivice i može imati različite vrednosti za različite primene vođenog filtra. Zbog toga je bitno ispitati, kako promena ovog parametra utiče na kvalitet aproksimacije iFGF. Test je sproveden za konstantnu veličinu internog filtra $K = 7$ i za različite decimacione faktore. Rezultati ovog testa su prikazani na slici Slika 5.11. Može se uočiti da sa povećanjem vrednosti regularizacionog parametra iznad vrednosti 0.1, kvalitet aproksimacije ostaje približno konstantan, dok za manje vrednosti regularizacionog parametra raste. Kako vrednost regularizacionog parametra, korišćenog u prethodnim testovima, iznosi -1.4 na logaritamskoj skali, može se zaključiti da su prethodno prikazani rezultati reprezentativni, s obzirom da povećanje ove vrednosti ne utiče na kvalitet aproksimacije, dok smanjenje ove vrednosti povećava kvalitet aproksimacije.



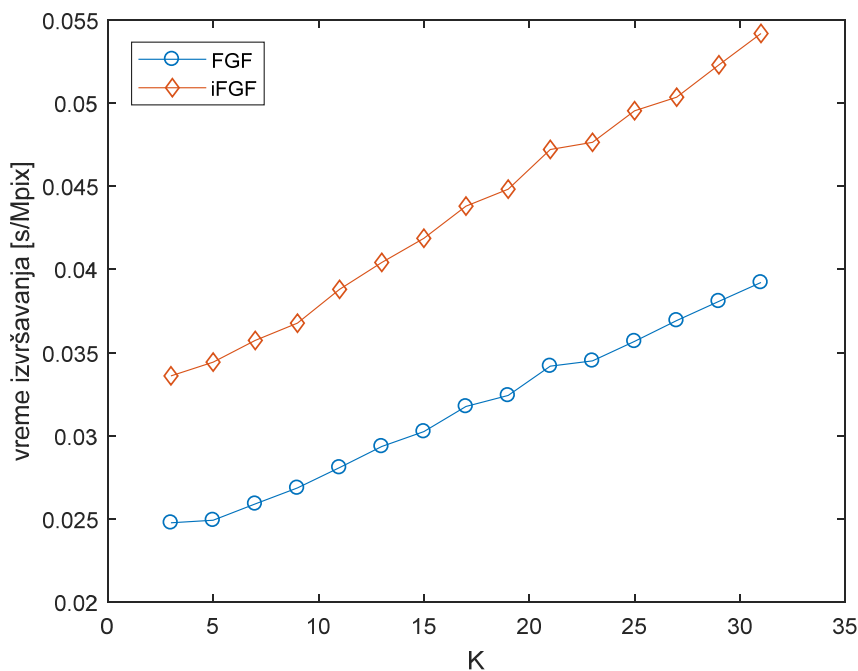
Slika 5.11 Uticaj promene regularizacionog parametra na kvalitet aproksimacije za $K=7$ i različite decimacione faktore.

5.4.3 Brzina izvršavanja

Brzina izvršavanja navedenih aproksimacija merena je izvršavanjem Matlab skripte, koja implementira ova rešenja na računaru opšte namene. Kako parametar K , koji predstavlja veličinu internih boks filtera, najviše utiče na kvalitet aproksimacije, u ovom testu je merena zavisnost vremena izvršavanja svakog od testiranih filtera, u zavisnosti od promene ovog parametra. U svim testovima korišćena je konstantna vrednost decimacionog faktora $S = 25$. Slika 5.12 prikazuje vremena izvršavanja originalnog vođenog filtra GF i dve optimizovane verzije FGF i iFGF, za različite veličine internog filtra K . Vidi se da efikasnost optimizovanih filtera daleko prevazilazi efikasnost originalne realizacije, pogotovo za veće vrednosti parametra K . Performanse dve optimizovane verzije vođenog filtra su prikazane na slici Slika 5.13. Vidi se da se vremena izvršavanja obe realizacije skaliraju linearno sa povećanjem internog filtra K . Razlika u performansama potiče od dodavanja operacije filtriranja pre decimacije.



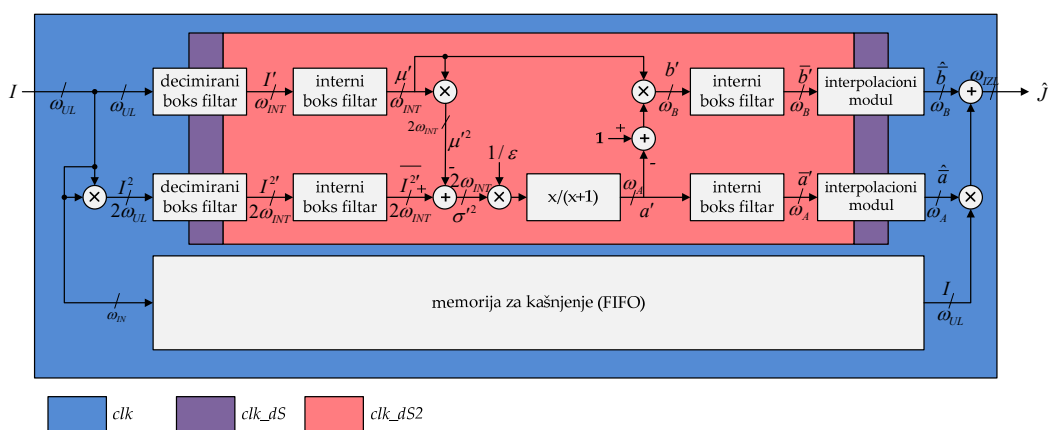
Slika 5.12 Vreme izvršavanja različitih verzija vođenog filtra u zavisnosti od veličine internog filtra K , za konstantnu vrednost decimacionog faktora $S=25$.



Slika 5.13 Vreme izvršavanja originalnog (FGF) i unapređenog (iFGF) brzog vođenog filtra u zavisnosti od veličine internog filtra K, za konstantnu vrednost decimacionog faktora S=25.

5.5 Hardverska arhitektura unapređenog brzog vođenog filtra

Blok dijagram hardverske arhitekture unapređenog brzog vođenog filtra je prikazan na slici Slika 5.14.



Slika 5.14 Hardverska arhitektura iFGF-a za slučaj $I \equiv p$. Tri različita takt domena su označena različitim bojama.

Projektovani filter je namenjen za protočnu obradu i ne zahteva upotrebu nikakvih

drugih memorija, osim oni prikazanih na slici Slika 5.14. Interfejs ka ostatku sistema je ulazni tok piksela I i izlazni tok procesiranih piksela $\hat{J}$. Kako se vrednost izlaznog piksela računa na osnovu izraza (3.1.48), potrebno je obezbediti da vrednost ulaznog piksela I_i bude dostupna u isto vreme, kada se izračunaju parametri linearnog modela $(\hat{a}_i, \hat{b}_i)$. S obzirom da se u ovoj realizaciji ne koristi pristup eksternoj memoriji, u kojoj je skladišten ceo ulazni frejm, potrebno je uvesti memoriju za kašnjenje. U njoj se čuvaju ulazni pikseli, sve dok parametri linearnog modela, koji su potrebni za izračunavanje izlaznog piksela na toj poziciji, ne budu spremni. Veličina ove memorije zavisi od veličine filtra, koji se koristi i uglavnom je značajno manja od veličine slike koja se procesira.

Celokupno procesiranje je podeljeno na 3 takt domena, koji su na slici Slika 5.14 označeni različitim bojama. Protok piksela u sistemu se obavlja na najbržem taktu (clk), koji je na slici Slika 5.14 označen plavom bojom. Ovaj takt ujedno predstavlja i takt sistema, u koji se integriše projektovani hardverski modul. Interni takt (clk_dS2), koji je na slici Slika 5.14 označen crvenom bojom, ima S^2 puta manju učestanost od ulaznog takta clk . Kako se većina procesiranja obavlja na ovom sporijem taktu, potrošnja energije se značajno smanjuje. Pored manje potrošnje energije, svi blokovi koji odgovaraju procesiranju u decimiranom domenu, imaju značajno manje zauzeće memorijskih i logičkih resursa. Prelazni takt (clk_dS) koji je S puta sporiji od ulaznog takta koristi se u prelazima između ova dva domena, u blokovima koji obavljaju decimaciju i interpolaciju. Ovaj takt je označen ljubičastom bojom na slici Slika 5.14.

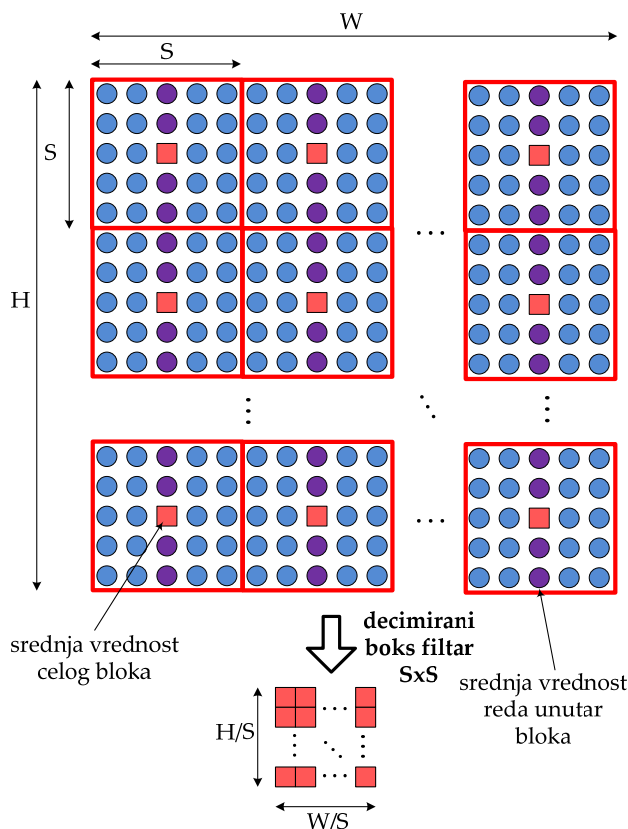
Bitske širine svih signala su označene na slici Slika 5.14 promenljivom ω sa odgovarajućim indeksom, čime se pravi razlika između širina različitih magistrala u sistemu. Kako se isti blok, poput internog boks filtra, može koristiti na više različitih mesta u sistemu, sa različitim veličinama ulaznih i izlaznih podataka, prilikom opisa arhitekture svake interne komponente, korišćene su generičke oznake bitskih širina $\omega_{C_{UL}}$ i $\omega_{C_{IZL}}$ koje označavaju širine ulaznih i izlaznih magistrala podataka respektivno. Prave širine ovih magistrala zavise od pozicije bloka unutar sistema. Tako na primer za ulazni decimirani boks filter, koji služi za decimaciju ulazne slike I , važi $\omega_{C_{UL}} = \omega_{UL}$ i

$\omega_{C_{IZL}} = \omega_{INT}$, dok za drugi decimirani boks filter, koji služi za decimaciju kvadrata ulazne slike, važi $\omega_{C_{UL}} = 2\omega_{UL}$ i $\omega_{C_{IZL}} = 2\omega_{INT}$. Iako su ova dva filtra arhitekturno identična, zbog različitih mesta u sistemu, koji dovode da različitih širina ulaza i izlaza, njihovo zauzeće resursa biće različito.

U nastavku je analizirana arhitektura svake komponente u sistemu.

5.5.1 Decimirani boks filteri

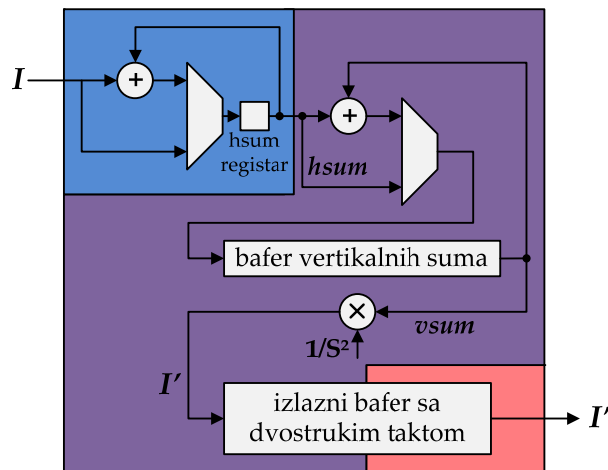
Grafički prikaz postupka izračunavanja decimiranog boks filtra je prikazan na slici Slika 5.15. Kako se veliki broj piksela nakon filtriranja odbacuje u procesu decimacije, velika ušteda se može postići, ako se izlazi filtra računaju samo za one piksele koji će biti zadržani u procesu decimacije.



Slika 5.15 Grafički prikaz procesa izračunavanja decimiranog boks filtra.

Ovi pikseli su prikazani crvenom bojom na slici Slika 5.15 i zapravo predstavljaju srednje vrednosti nepreklapajućih blokova dimenzija $S \times S$. Kako bi se efikasnije

izračunala srednja vrednost nepreklapajućih blokova, iskorišćena je osobina separabilnosti boks filtra. Horizontalne srednje vrednosti redova svakog od blokova, označene ljubičastom bojom na slici Slika 5.15, se računaju kako pristižu ulazni pikseli, bez upotrebe dodatnih memorija. Za izračunavanje srednje vrednosti blokova, potrebno je iskoristiti jedan bafer dimenzija W/S , gde W predstavlja širinu slike a S faktor decimacije. Ovaj bafer se koristi za skladištenje sume horizontalnih srednjih vrednosti, o čemu će biti više reči u nastavku teksta.



Slika 5.16 Hardverska arhitektura decimiranog boks filtra. Različite boje označavaju različite domene takta.

Arhitektura decimiranog boks filtra je prikazana na slici Slika 5.16. Horizontalne sume redova blokova se računaju korišćenjem jednog sabirača i jednog registra. U ovom registru se nalazi suma piksela iz trenutnog reda bloka koji se procesira. Nakon što se učitaju svi pikseli koji pripadaju redu istog bloka, ukupno S njih, u ovom registru će se nalaziti vrednost koja odgovara sumi piksela trenutnog reda bloka koji se procesira. Ta vrednost se upisuje u bafer vertikalnih suma, a registar se inicijalizuje vrednošću prvog piksela u trenutnom redu narednog bloka. Bafer vertikalnih suma je dimenzija W/S i nakon procesiranja prvog reda svih blokova, koji se nalaze u istom redu slike, sadrži horizontalne sume prvih redova za svaki od ovih blokova. Nakon toga se prelazi na procesiranje sledećeg reda slike, pri čemu se izračunavaju sume svih piksela drugog reda svakog od blokova koji se nalaze u istom redu slike. Ove horizontalne sume se sabiraju sa horizontalnim sumama iz prvog reda, koje se nalaze u baferu vertikalnih suma. Nakon procesiranja svih S redova blokova koji se nalaze u istom redu slike, u

baferu vertikalnih suma će se nalaziti W/S vrednosti, koje predstavljaju sume svih piksela za W/S procesiranih blokova. Ove vrednosti se sada iščitavaju iz bafera vertikalnih suma, množe sa $1/S^2$, kako bi se odredile srednje vrednosti, i upisuju u izlazni bafer sa dvostrukim taktom, koji predstavlja ulaz u decimirani deo sistema. U isto vreme se nastavlja sa procesiranjem narednog reda blokova ulazne slike. Širina izlaznog bafera je $2(W/S)$ elemenata, kako bi se podržalo dvostruko baferisanje i omogućio istovremeni upis i iščitavanje podataka iz ovog bafera.

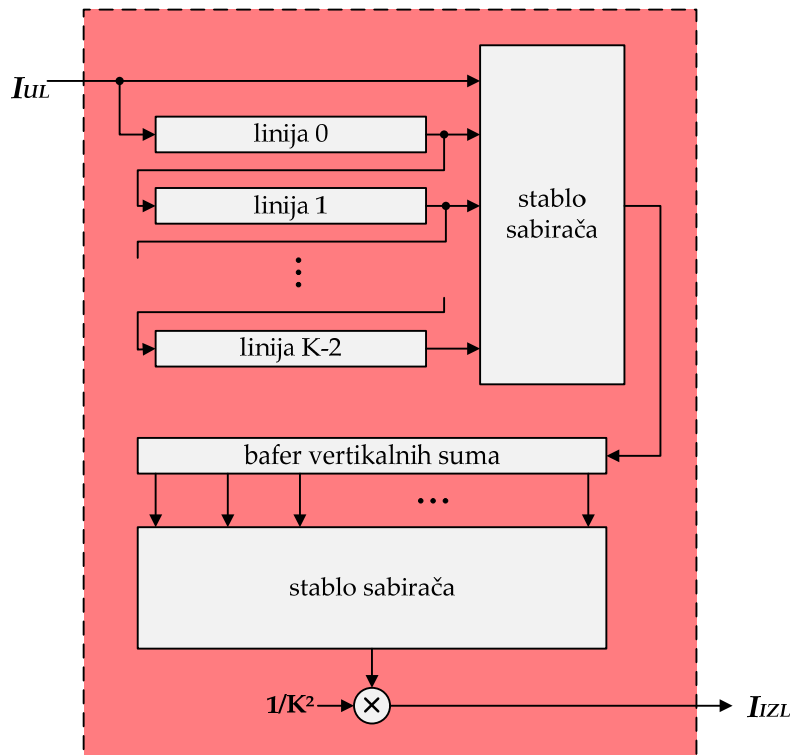
Svaki podatak unutar bafera vertikalnih suma, predstavlja sumu svih piksela unutar bloka dimenzija $S \times S$. Ako je bitska širina ulaznih podataka $\omega_{C_{UL}}$, onda je potrebno da širina svakog elementa bafera vertikalnih suma bude $\omega_{C_{UL}} + \lceil \log_2(S^2) \rceil$. Širina podataka unutar izlaznog bafera jednaka je širini izlazne magistrale i iznosi $\omega_{C_{IZL}}$. Prema tome, ukupno zauzeće memorije decimiranog boks filtra, može se predstaviti kao $(W/S) \cdot (\omega_{C_{UL}} + \lceil \log_2(S^2) \rceil) + 2 \cdot (W/S) \cdot \omega_{C_{IZL}}$.

Decimirani boks filter započinje sa generisanjem izlaza, čim se učita prvih S redova ulazne slike. Takođe, postoje dva takta kašnjenja koja su posledica sinhronizacije između ulaza i izlaza sistema. Kako je izlazni takt S^2 puta sporiji od ulaznog takta, to je ukupno kašnjenje decimiranog boks filtra jednako $W \cdot S + 2S^2$ perioda ulaznog takta clk .

5.5.2 Interni boks filteri

Interni boks filteri predstavljaju standardne boks filtre i njihova arhitektura je prikazana na slici Slika 5.17. Ulazni pikseli se skladište u odgovarajuće linijske bafere, kojih u slučaju filtra dimenzija $K \times K$ ima $K-1$. Na ovaj način se obezbeđuje da je tokom obrađivanja trenutne linije slike, na raspolaganju prethodnih $K-1$ linija. Pikseli na istim horizontalnim pozicijama iz K susednih ulaznih linija se sabiraju korišćenjem stabla sabirača, čime se formiraju vertikalne sume, koje se zatim skladište u bafer vertikalnih suma. Ovaj bafer se sastoji od K elemenata, odnosno sadrži informacije o K susednih vertikalnih suma. Izlazi bafera vertikalnih suma se vode na još jedno stablo sabirača, na čijem izlazu se formira suma svih piksela u okviru lokalnog susedstva dimenzija $K \times K$. Množenjem ove sume konstantom $1/K^2$, dobija se srednja vrednost

lokalnog susedstva, koja predstavlja izlazni rezultat procesa filtriranja.



Slika 5.17 Hardverska arhitektura internog boks filtra.

Svaki od $K - 1$ linijskih bafera sadrži W / S ulaznih elemenata čija je bitska širina $\omega_{c_{UL}}$. Stoga je količina memorije potrebna za linijske bafere, jednaka $(K - 1) \cdot (W / S) \cdot \omega_{c_{UL}}$. Pored linijskih bafera, unutar boks filtra postoji i bafer vertikalnih suma, koji se sastoji od K elemenata. Svaki element bafera vertikalnih suma, predstavlja sumu K piksela ulazne slike bitske širine $\omega_{c_{UL}}$. Zbog toga je potrebno da širina svakog elementa bafera vertikalnih suma bude $\omega_{c_{UL}} + \lceil \log_2 K \rceil$. Ukupna količina memorije koja je potrebna za realizaciju internog boks filtra, jednaka je zbiru veličina memorija linijskih bafera i bafera vertikalnih suma i iznosi $(K - 1) \cdot (W / S) \cdot \omega_{c_{UL}} + K \cdot (\omega_{c_{UL}} + \lceil \log_2 K \rceil)$.

Pri generisanju izlaza boks filtra, potrebno je nakon učitavanja piksela za koji se izlaz generiše, učitati još $(K - 1) / 2$ narednih linija slike, plus $(K - 1) / 2$ dodatnih piksela, kako bi se formiralo potpuno lokalno susedstvo dimenzija $K \times K$, na osnovu kog se

izračunava vrednost izlaza. Zbog toga se kašnjenje komponente internog boks filtra može predstaviti kao $\left(\frac{K-1}{2} \cdot (W/S) + \frac{K-1}{2} + 2\right) \cdot S^2$. U prethodnom izrazu broj 2 je posledica sinhronizacije između ulaza i izlaza, dok je množenje sa S^2 posledica rada u decimiranom domenu, koji koristi takt S^2 puta sporiji od ulaznog takta sistema.

5.5.3 Aproksimacija funkcije $x/(x+1)$

Prilikom izračunavanja parametra a linearnog modela unapređenog brzog vođenog filtra definisanog izrazom (3.1.44), potrebno je primeniti operaciju deljenja. Deljenje predstavlja hardverski zahtevnu operaciju i u literaturi se može naći više različitih opcija za njenu efikasnu implementaciju [129]. Jednu opciju predstavlja korišćenje hardverskog delitelja, koji generiše egzaktn rezultat deljenja bez gubitka preciznosti. Dobijena preciznost obično dolazi po cenu velikog zauzeća resursa i kašnjenja koje ova komponenta unosi, s obzirom da se hardverski delitelji obično baziraju na iterativnom procesiranju. Kako bi postigli odgovarajuće protoke, hardverski delitelji se obično dele na više segmenata, kojima se omogućava protočna obrada.

S druge strane, moguće je koristiti tabele pretrage, odnosno LUT-ove (*LookUp Table*) u koje se smeštaju unapred izračunati rezultati operacije deljenja za sve moguće vrednosti ulaznih podataka. Zapravo, u tabele se smeštaju recipročne vrednosti za sve moguće vrednosti delioca. Za konkretnu vrednost delioca recipročna vrednost se može odrediti jednostavnim očitavanjem vrednosti iz LUT-a. Rezultat deljenja se dobija množenjem deljenika i recipročne vrednosti delioca. Problem sa korišćenjem LUT-a je što količina memorije raste eksponencijalno sa povećanjem preciznosti delioca i linearno sa povećanjem preciznosti izlaza. Zbog toga se postupak deljenja korišćenjem LUT-ova, koristi samo u slučajevima kada je prioritet na brzini procesiranja, uz relativno male preciznosti operanada i rezultata.

Kompromis između dva navedena pristupa predstavlja polinomijalne aproksimacije, koje su korišćene i u ovom radu. Naime, ideja je da se opseg vrednosti ulaza podeli na niz segmenata, pri čemu se funkcija deljenja na svakom od segmenata aproksimira polinomijalnom funkcijom. Memorijski zahtevi u ovom slučaju su značajno manji od standardnog pristupa koji koristi tabele pretrage, s obzirom da je sada potrebno skladištiti samo relativno mali broj koeficijenata polinomijalne funkcije za svaki do

segmenata.

Kako bi se dobila što generalnija funkcija, izraz (3.1.44) je preformulisan u:

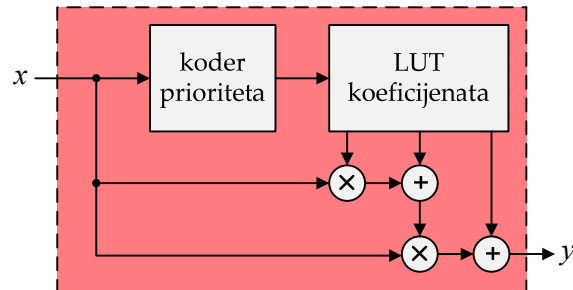
$$a'_k = \frac{\sigma_k^{2'} / \varepsilon}{\sigma_k^{2'} / \varepsilon + 1} \quad (3.1.50)$$

Izraz (3.1.50) predstavlja funkciju oblika $y = x / (x + 1)$ gde je $x = \sigma_k^{2'} / \varepsilon$. Navedena funkcija je izrazito nelinearna, sa veoma strmim nagibom za male vrednosti x i skoro konstantnom vrednošću za veće vrednosti x . Zbog toga je, u ovom slučaju, veoma neefikasno koristiti intervale jednakih širina. Naime, za postizanje dovoljne preciznosti za male vrednosti ulaza x , potrebno je koristiti intervale manjih širina, što je nepotrebno za opseg većih vrednosti ulaza x , gde se funkcija dosta sporo menja. Upravo iz ovog razloga je odlučeno da se opseg vrednosti ulazne promenljive x podeli na intervale nejednakih širina, pri čemu se veličine intervala menjaju po geometrijskoj progresiji sa faktorom 2. Jedino prva dva segmenta, koja odgovaraju najmanjim vrednostima ulazne promenljive x , imaju jednake širine, dok se širina svakog narednog segmenta određuje dupliranjem širine prethodnog. Na primer, opseg vrednosti ulazne promenljive x može biti podeljen na intervale $[0, 0.125)$, $[0.125, 0.25)$, $[0.25, 0.5)$, $[0.5, 1)$, $[1, 2)$, itd. Za sve vrednosti ulaza koje su veće od najvećeg definisanog ulaznog intenziteta, vrednost izlaza se postavlja na 1. Ovo je u skladu sa činjenicom, da funkcija koja se aproksimira teži vrednosti 1 za velike vrednosti ulazne promenljive x .

Za aproksimaciju izraza (3.1.50) u ovom radu je korišćena podela opsega vrednosti ulazne promenljive na 14 segmenata, pri čemu je opseg vrednosti prvog segmenta $[0, 0.25)$, dok je opseg vrednosti poslednjeg segmenta $[2048, 4096)$. Ukoliko se na svakom od segmenata koristi aproksimacija kvadratnom funkcijom, dobija se maksimalna greška aproksimacije od 0.0011 na opsegu izlaznih vrednosti od 0 do 1.

Arhitektura bloka za aproksimaciju funkcije $x/(x+1)$ prikazana je na slici Slika 5.18. Problem koji se često javlja kod aproksimacije nelinearne funkcije po segmentima, je način na koji se određuje kom segmentu zapravo pripada ulazna vrednost. Kako se u opisanoj aproksimaciji koriste segmenti čije su granice stepeni broja 2, segment kojem pripada ulazna vrednost x , je zapravo definisan pozicijom 1 najveće težine u binarnom zapisu broja x . Ova pozicija se može odrediti veoma jednostavno korišćenjem kodera

prioriteta. Nakon iščitavanja koeficijenata kvadratne funkcije za odgovarajući segment, izlazna vrednost se određuje primenom Hornerove šeme, koja zahteva 2 množača i 2 sabirača.



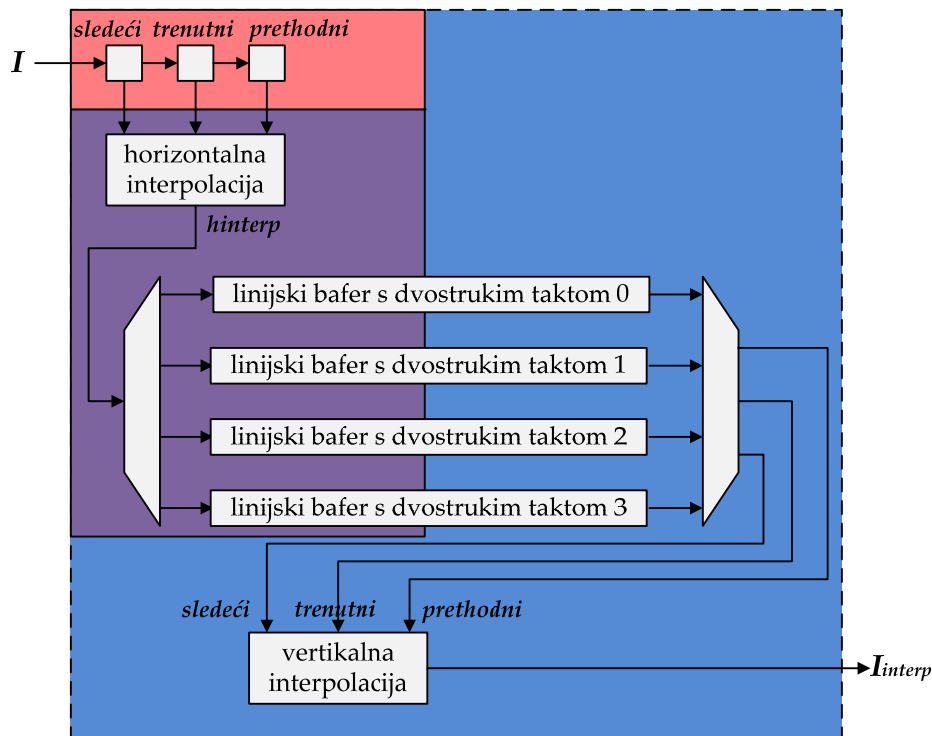
Slika 5.18 Hardverska arhitektura bloka za aproksimaciju funkcije $x/(x+1)$.

Jedina memorija koja se nalazi u okviru ovog bloka, je zapravo tabela pretrage u kojoj su smeštene vrednosti koeficijenata kvadratne funkcije, za svaki od segmenata ulaznih vrednosti. Ukoliko je broj korišćenih segmenata N_{SEG} i preciznost koeficijenata kvadratne funkcije ω_{LUT} , ukupna memorija koja se koristi u okviru ovog bloka je $3 \cdot N_{SEG} \cdot \omega_{LUT}$. Ovaj modul je potpuno kombinatorni, tako da ne unosi nikakvo kašnjenje u sistem. On takođe ne ograničava učestanost takta, s obzirom da se nalazi u decimiranom domenu u kome se koristi takt S^2 sporiji od ulaznog, tako da postoji dovoljno vremena u da se obavi ovo procesiranje.

5.5.4 Interpolacioni modul

Nakon procesiranja u decimiranom domenu, potrebno je obaviti skaliranje dobijenih parametara linearnog modela a i b , na početnu rezoluciju ulazne slike kako bi se odredila finalna vrednost izlaznog piksela. U ovu svrhu korišćena je bilinearna interpolacija. Kako je bilinearna interpolacija separabilna, procesiranje je podeljeno na horizontalnu i vertikalnu interpolaciju. S obzirom da se nalazi na prelazu između različitih domena takta, interpolacioni modul u okviru sebe koristi 3 različita signala takta. Ulazni pikseli pristižu u interpolacioni modul brzinom najsporijeg takta u sistemu clk_dS2 . Blok koji obavlja horizontalnu interpolaciju za svaki ulazni podatak, proizvodi S interpoliranih podataka koji se generišu korišćenjem prelaznog takta clk_dS . Za svaku celu izlaznu liniju, kreiranu nakon procesa horizontalne

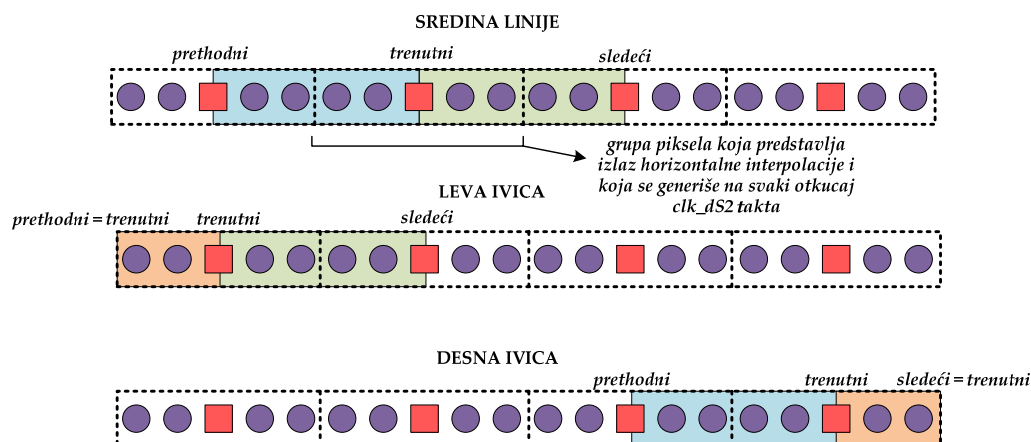
interpolacije, vertikalni interpolacioni blok kreira S izlaznih linija, korišćenjem najbržeg takta u sistemu clk . Arhitektura interpolacionog modula je prikazana na slici Slika 5.19.



Slika 5.19 Hardverska arhitektura interpolacionog modula.

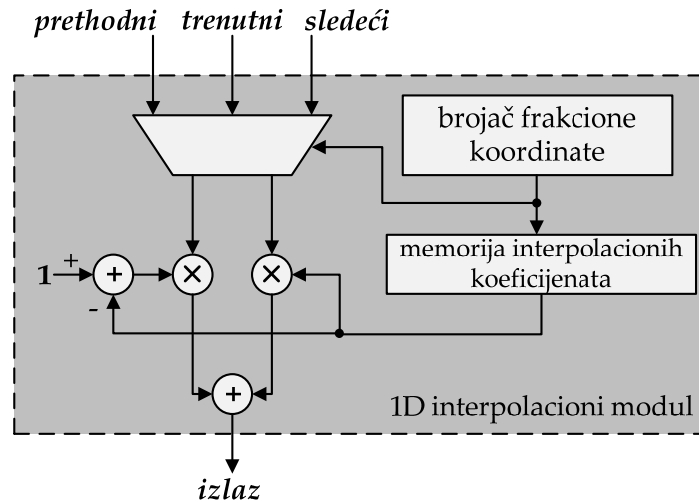
Kako bi se obezbedila protočna obrada, potrebno je obratiti posebnu pažnju na organizaciju procesiranja unutar interpolacionog modula. Organizacija procesiranja tokom horizontalne interpolacije prikazana je na slici Slika 5.20. Ulazni pikseli su označeni crvenim kvadratima, dok su pikseli generisani u postupku horizontalne interpolacije označeni ljubičastim kružićima. Isprekidanim linijama su ograničene grupe piksela koje odgovaraju istom periodu clk_dS2 takta. Kako bi se odredili svi izlazni pikseli koji pripadaju istoj izlaznoj grupi, potrebno je da u interpolacioni modul budu učitana tri susedna ulazna piksela, koji su na slici Slika 5.20 označeni kao *prethodni*, *trenutni* i *sledeći*. Na levoj ivici slike vrednosti *prethodnog* i *trenutnog* piksela su jednake i odgovaraju prvom pikselu u tom redu slike. Ovo je ekvivalentno kao da je izvršeno proširenje slike pre procesa interpolacije, ponavljanjem po jednog reda i kolone sa svake strane slike. Sličnom logikom, na desnoj ivici slike vrednost *sledećeg*

piksela je jednaka vrednosti *trenutnog* piksela. Na ovaj način je obezbeđeno da se na svaki otkucaj takta clk_dS2 , na izlazu interpolacionog modula proizvede jednak broj izlaznih piksela, bez obzira koji deo slike se procesira.



Slika 5.20 Organizacija procesiranja tokom horizontalne interpolacije kojom se obezbeđuje konstantan protok na izlazu.

Arhitektura 1D interpolacionog modula prikazana je na slici Slika 5.21. Brojač frakcione koordinate određuje relativnu poziciju izlaznog piksela unutar trenutne grupe izlaznih piksela. Na osnovu ove pozicije, selektuju se interpolacioni koeficijenti iz odgovarajuće memorije i koriste se za određivanje finalne vrednosti izlaznog piksela. Prva polovina izlaznih piksela, koji se nalaze u okviru iste grupe, izračunava se na osnovu vrednosti *prethodnog* i *trenutnog* ulaznog piksela, dok se za drugu polovinu izlaznih piksela koriste vrednosti *trenutnog* i *sledećeg* ulaznog piksela.



Slika 5.21 Hardverska arhitektura 1D interpolacionog modula.

Slična organizacija procesiranja je korišćena i tokom vertikalne interpolacije, s tim što se sada umesto *prethodnog*, *trenutnog* i *sledećeg* ulaznog piksela, koriste *prethodna*, *trenutna* i *sledeća* linija slike nakon horizontalne interpolacije. Kako ove linije predstavljaju izlaz koraka horizontalne interpolacije, njihova širina je jednaka širini ulazne slike i iznosi W . U okviru interpolacionog modula postoje 4 linijska bafera širine W , od kojih se u svakom trenutku 3 koriste kao ulaz u blok vertikalne interpolacije i predstavljaju *prethodnu*, *trenutnu* i *narednu* ulaznu liniju, dok se četvrti bafer koristi za skladištenje najnovijih rezultata horizontalne interpolacije. Blok vertikalne interpolacije je organizovan tako da omogući konstantan protok na izlazu korišćenjem takta clk . Na svaku uzlaznu ivicu sistemskog takta generiše se po jedan izlazni piksel. Nakon generisanja cele grupe od S izlaznih linija, u četvrtom baferu, koji se naziva *ulazni*, se nalazi spremna vrednost naredne linije izlazne slike, koja je dobijena postupkom horizontalne interpolacije. Pre početka novog ciklusa vertikalne interpolacije, linijski baferi simultano menjaju uloge po sledećem algoritmu:

$$\begin{aligned}
 \text{indeks}(\text{prethodni})_n &= \text{indeks}(\text{trenutni})_{n-1} \\
 \text{indeks}(\text{trenutni})_n &= \text{indeks}(\text{sledeći})_{n-1} \\
 \text{indeks}(\text{sledeći})_n &= \text{indeks}(\text{ulazni})_{n-1} \\
 \text{indeks}(\text{ulazni})_n &= \text{indeks}(\text{prethodni})_{n-1}
 \end{aligned} \tag{3.1.51}$$

gde $\text{indeks}()_n$ označava indeks odgovarajućeg bafera za n -tu grupu izlaznih linija.

Međurezultati koji predstavljaju izlaz horizontalne interpolacije se predstavljaju na istoj bitskoj širini kao i ulazni u interpolacioni modul, tako da je memorija potrebna za realizaciju ovih bafera jednaka $4 \cdot W \cdot \omega_{C_{UL}}$. Pored linijskih bafera, potrebna je i memorija za skladištenje $S+1$ interpolacionih koeficijenata bitske širine ω_{INTERP} . Prema tome, ukupna količina memorije koja se koristi u okviru interpolacionog modula, može se predstaviti kao $4 \cdot W \cdot \omega_{C_{UL}} + (S+1) \cdot \omega_{INTERP}$.

Ukupno kašnjenje izlaza interpolacionog modula iznosi $(2 \cdot (W/S) + 2) \cdot S^2 + 3$. Prvi deo kašnjenja je posledica toga, što je za početak generisanja izlaza potrebno učitati celu trenutnu i sledeću ulaznu liniju. Dva dodatna ciklusa takta u decimiranom domenu predstavljaju posledicu sinhronizacije između dva taktna domena. Kašnjenje od 3 periode clk takta je posledica dodavanja registara u množače, koji se koriste u procesu vertikalne interpolacije, kako bi se obezbedila brža protočna obrada, kao i sinhronizacije izlaznih podataka.

5.5.5 Memorija za kašnjenje

Svrha memorije za kašnjenje je da skladišti vrednosti ulaznih piksela, sve dok odgovarajuće vrednosti a i b , potrebne za određivanje izlaznog piksela, ne budu spremne. Veličina ove memorije je stoga jednaka ukupnom kašnjenju centralnog dela filtra i zavisi od širine ulazne slike (W), faktora decimacije (S) i veličine internog filtra (K). Na osnovu arhitekture celog sistema prikazane na slici Slika 5.14, može se zaključiti da se na kritičnoj putanji nalazi 1 decimirani boks filter, 2 interna boks filtra i 1 interpolacioni modul. Sabiranjem kašnjenja ovih komponenti, dobija se da je ukupno kašnjenje centralnog dela sistema jednako $(K+2) \cdot S \cdot W + (K+7) \cdot S^2 + 3$. Kako se u okviru memorije za kašnjenje čuvaju pikseli ulazne slike, bitske širine ω_{UL} , to je ukupna veličina memorije za kašnjenje jednaka $((K+2) \cdot S \cdot W + (K+7) \cdot S^2 + 3) \cdot \omega_{UL}$.

Ukoliko u sistemu postoji memorija u kojoj je skladišten ceo trenutni frejm, onda nema potrebe za posebnim skladištenjem ovih piksela u memoriji za kašnjenje. Na taj način se značajno smanjuje zauzeće memorijskih resursa a ne povećava se značajno protok ka eksternoj memoriji, s obzirom da je potrebno obaviti još samo jedno dodatno čitanje ulaznih piksela. Međutim, komunikacija sa eksternom memorijom se negativno

odražava na potrošnju sistema.

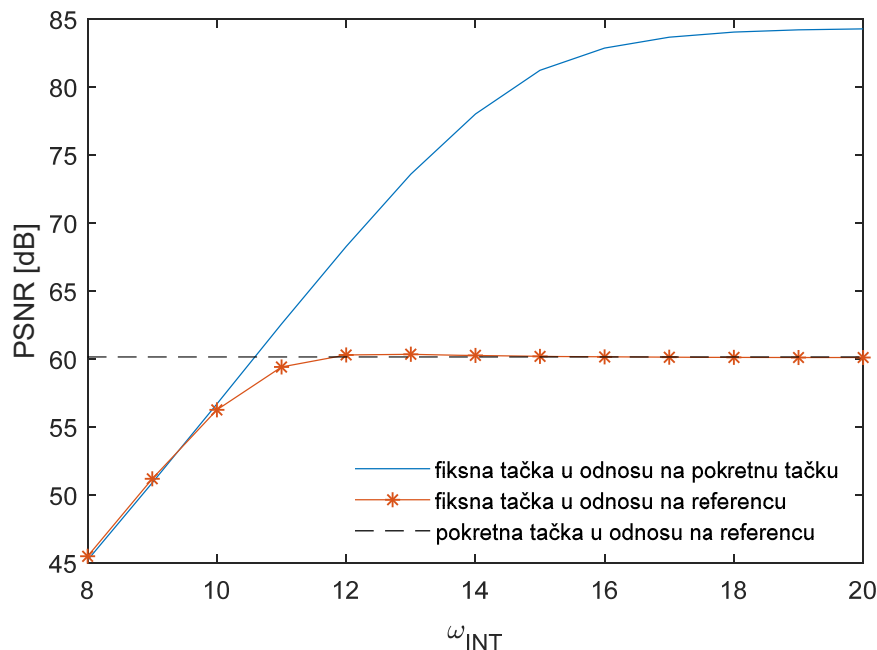
5.6 Rezultati

Predložena hardverska arhitektura unapređenog brzog vođenog filtra je skalabilna i može se prilagoditi različitim zahtevima u pogledu performansi ili veličine filtra. Kako bi se olakšalo poređenje sa postojećim rešenjima prezentovani su rezultati za filter veličine 35×35 , pri čemu se koristi decimacioni faktor $S=7$ i interni filter veličine $K=5$. Sve memorije su dimenzionisane da podrže procesiranje ulazne slike rezolucije 1920×1080 . Radi jednostavnije analize, svi rezultati su predstavljani za slučaj $I \equiv p$. Pretpostavljeno je da su bitske širine ulaznih i izlaznih podataka $\omega_{UL} = 8$ i $\omega_{IZL} = 16$ respektivno. Parametri linearnog modela a i b , računati su na bitskim širinama $\omega_A = \omega_B = 16$. Interna preciznost ω_{INT} je podešena tako da se postigne što bolji odnos između kvaliteta aproksimacije i kompleksnosti, o čemu će biti više reči u narednom odeljku. Selektivnost vođenog filtra ε je postavljena na vrednost $0.04 \cdot 256^2$. Ove podrazumevane vrednosti parametara hardverske realizacije, su korišćene prilikom generisanja svih rezultata u okviru ovog poglavlja, osim ako nije eksplicitno naglašeno drugačije.

5.6.1 Uticaj interne bitske širine na kvalitet aproksimacije

Postoje dva različita izvora grešaka u ovom sistemu, koji utiču na kvalitet aproksimacije. Prvi izvor greške predstavlja proces računanja u decimiranom domenu i on je karakteristika samog algoritma unapređenog brzog vođenog filtra. Greška koja je posledica ove aproksimacije, predstavlja gornju granicu kvaliteta, koji se može postići realizovanim hardverskim modulom. Drugi izvor greške predstavljaju konačna preciznost izračunavanja u aritmetici sa fiksnom tačkom, kao i aproksimacija nelinearne funkcije $x/(x+1)$. Kako bi se razdvojile greške koje potiču iz različitih izvora, najpre je izvršeno međusobno poređenje realizacija unapređenog brzog vođenog filtra sa pokretnom i fiksnom tačkom, kao i referentne realizacije originalnog algoritma vođenog filtra. Ova poređenja su prikazana na slici Slika 5.22 za različite vrednosti interne preciznosti ω_{INT} . Može se uočiti da iako PSNR između realizacije sa fiksnom i pokretnom tačkom unapređenog brzog vođenog filtra dostiže vrednosti od 85dB, PSNR

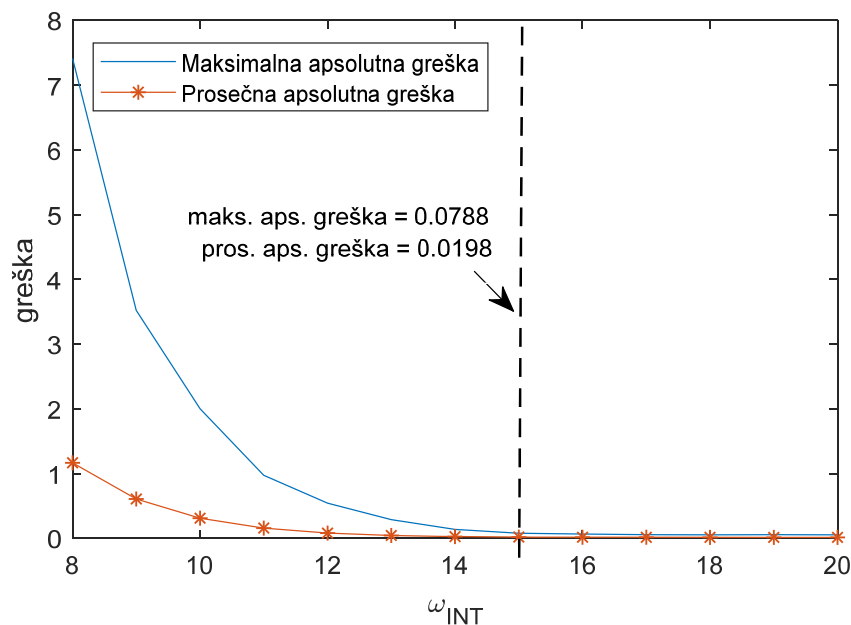
ovih realizacija u odnosu na referentni vođeni filter se zasićuje na vrednosti od 60dB. Ova vrednost predstavlja posledicu prvog izvora greške, odnosno procesa decimacije, i predstavlja gornju granicu kvaliteta aproksimacije, za ovako podešene ulazne parametre filtra.



Slika 5.22 Kvalitet aproksimacije u odnosu na originalnu realizaciju vođenog filtra.

Na osnovu prethodnog razmatranja, može se zaključiti da je za filter dimenzija 35×35 sa decimacionim faktorom $S=7$, dovoljno koristiti 12 bita interne preciznosti. Međutim, ukoliko se koristi neka druga veličina filtra, PSNR koji potiče od prvog izvora greške može porasti iznad 75dB. U tom slučaju 12 bita interne preciznosti nije dovoljno. Kako bi se odredila optimalna preciznost internih izračunavanja, kojom se realizacija sa fiksnom tačkom što više približava realizaciji sa pokretnom tačkom, posmatrana je maksimalna i prosečna apsolutna greška između ove dve realizacije. Rezultat ovog poređenja je prikazan na slici Slika 5.23. Vidi se da greška pada veoma brzo sa povećanjem interne preciznosti i da se stabilizuje negde oko 15 bita. Ovih 15 bita interne preciznosti označava PSNR od 81dB, između realizacija iFGF-a sa pokretnom i fiksnom tačkom, što je dovoljno da obezbedi kvalitet aproksimacije koji odgovara teorijskom maksimumu, a koji je ograničen procesom decimacije. U svim

narednim merenjima podrazumevana je vrednost interne preciznosti od 15 bita.

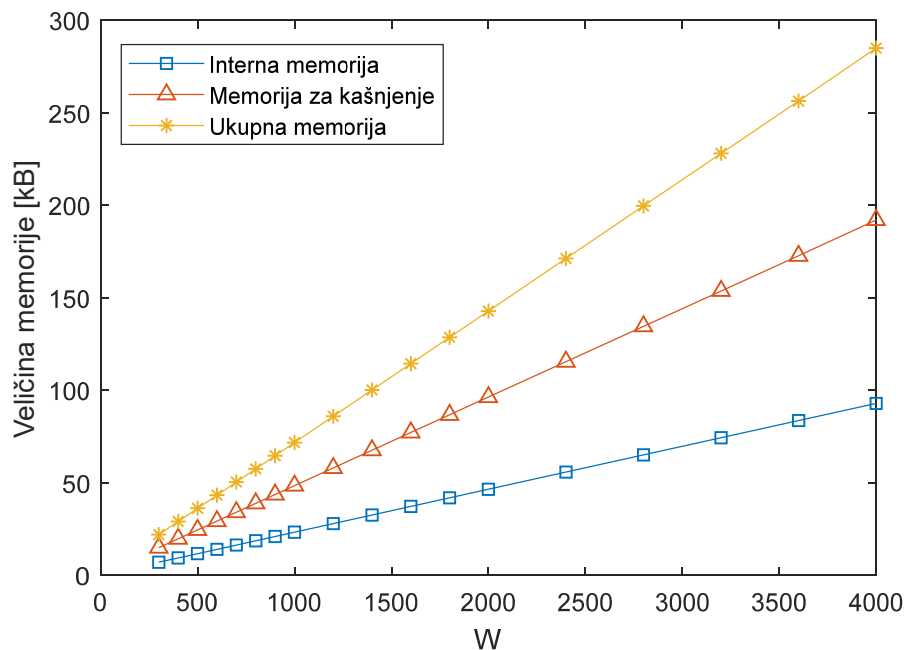


Slika 5.23 Kvalitet aproksimacije u odnosu na realizaciju unapređenog brzog vođenog filtra sa pokretnom tačkom. Ulazni pikseli su iz opsega od 0 do 255.

5.6.2 Zauzeće memorije

Zauzeće memorije za svaki od blokova u sistemu je detaljno analizirano u okviru odeljka 5.5. Korišćenjem ovih izraza, može se analizirati skalabilnost predložene hardverske realizacije, za promenu različitih parametara u sistemu. Ukupna memorija hardverskog iFGF bloka se sastoji iz dva dela. Prvi deo predstavlja interna memorija, odnosno suma memorija unutar svih blokova u sistemu. Drugi deo predstavlja memorija za kašnjenje, čija je jedina svrha da skladišti ulazne piksele dok odgovarajuće vrednosti koeficijenata a i b ne budu spremne. Ukoliko u sistemu postoji bafer u kojem je skladišten ceo ulazni frejm, memorija za kašnjenje se ne mora koristiti. Hardverska realizacija iFGF-a za filter veličine 35×35 , decimacioni faktor $S = 7$ i ulazni video 1080p zahteva 139.9kB memorije, od čega se 47.2kB koristi za internu memoriju, dok se 92.7kB koristi za memoriju za kašnjenje.

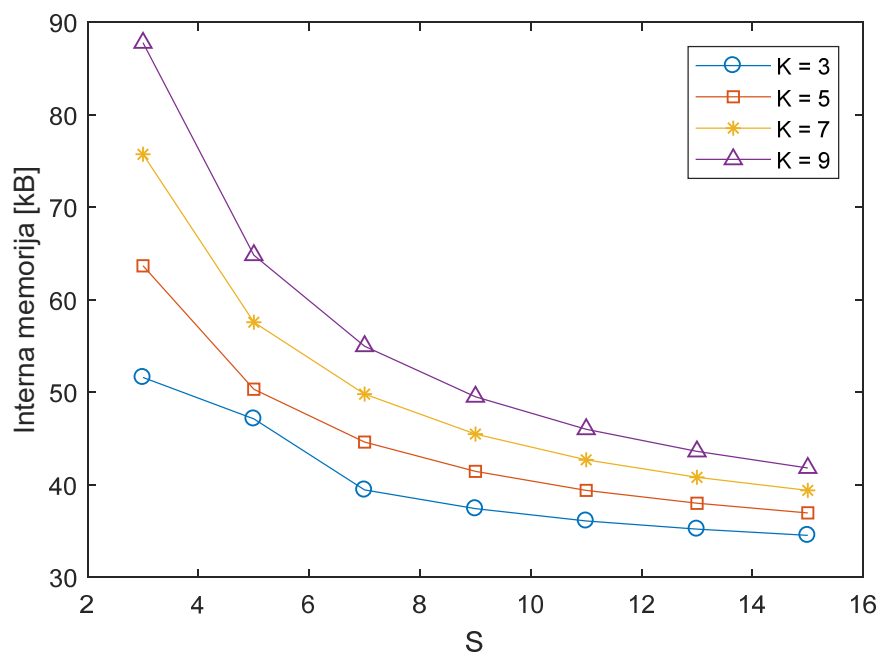
Slika 5.24 pokazuje zauzeće memorijskih resursa za različite širine ulazne slike. Zavisnost veličine memorije od širine ulazne slike je linearna, pri čemu veličina interne memorije raste dvostruko sporije od veličine memorije za kašnjenje.



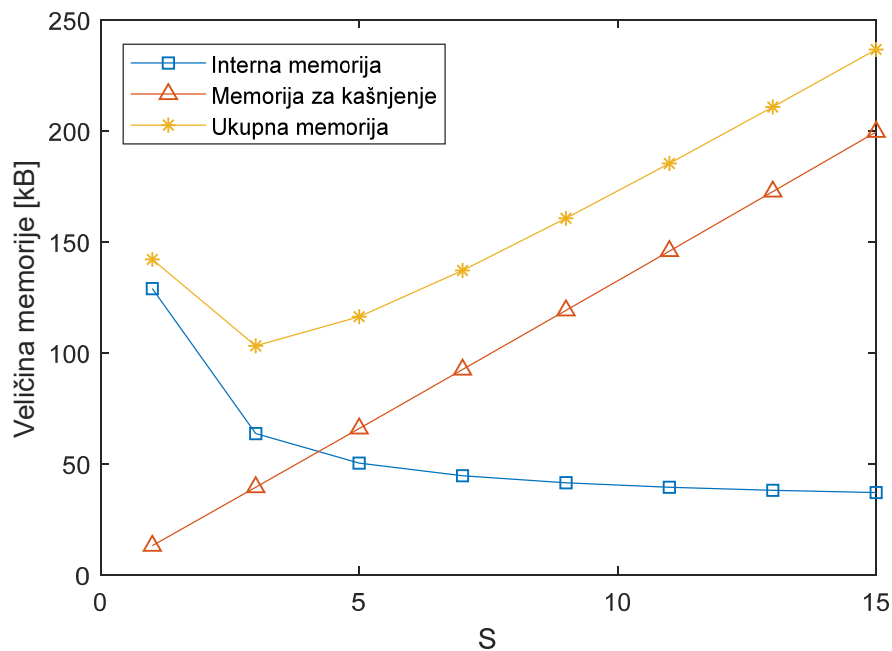
Slika 5.24 Zauzeće memorijskih resursa u funkciji od širine ulazne slike za filter veličine 35x35 i decimacionim faktorom $S=7$.

Sa povećanjem decimacionog faktora S , interna memorija se smanjuje, s obzirom da je veličina većine internih bafera jednaka W/S . Ova zavisnost je demonstrirana na slici Slika 5.25. Međutim, sa povećanjem decimacionog faktora S raste efektivna veličina filtra $R = S \cdot K$. Ovo dovodi do povećanja memorije za kašnjenje, što se može primetiti na slici Slika 5.26. Za velike decimacione faktore S , memorija za kašnjenje ima dominantan uticaj u zauzeću memorijskih resursa. Sa povećanjem veličine internog filtra K , koje je prikazano na slici Slika 5.27, linearno rastu veličine obe memorije, s tim što je rast veličine interne memorije pet puta sporiji od rasta veličine memorije za kašnjenje.

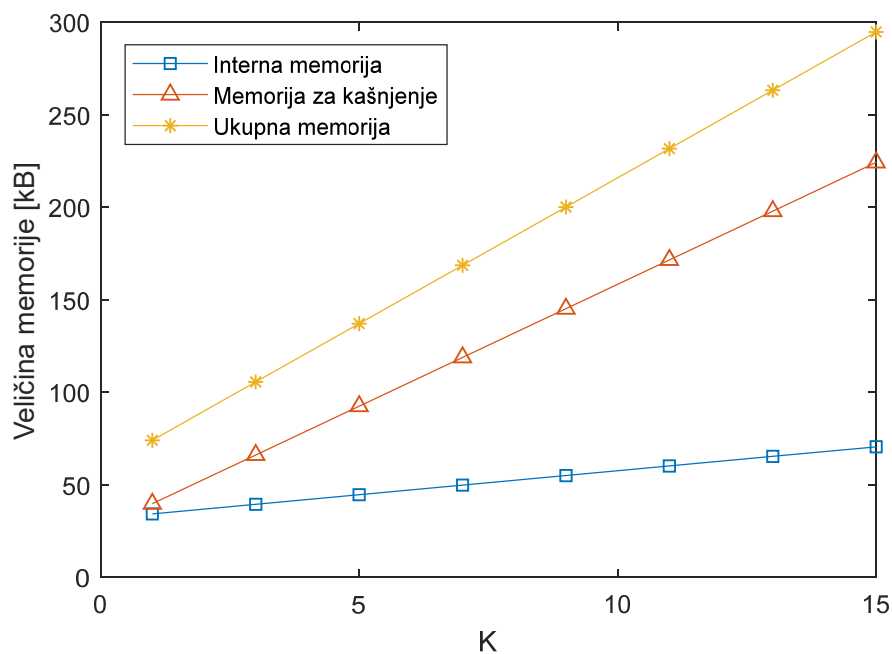
Analiza zauzeća memorijskih resursa je verifikovana sintezom iFGF bloka na FPGA platformi. Slika 5.28 prikazuje ukupno zauzeće memorijskih resursa za 1080p ulazni video i različite veličine internog filtra K u funkciji decimacionog faktora S .



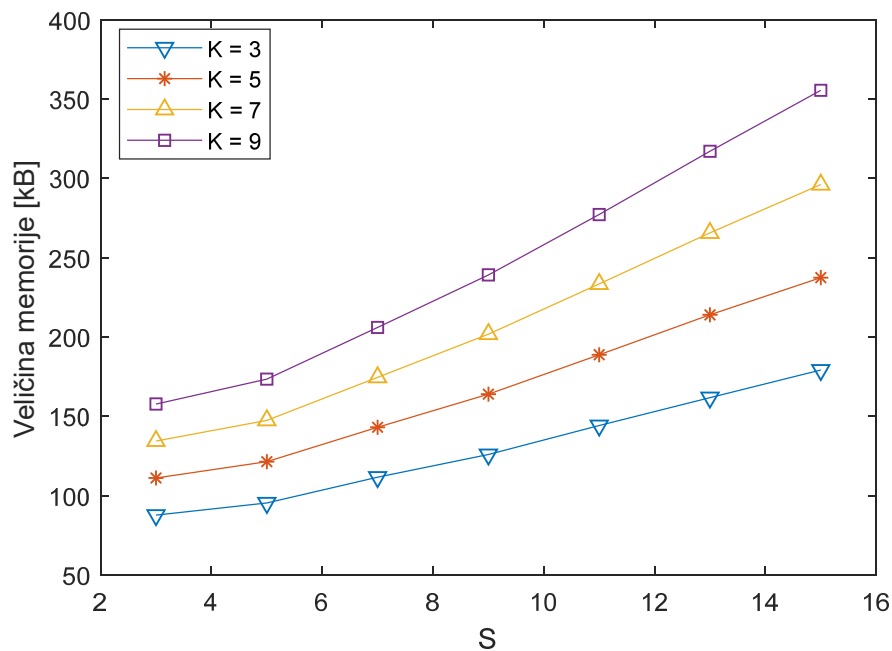
Slika 5.25 Veličina interne memorije (bez memorije za kašnjenje) za 1080p video u funkciji faktora decimacije S za različite veličine internog filtra K .



Slika 5.26 Veličina memorije u funkciji decimacionog faktora S za 1080p video i veličinu internog filtra $K=5$.



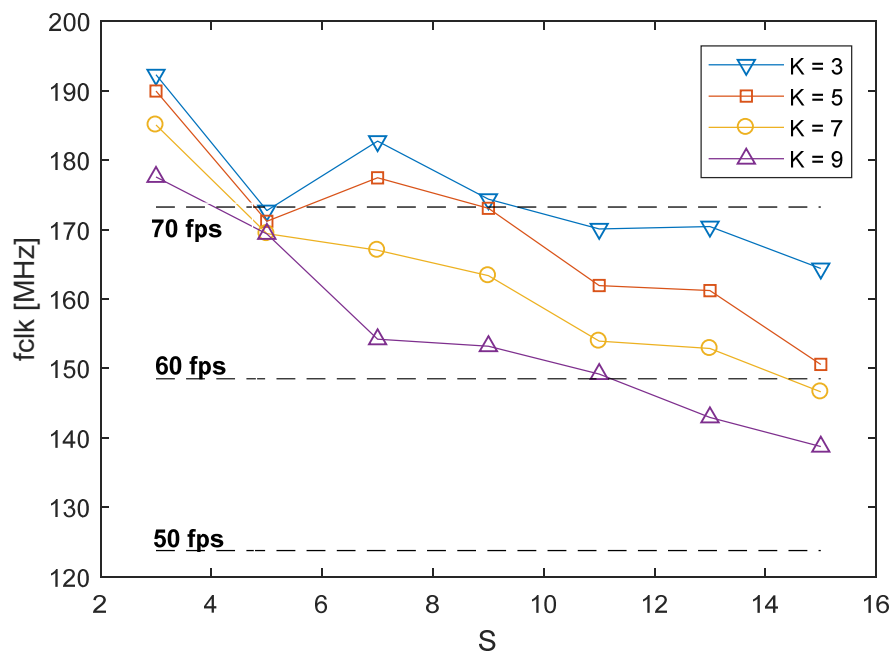
Slika 5.27 Veličina memorije u funkciji veličine internog filtra K za 1080p video i decimacioni faktor $S=7$.



Slika 5.28 Veličina memorije za 1080p video u funkciji faktora decimacije S za različite veličine internog filtra K .

5.6.3 Protok

Kako podržava protočnu obradu, koja podrazumeva da se na svaki otkucaj sistemskog takta *clk* prihvata i generiše po jedan podatak, maksimalan protok iFGF hardverskog bloka je direktno određen maksimalnom vrednošću takta koji se može postići. Slika 5.29 prikazuje maksimalne učestanosti koje su postignute na Cyclone V 5CSEMA5F31-C6 čipu, za različite vrednosti parametara *S* i *K*.



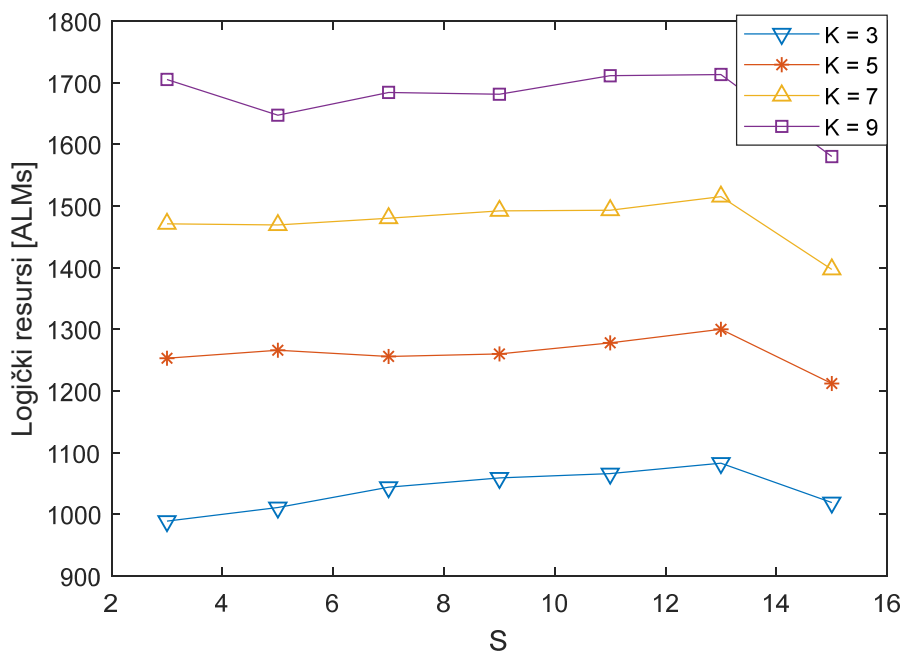
Slika 5.29 Protok iFGF hardverskog bloka za različite faktore decimacije *S* i veličine internog filtra *K* na Cyclone V FPGA čipu.

Na slici Slika 5.29 su isprekidanim linijama označene učestanosti sistemskog takta, kojim se postižu odgovarajući protoci za 1080p video. Za većinu konfiguracija filtra, predstavljeni hardverski modul postiže protok iznad 60fps za 1080p video. Ovde treba imati na umu da korišćeni FPGA čip pripada klasi Cyclone, koja nije namenjena za primene visokih performansi. Interesantno je da usko grlo sistema, koje ograničava maksimalnu učestanost takta, nije centralna logika filtra već brzina čitanja iz memorije za kašnjenje. Ovaj rezultat je zapravo posledica korišćenja S^2 puta nižeg takta u centralnom delu sistema. Na primer, za filter dimenzija 35×35 i faktor skaliranja $S=7$, maksimalni protok ostvaren na Cyclone V FPGA čipu je 71.2fps, za šta je potreban takt od 177.5MHz. Učestanost internog takta je u ovom slučaju 49 puta manja

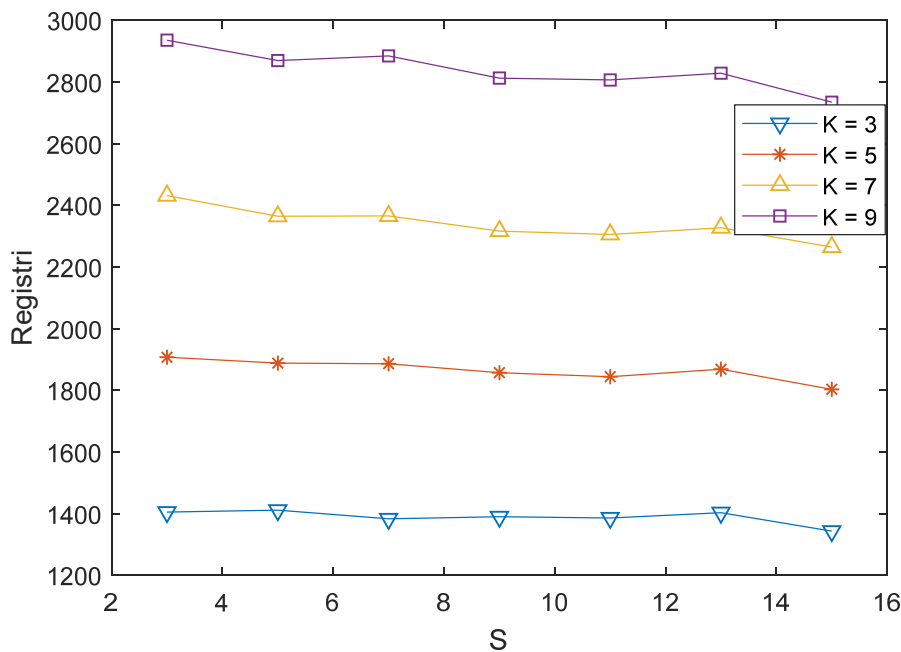
od učestanosti ulaznog takta i iznosi 3.6MHz. Na ovaj način je ostavljeno dovoljno vremena za sve signale u centralnom delu sistema da uspostave stabilne vrednosti u toku periode internog takta.

5.6.4 Zauzeće logičkih resursa i registara

Zauzeće logičkih resursa i registara na Cyclone V FPGA čipu za različite konfiguracije parametara S i K , prikazano je na slikama Slika 5.30 i Slika 5.31. Zauzeće logičkih resursa je predstavljeno kao broj adaptivnih logičkih modula (ALM-ova), koji predstavljaju osnovni gradivni blok Intel FPGA čipova, kojima pripada i Cyclone V. Može se primetiti da je sa promenom decimacionog faktora S , zauzeće resursa približno konstantno, dok raste linearno sa povećanjem veličine internog filtra K . Ovo je posledica toga što je većina logike skoncentrisana u decimiranom domenu i ne zavisi od decimacionog faktora S . Linearna promena količine resursa sa promenom veličine internog filtra K je posledica korišćenja osobine separabilnosti boks filtera i interpolacije.



Slika 5.30 Zauzeće logičkih resursa na Cyclone V FPGA čipu za različite konfiguracije parametara S i K .



Slika 5.31 Zauzeće registara na Cyclone V FPGA čipu za različite konfiguracije parametara S i K .

Tabela 5.1 prikazuje zauzeće resursa po komponentama za slučaj filtriranja 1080p ulaznog videa, filtrom dimenzija 35×35 i decimacionim faktorom $S=7$. Kako bi se svaku komponentu u sistemu identifikovala na jedinstven način, u tabeli Tabela 5.1 je korišćena sledeća notacija. U sistemu postoji tri tipa generičkih komponenti i to: decimirani boks filtri (**dbf**), interni boks filtri (**ibf**) i ineterpolacioni modul (**interp**). Svaka od ovih komponenti se koristi za procesiranje nekog od sledećeg tipa podataka: ulaznih piksela (**ul**), kvadriranih ulaznih piksela (**kv ul**), koeficijenta a (**a**) ili koeficijenta b (**b**). Tako je, na primer, decimirani boks filter, koji se koristi za filtriranje kvadriranih ulaznih podataka, označen sa **dbf kv ul**. Sufiks **dec** označava da se odgovarajuća komponenta koristi za procesiranje u decimiranom domenu, koji koristi clk_dS2 signal takta. Množenje lokalnih varijansi sa $1/\varepsilon$ i aproksimacija funkcije $x/(x+1)$ je integrisano u okviru bloka **gen a dec**. Pored ovih komponenti u sistemu postoji i memorija za kašnjenje označena kao **mem kaš**.

Tabela 5.1 Zauzeće resursa po komponentama na Cyclone V FPGA čipu.

Komponenta	ALM	Registri	DSP	Memorija (bit)
dbf ul	115.3	171	0	19182
dbf kv ul	119.2	220	1	36704
ibf ul dec	112.3	246	1	16455
ibf kv ul dec	160	381	3	32910
gen a dec	70.08	0	7	0
ibf a dec	116.6	257	1	17552
ibf b dec	114.3	239	1	17552
interp a	133.2	131	2	123200
interp b	132.9	141	2	123200
mem kaš	68.3	64	0	759328
ostalo	57.32	35	4	0
ukupno	1239.5	1885	22	1146083

5.6.5 Disipacija snage

Jedna od glavnih prednosti prikazane hardverske realizacije je upravo mala potrošnja. Ovo je posledica činjenice da se većina procesiranja obavlja u decimiranom domenu, koji koristi S^2 puta sporiji takt od sistemskog. Decimacija omogućava i upotrebu manjih memorijskih bafera i manje logičkih resursa, čime se potrošnja dodatno smanjuje. Rezultati su predstavljeni za filter dimenzija 35×35 sa decimacionim faktorom $S = 7$ na taktu od 148.5MHz, koji je potreban da bi se ostvario protok od 60fps za 1080p video. Dinamička disipacija snage, koja je postignuta za ovu konfiguraciju na Cyclone V 5CSEMA5F31-C6 čipu je 73.56mW, od čega se samo 1.93mW troši u decimiranom domenu, gde se inače obavlja većina procesiranja. Disipacija snage za navedenu konfiguraciju za različite domene takta, kao i za različite komponente u sistemu, prikazana je u tabelama Tabela 5.2 i Tabela 5.3.

Tabela 5.2 Disipacija snage po domenima takta na Cyclone V FPGA čipu.

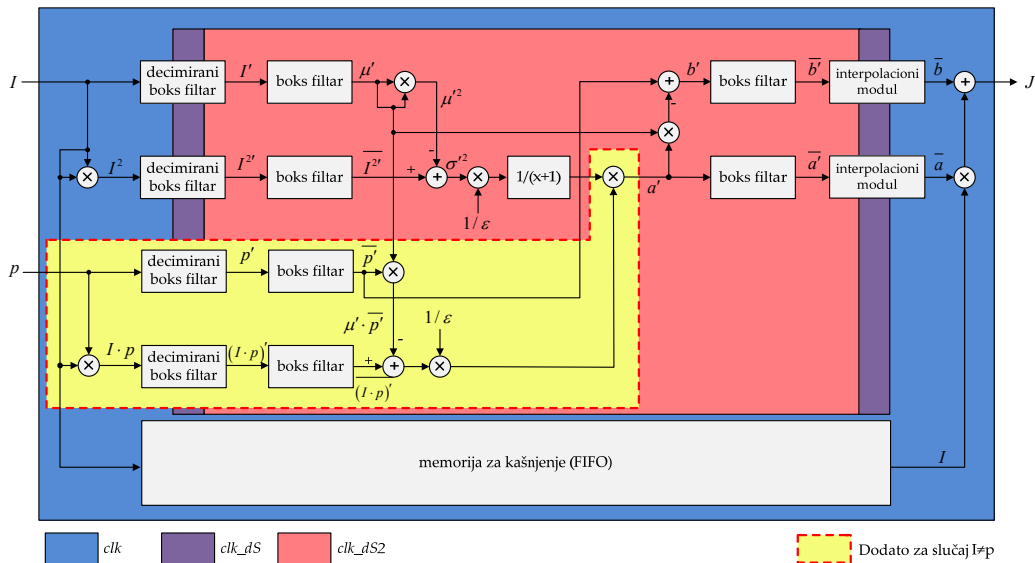
Domen takta (učestanost)	Disipacija snage
clk (148.5 MHz)	64.55 mW (87.76%)
clk_dS (21.21 MHz)	0.94 mW (1.28%)
clk_dS2 (3.03 MHz)	1.93 mW (2.63%)
ostalo	6.13 mW (8.33%)

Tabela 5.3 Disipacija snage po komponentama na Cyclone V FPGA čipu.

Komponenta	Disipacija snage
dbf ul	1.67 mW (2.3%)
dbf kv ul	2.1 mW (2.9%)
ibf ul dec	0.39 mW (0.5%)
ibf kv ul dec	0.71 mW (1%)
gen a dec	0.37 mW (0.5%)
ibf a dec	0.23 mW (0.3%)
ibf b dec	0.29 mW (0.4%)
interp a	17.7 mW (24.1%)
interp b	13.01 mW (17.7%)
mem kaš	17.09 mW (23.2%)
rutiranje	17.9 mW (24.3%)
ostalo	2.1 mW (2.9%)

5.7 Poređenja i diskusija

Proširenje arhitekture iFGF-a tako da se podrži slučaj $I \neq p$ je pravolinijsko i prikazano je na slici Slika 5.32. Dodatni elementi u odnosu na slučaj $I \equiv p$ su 2 decimirana boks filtra, 2 interna boks filtra, 1 sabirač i 3 množača. Iako se sada umesto funkcije $x/(x+I)$ u aproksimacionom modulu evaluira funkcija $I/(x+I)$, arhitektura ovog modula ostaje identična kao u prethodnom slučaju. Jedina razlika je u vrednostima koeficijenata koji se upisuju u LUT. Povećanje memorijskih resursa je minimalno, s obzirom da sve dodate komponente pripadaju decimiranom domenu. Takođe, ukupno kašnjenje sistema je nepromenjeno, s obzirom na to da su sve dodate komponente ili kombinacije ili rade u paraleli sa već postojećim komponentama. Ovo znači da veličina memorije za kašnjenje ostaje nepromenjena. Disipacija snage i zauzeće memorijskih resursa su povećani 8.3% i 5.3% respektivno. Glavni uzrok ovako malih povećanja resursa i potrošnje, je taj što su navedenom modifikacijom najzahtevniji delovi sistema, poput interpolacionih modula i memorije za kašnjenje, ostali nepromenjeni. Malo povećanje resursa i potrošnje, koje je nastalo usled ove modifikacije, sugerise da predložena arhitektura u budućnosti može da podrži i znatno kompleksnije procesiranje, dokle god se odvija unutar decimiranog domena.



Slika 5.32 Hardverska arhitektura iFGF-a za slučaj $I \neq p$. Tri različita takt domena su označena različitim bojama. Elementi koji su dodati u odnosu na slučaj $I \equiv p$ su označeni žutom bojom.

Tabela 5.4 Poređenje postojećih hardverskih realizacija vođenog filtra.

	Tseng [124]	Ttofis [127]	Kao [125]		Zhang [128]		Wu [126]	Predložena realizacija	
	$I \neq p$	$I \neq p$	$I = p$	$I \neq p$	$I = p$	$I \neq p$	$I \neq p$	$I = p$	$I \neq p$
Algoritam	Uprošćeni JBF	1.5D GF	Originalni 2D GF		Originalni 2D GF		Gradient 2D GF (decimiran)	2D iFGF (decimiran)	
Platforma	ASIC	FPGA	ASIC		ASIC		ASIC	FPGA	
Učestanost takta	200 MHz	74.25 MHz	100 MHz		297 MHz		50 MHz	148.5 MHz	
Veličina filtra	31 x 31	7 x 7	31 x 31		31 x 31		33 x 33	35 x 35	
Protok	124 Mpix/s	55 Mpix/s	62 Mpix/s		124 Mpix/s		124 Mpix/s	124 Mpix/s	
Pociranje po linijama/trakama	trake	linije	trake		linije		trake	linije	
Interna memorija	23 KB	139.2 KB ¹	2.1 KB	3.2 KB	34.1 KB	64.8 KB	2.2 KB	137.4 KB	147.3 KB
Protok ka eksternoj memoriji	1.99 GB/s ¹	N/A ²	1.72 GB/s ¹	2.09 GB/s ¹	373 MB/s	746 MB/s	Nepoznato	N/A ²	N/A ²
Potrošnja na čipu (dinamička)	Nepoznato	Nepoznato	Nepoznato	22.52 mW	18.32 mW	31.74 mW	9.85 mW	73.56 mW	79.89 mW
Potrošnja eksterne memorije	Nepoznato	N/A ²	438.6 mW ¹	505.3 mW ¹	131.5 mW	198.2 mW	Nepoznato	N/A ²	N/A ²
Ukupna potrošnja	Nepoznato	Nepoznato	> 438 mW ¹	527.82 mW ¹	149.82 mW	229.94 mW	Nepoznato	73.56 mW	79.89 mW

¹ Prikazani rezultati su normalizovani na veličinu filtra 31x31 i 1080p@60Hz procesiranje. Ovi rezultati su preuzeti iz [128].

² Nije primenljivo na navedeno realizaciju

Poređenje postojećih hardverskih realizacija vođenog filtra je prikazano u tabeli Tabela 5.4. Za poređenje su izabrane samo one realizacije koje su skalabilne i koje mogu da podrže velike filtre. Pored realizacija vođenih filtara, u tabeli je navedena i Tseng-ova realizacija bilateralnog filtra [124]. Razlog je fleksibilnost ove realizacije, kao i mogućnost da podrži filtre velikih dimenzija. Pored toga ova realizacija implementira združeni bilateralni filter (JBF – *Joint Bilateral Filter*), koji ima istu ulogu kao vođeni filter za slučaj $I \neq p$. Učestanosti takta koje su navedene u tabeli Tabela 5.4, označavaju učestanosti potrebne da se ostvare navedeni protoci. Za neke realizacije, uključujući i predstavljeni iFGF, moguće je ostvariti veće učestanosti takta od navedenih. Kako bi obezbedio bolje poređenje različitih hardverskih realizacija, Zhang je u [128] skalirao resurse i performanse postojećih rešenja tako da odgovaraju slučaju procesiranja 1080p videa brzinom 60fps korišćenjem filtra dimenzija 31×31. Ove vrednosti su takođe relevantne i za poređenje sa predstavljenim rešenjem, s obzirom da je ono namenjeno za procesiranje 1080p videa brzinom 60fps korišćenjem filtra dimenzija 35×35.

U pogledu brzine procesiranja, jedino ASIC rešenja predstavljena u [124], [126] i [128] podržavaju procesiranje 1080p videa brzinom 60fps. Rešenje koje je predstavio Kao [125], je namenjeno za procesiranje 1080p videa brzinom od 30fps, pri čemu nije

naglašeno da li je moguće ostvariti veće brzine. FPGA realizacija koju je predstavio Ttofis [127], koristi pojednostavljene originalnog algoritma vođenog filtra u kom se izlazne vrednosti koeficijenata a i b filtriraju samo u horizontalnom pravcu. Maksimalna učestanost takta, koja je postignuta u ovom rešenju iznosi 103MHz, što odgovara protoku od 41fps za 1080p video. Hardverska arhitektura brzog vođenog filtra predstavljena u ovom radu, postiže maksimalnu učestanost od 177.5MHz na Cyclone V FPGA čipu, što se preslikava u protok od 71.7fps za procesiranje 1080p videa.

Najmanje zauzeće memorije postižu rešenja predstavljena u [124], [125] i [128]. Međutim, rešenja koja obavljaju procesiranje po trakama, zahtevaju postojanje eksterne memorije u kojoj se nalazi ceo ulazni frejm, slika vodilja i međurezultati procesiranja. Procesiranje po trakama zahteva povećan protok ka eksternoj memoriji s obzirom da je potrebno obezbediti preklapanje susednih traka. Dodatna mana arhitektura, koje se baziraju na procesiranju traka je ta, što se ne mogu lako integrisati u sistem koji zahteva protočnu obradu, s obzirom da zahtevaju poseban obrazac pristupa ulaznim podacima. Sve ovo je analizirano u [128], pri čemu je predložena nova arhitektura bazirana na procesiranju linija, sa značajno smanjenim protokom ka eksternoj memoriji i potrošnjom snage. Posledica prelaska sa procesiranja po trakama na procesiranje po linijama je povećanje zahteva za internom memorijom. Međutim, i kod ovog rešenja slika vodilja I je skladištena u eksternoj memoriji. Ukoliko se smatra da postoji eksterna memorija, u kojoj se nalazi slika vodilja I , iz predložene arhitekture iFGF-a se može isključiti memorija za kašnjenje, s obzirom da se ona koristi upravo za čuvanje vrednosti slike vodilje. U tom slučaju veličina interne memorije predstavljenog rešenja iznosi 55kB za slučaj $I \neq p$, što je 14% manje od zauzeća interne memorije u [128]. U slučaju korišćenja eksterne memorije za skladištenje slike vodilje, predstavljeno rešenje zahteva veoma ograničen protok ka eksternoj memoriji, koji se sastoji iz svega 2 operacije čitanja po pikselu ulazne slike. U slučaju procesiranja 1080p videa brzinom 60fps, ovo odgovara protoku ka eksternoj memoriji od 237.3MB/s što je 68% manje od rešenja predloženog u [128]. Jedino skalabilno rešenje koje podržava filtre velikih dimenzija i ne zahteva postojanje eksterne memorije predstavljeno je u [127]. Ovo rešenje zahteva 139.2kB interne memorije. Manje zauzeće memorije postignuto je izbacivanjem koraka vertikalnog usrednjavanja koeficijenata a i b , čime se znatno ograničava primenljivost ovog filtra. Izbacivanje koraka vertikalnog filtriranja u

predstavljenoj realizaciji podrazumevalo bi pojednostavljenje blokova internih boks filtera, koji se koriste na izlazu tako da obavljaju usrednjavanje samo u horizontalnom pravcu. Ukidanje vertikalnog usrednjavanja omogućava uklanjanje linijskih bafera iz ovih modula, čime se postiže ušteda u memoriji od 34.3kB. Uklanjanje vertikalnog usrednjavanja povlači smanjenje kašnjenja ovih blokova za $\frac{K-1}{2}W \cdot S$ ciklusa takta, što u navedenoj konfiguraciji povlači smanjenje veličine memorije za kašnjenje za 29.5kB. Dakle, ukoliko bi se uklonio proces vertikalnog usrednjavanja koeficijenta a i b , zahtevi za internom memorijom u predloženoj arhitekturi padaju na 84.3kB što je 40% manje od memorije korišćene u [127].

Po pitanju dinamičke potrošnje snage, predstavljeno rešenje postiže 65% manju potrošnju za slučaj $I \neq p$ i 51% manju potrošnju za slučaj $I \equiv p$ od trenutno najboljeg postojećeg rešenja [128].

6 ZAKLJUČAK

U ovoj disertaciji predložen je lokalni operator za redukciju dinamičkog opsega slike uz očuvanje detalja. Operator za redukciju dinamičkog opsega, predstavlja ključnu komponentu sistema za reprodukciju slika i video signala širokog dinamičkog opsega (HDR), na standardnim displejima nižeg dinamičkog opsega (LDR). Osnovni cilj ove disertacije je bio da se predloži robusno i fleksibilno rešenje, koje se može koristiti u okviru najrazličitijih uređaja široke potrošnje.

Operatori za redukciju dinamičkog opsega HDR slika se mogu podeliti na globalne i lokalne operatore. Globalni operatori koriste prostorno invarijanto mapiranje slike, ne uzimajući u obzir lokalne karakteristike scene. Ovi operatori su robusni, niske kompleksnosti i omogućavaju jednostavno podešavanje izgleda izlazne slike, kontrolom malog broja parametara. Osnovni problem globalnih operatora je taj da imaju tendenciju potiskivanja detalja, pogotovo u svetlim regionima scene. Lokalni operatori s druge strane, koriste složenije postupke, kako bi u procesiranje uključili lokalne karakteristike scene i na taj način obezbedili očuvanje detalja i lokalnog kontrasta. Iako imaju mogućnost generisanja slike superiornijeg kvaliteta, u odnosu na globalne operatore, pogotovo kada je u pitanju reprodukcija detalja, lokalni operatori često nisu robusni i imaju značajno veću kompleksnost. Takođe, nijedan od analiziranih lokalnih operatora ne omogućava nezavisno podešavanje različitih aspekata izlazne scene, kao što su osvetljaj, oštrina i lokalni kontrast, s obzirom da parametri koji se koriste utiču na više aspekata scene istovremeno. Ovaj uticaj parametara operatora na više aspekata scene

istovremeno, značajno otežava podešavanje željenog izgleda izlazne slike.

Predloženi operator kombinuje najbolje pristupe lokalnih i globalnih operatora, kako bi se obezbedilo robusno i fleksibilno rešenje, koje ima mogućnost očuvanja detalja. Očuvanje detalja se postiže dekompozicijom ulazne slike na bazni sloj, koji sadrži informaciju o osvetljaju i dva sloja detalja, pri čemu se proces redukcije dinamičkog opsega obavlja samo na baznom sloju. Ovakav pristup omogućava da se proces redukcije dinamičkog opsega kontroliše na identičan način kao kod globalnih operatora. Iako je pristup dekompozicije već poznat u literaturi, predloženi operator unapređuje proces redukcije dinamičkog opsega, deljenjem procesiranja na logaritamski i linearni domen. Prilagođavanje dinamičkog opsega baznog sloja u logaritamskom domenu, obezbeđuje robusnost operatora, dok popravka kontrasta u linearnom domenu prilagođava bazni sloj, tako da se postigne što bolja reprodukcija detalja. Korišćenje dva sloja detalja umesto jednog, što se uobičajeno koristi u postojećim rešenjima, omogućava nezavisno podešavanje oštine i lokalnog kontrasta, koji zapravo predstavljaju dva različita aspekta izlazne slike. Predloženi operator ima mogućnost nezavisnog podešavanja izlaznog osvetljaja, oštine, lokalnog kontrasta, odnosa između lokalnog i globalnog kontrasta kao i zasićenosti boja. Na taj način je omogućeno jednostavno postizanje željenog izgleda izlazne slike.

Robusnost predloženog rešenja je demonstrirana na bazi od 50 HDR slika, prikupljenih iz najrazličitijih javno dostupnih izvora. U procesu poređenja korišćeno je 7 postojećih rešenja, i to 3 globalna i 4 lokalna. Ovi operatori su izabrani kao predstavnici glavnih pristupa problemu redukcije dinamičkog opsega. Prilikom evaluacije performansi, korišćeno je 9 različitih objektivnih metrika kvaliteta. Testovi su sprovedeni tako što je za svaku sekvencu, svakom od operatora dodeljivan rang u zavisnosti od rezultata odgovarajuće metrike. Operator koji je postigao najbolje rezultate dobija rang 1, dok operator koji je postigao najlošije performanse dobija rang 8. Testiranja su pokazala da predloženi operator ima najbolje karakteristike po pitanju kvaliteta izlaznih slika, s obzirom da je prosečan rang koji je ostvaren na celoj bazi i po svim metrikama 2.74, dok prvi naredni operator ima rang 3.96. U radu je primećeno da performanse predloženog operatora degradiraju u slučaju scena ekstremnih osvetljaja, izrazito svetlih i tamnih, zbog čega je predložena automatska korekcija parametra osvetljaja. Uvođenjem ove korekcije, performanse predloženog operatora se značajno

poboljšavaju, pri čemu je ostvareni rang na celoj bazi u ovom slučaju 1.84, dok prvi sledeći operator ima rang 4.15.

Dalje je analizirana mogućnost primene predloženog operatora na reprodukciju HDR video sekvenci. Redukcija dinamičkog opsega video sekvenci predstavlja poseban izazov, s obzirom da se pored robusnosti zahteva i temporalna konzistentnost. Ona podrazumeva da se osvetljaji dva susedna frejma izlazne video sekvence ne smeju previše razlikovati, pošto se u suprotnom može javiti treperenje izlaznog videa tokom reprodukcije. Kontrola globalnih operatora se obično postiže jednostavnim temporalnim filtriranjem parametara globalne funkcije. Kontrola lokalnih operatora je složenija, s obzirom da temporalno filtriranje parametara, koji zavise od lokalnih karakteristika scene, može dovesti do niza artefakata u izlaznoj video sekvenci. Kako se redukcija dinamičkog opsega kod predloženog operatora zapravo obavlja globalnom funkcijom mapiranja baznog sloja, kontrola ovih parametara se postiže veoma jednostavno, na identičan način kao kod globalnih operatora.

Operatori koji se koriste za mapiranje HDR videa obično se projektuju ili sa ciljem temporalne adaptivnosti ili sa ciljem temporalne koherentnosti. Temporalna adaptivnost podrazumeva da se operator prilagođava trenutnom osvetljaju scene, tako da se u svakom trenutku postigne što bolja reprodukcija u pogledu lokalnog i globalnog kontrasta. Ovim se međutim u procesu redukcije dinamičkog opsega gubi informacija o realnom odnosu osvetljaja između dva frejma video sekvence. Odnos između osvetljaja dva frejma video sekvence naziva se temporalni kontrast. Temporalna koherentnost podrazumeva očuvanje poretka osvetljaja između frejmova video sekvence, u procesu redukcije dinamičkog opsega. Prostorni i temporalni kontrast se ne mogu postići istovremeno. To je razlog zbog kojeg se postojeći operatori kreiraju tako da se prioritet postavlja na jednu ili na drugu stranu. U ovom radu je predložena fleksibilna temporalna kontrola, koja omogućava da se pomoću istog operatora, promenom parametra adaptacije, postigne maksimalni prostorni kontrast, maksimalni temporalni kontrast ili neki odnos između ova dva. Rezultati temporalne kontrole predloženog operatora, verifikovani su na javno dostupnoj bazi HDR video sekvenci i upoređeni po pitanju temporalne koherentnosti i prostornog kontrasta sa 9 postojećih operatora, namenjenih za reprodukciju HDR video sekvenci. Pokazano je da se korišćenjem predložene temporalne kontrole, predloženi operator može prilagoditi da daje rešenja

slična temporalno adaptivnim ili temporalno koherentnim operatorima.

U poslednjem delu rada je analizirana mogućnost efikasne realizacije predloženog operatora. Najzahtevniji korak predstavlja postupak dekompozicije na bazni sloj i sloj detalja koji se bazira na upotrebi velikih filtara osetljivih na ivice. Analizirana je mogućnost efikasne realizacije ovih filtara i predloženo je korišćenje brzog vođenog filtra. Ovaj filter podrazumeva korišćenje procesa decimacije, kako bi se efikasno izračunali filteri velikih dimenzija. Detaljno su analizirane karakteristike ove aproksimacije za različite vrednosti parametara. Predloženo je unapređenje algoritma vođenog filtra, dodavanjem operacije filtriranja pre prelaska na manju rezoluciju, što nije uključeno u osnovni algoritam brzog vođenog filtra. Pokazano je da se na ovaj način kvalitet aproksimacije u proseku poboljšava za 21dB. Kako je dodati korak filtriranja praćen decimacijom, on se može dosta efikasno izračunati.

Na kraju je predložena hardverska arhitektura unapređenog algoritma brzog vođenog filtra. Ova arhitektura se bazira na protočnoj obradi bez zahteva za eksternim memorijama, čime se omogućava jednostavna integracija u postojeće sisteme. Algoritam brzog vođenog filtra podrazumeva da se većina procesiranja obavlja u decimiranom domenu, gde je moguće koristiti značajno manji takt od ulaznog. Korišćenje decimiranog domena dodatno smanjuje količinu potrebnih memorijskih i logičkih resursa. Takođe, upotreba takta niske učestanosti za najveći deo procesiranja, značajno smanjuje potrošnju snage u sistemu. Pokazano je da predložena hardverska arhitektura postiže protoke, koji su dovoljni za procesiranje video signala rezolucije 1920×1080 u realnom vremenu, brzinom od 60 frejmova po sekundi, na FPGA čipu nižeg cenovnog ranga. Postojeća hardverska rešenja koja postižu ove protoke su ASIC tipa. Takođe je pokazano da predloženo rešenje ima manje zauzeće memorijskih resursa i značajno manju potrošnju u odnosu na postojeća hardverska rešenja.

Imajući u vidu prikazane rezultate, može se zaključiti da lokalni operator ima mogućnost robusne reprodukcije HDR slika uz očuvanje detalja. Fleksibilnost operatora, koja se ogleda u mogućnosti nezavisne kontrole različitih aspekata izlazne slike, ga kvalifikuje za upotrebu u različitim proizvodima široke namene. Fleksibilna temporalna kontrola omogućava upotrebu ovog operatora u reprodukciji HDR videa. Pri tom je omogućeno postizanje željenog odnosa temporalne adaptivnosti i koherentnosti. I

na kraju, predstavljena hardverska arhitektura unapređenog brzog vođenog filtra, otvara mogućnost za primenu ovog operatora u namenskim rešenjima u kojima se zahteva rad u realnom vremenu i smanjena potrošnja.

LITERATURA

- [1] T. Kunkel i E. Reinhard, „A reassessment of the simultaneous dynamic range of human visual system,“ u *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, Los Angeles, California, 2010.
- [2] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, W. Heidrich i K. Myszkowski, *High dynamic range imaging*, Elsevier, 2010.
- [3] M. D. Fairchild, *Color appearance models*, John Wiley & Sons, 2013.
- [4] E. Reinhard, E. A. Khan, E. A. Akyz i G. M. Johnson, *Color Imaging: Fundamentals and Applications*, Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd., 2008.
- [5] R. K. Mantiuk, K. Myszkowski i H.-P. Seidel, „High Dynamic Range Imaging,“ u *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wiley, 2016.
- [6] A. Darmont, *High Dynamic Range Imaging Sensors and Architectures*, Bellingham, Washington USA: SPIE, 2013.
- [7] F. S. Campos, O. Marinov, N. Faramarzpour, F. Saffih, J. M. Deen i J. W. Swart, „A multisampling time-domain CMOS imager with synchronous readout circuit,“ *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, pp. 53-58, 2008.

- [8] B. Hoefflinger, High-Dynamic-Range (HDR) Vision, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [9] Y. Ni, „QLog Solar-Cell Mode Photodiode Logarithmic CMOS Pixel Using Charge Compression and Readout,“ *Sensors*, t. 2, br. 18, 2018.
- [10] S. K. Nayar i T. Mitsuanga, „High Dynamic Range Imaging: Spatially Varying Pixel Exposures,“ u *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Hilton Head Island, SC, USA, 2000.
- [11] C.-H. Cheng, O. C. Au, N.-M. Cheung, C.-H. Liu i K.-Y. Yip, „High Dynamic Range image capturing by Spatial Varying Exposed Color Filter Array with specific Demosaicking Algorithm,“ u *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 2009*, Victoria, BC, Canada, 2009.
- [12] S. K. Nayar i V. Branzoi, „Adaptive dynamic range imaging: optical control of pixel exposures over space and time,“ u *Proceedings. 9th IEEE International Conference on Computer Vision, 2003*, Nice, France, 2003.
- [13] F. Dufaux, P. Le Callet, R. K. Mantiuk i M. Mrak, High Dynamic Range Video: From Acquisition to Display and Applications, Elsevier, 2016.
- [14] P. E. Debevec i J. Malik, „Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,“ u *ACM SIGGRAPH97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1997.
- [15] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, 2010.
- [16] O. T. Tursun, A. O. Akyuz, A. Erdem i E. Erdem, „The State of the Art in HDR Deghosting: A Survey and Evaluation,“ *EUROGRAPHICS - Journal Computer Graphics Forum*, t. 34, br. 2, pp. 683-707, 2015.
- [17] T. Mitsunaga i S. K. Nayar, „Radiometric self calibration,“ u *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999.
- [18] D. M. Grossberg i K. S. Nayar, „What Can Be Known about the Radiometric

Response from Images?,” u *European Conference on Computer Vision*, 2002.

- [19] M. Granados, B. Ajdin, M. Wand, C. Theobalt, H.-P. Seidel i H. P. A. Lensch, „Optimal HDR reconstruction with linear digital cameras,” u *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, San Francisco, CA, USA, 2010.
- [20] G. Eilertsen, R. Mantiuk i J. Unger, „A comparative review of tone-mapping algorithms for high dynamic range video,” *Journal Computer Graphics Forum*, t. 36, br. 2, pp. 565-592, 2017.
- [21] A. Yoshida, R. Mantiuk, K. Myszkowski i H.-P. Seidel, „Analysis of Reproducing Real-World Appearance on Displays of Varying Dynamic Range,” *Eurographics - Computer Graphics Forum*, t. 25, br. 3, 2006.
- [22] J. Tumblin i H. Rushmeier, „Tone Reproduction for Realistic Images,” *Computer Graphics and Applications*, pp. 42-48, 1993.
- [23] C. Schlick, „Quantization Techniques for Visualization of High Dynamic Range Pictures,” *Eurographics Photorealistic Rendering Techniques*, pp. 7-20, 1994.
- [24] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen i N. Chiba, „Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes,” *Eurographics - Computer Graphics Forum*, t. 22, br. 3, 2003.
- [25] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley i J. Ferwerda, „Photographic tone reproduction for digital images,” *ACM Transactions on Graphics*, t. 21, br. 3, pp. 267-276, 2002.
- [26] G. Ward Larson, H. Rushmeier i C. Piatko, „A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, t. 3, br. 4, pp. 291-306, 1997.
- [27] R. Mantiuk, S. Daly i L. Kerofsky, „Display adaptive tone mapping,” *ACM Transactions on Graphics*, t. 27, br. 3, p. 68, 2008.
- [28] H. R. Wilson, „A transducer function for threshold and suprathreshold human

- vision," *Biological Cybernetics*, t. 38, br. 3, pp. 171-178, 1980.
- [29] J. Tumblin i G. Turk, „LCIS: a boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction," u *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1999.
 - [30] R. Mantiuk, R. Mantiuk, A. Tomaszewska i W. Heidrich, „Color correction in tone mapping," *Eurographics - Computer Graphics Forum*, t. 28, br. 2, 2009.
 - [31] K. Chiu, M. Herf, P. Shirley, S. Swamy, C. Wang i K. Zimmerman, „Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images," u *Proceedings of Graphics Interface*, 1993.
 - [32] J. W. Lee, R.-H. Park i S. Chang, „Local tone mapping using the K-means algorithm and automatic gamma setting," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, t. 57, br. 1, 2011.
 - [33] P. Perona i J. Malik, „Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, t. 12, br. 7, pp. 629-639, 1990.
 - [34] C. Tomasi i R. Manduchi, „Bilateral Filtering for Gray and Color Images," u *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision*, Bombay, India, 1998.
 - [35] S. Paris, P. Kornprobst, J. Tumblin i F. Durand, „Bilateral Filtering: Theory and Applications," *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, t. 4, br. 1, pp. 1-73, 2009.
 - [36] Z. Farbman, R. Fattal, D. Lischinski i R. Szeliski, „Edge-Preserving Decompositions for Multi-Scale Tone and Detail Manipulation," *ACM Transactions on Graphics*, t. 27, br. 3, p. 67, 2008.
 - [37] B. Gu, W. Li, M. Zhu i M. Wang, „Local Edge-Preserving Multiscale Decomposition for High Dynamic Range Image Tone Mapping," *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 22, br. 1, pp. 70-79, 2013.

- [38] T. Qiu, A. Wang, N. Yu i A. Song, „LLSURE: Local Linear SURE-Based Edge-Preserving Image Filtering,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 22, br. 1, pp. 80-90, 2013.
- [39] L. Xu, C. Lu, Y. Xu i J. Jia, „Image smoothing via L0 gradient minimization,“ *ACM Transactions on Graphics*, p. 174, 2011.
- [40] K. He, J. Sun i X. Tang, „Guided Image Filtering,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, t. 35, br. 6, pp. 1397-1409, 2013.
- [41] T. Stockham, „Image processing in the context of a visual model,“ *Proceedings of the IEEE*, t. 60, br. 7, pp. 828-842, 1972.
- [42] S. N. Pattanaik, J. A. Ferwerda, M. D. Fairchild i D. P. Greenberg, „A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display,“ u *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1998.
- [43] Y. Li, L. Sharan i E. H. Adelson, „Compressing and companding high dynamic range images with subband architectures,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 24, br. 3, pp. 836-844, 2005.
- [44] S. Paris, S. W. Hasinoff i J. Kautz, „Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 30, br. 4, p. 68, 2011.
- [45] F. Durand i J. Dorsey, „Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 21, br. 3, pp. 257-266, 2002.
- [46] E. P. Bennett i L. McMillan, „Video enhancement using per-pixel virtual exposures,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 24, br. 3, pp. 845-852, 2005.
- [47] D. J. Jobson, Z.-u. Rahman i G. A. Woodell, „Properties and performance of a center/surround retinex,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 6, br. 3, pp. 451-462, 1997.
- [48] D. J. Jobson, Z.-u. Rahman i G. A. Woodell, „A multiscale retinex for bridging

- the gap between color images and the human observation of scenes,” *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 6, br. 7, pp. 965-976, 1997.
- [49] B. J. Lee i B. C. Song, „Local tone mapping using sub-band decomposed multi-scale retinex for high dynamic range images,” u *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, 2014.
 - [50] E. Zhang, H. Yang i M. Xu, „A Novel Tone Mapping Method for High Dynamic Range Image by Incorporating Edge-Preserving Filter Into Method Based on Retinex,” *Applied Mathematics & Information Sciences*, t. 9, br. 1, pp. 411-417, 2015.
 - [51] L. Tan, X. Liu i K. Xue, „A Retinex-Based Local Tone Mapping Algorithm Using L0 Smoothing Filter,” *Advances in Image and Graphics Technologies*, t. 437, pp. 40-47, 2014.
 - [52] L. Meylan i S. Susstrunk, „High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter,” *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 15, br. 9, pp. 2820-2830, 2006.
 - [53] H. Ahn, B. Keum, D. Kim i H. S. Lee, „Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images,” u *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, 2013.
 - [54] K. Kim, J. Bae i J. Kim, „Natural hdr image tone mapping based on retinex,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, t. 57, br. 4, 2011.
 - [55] R. Fattal, D. Lischinski i M. Werman, „Gradient domain high dynamic range compression,” *ACM Transactions on Graphics*, t. 21, br. 3, pp. 249-256, 2002.
 - [56] R. Mantiuk, K. Myszkowski i H.-P. Seidel, „A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images,” *ACM Transactions on Applied Perception*, t. 3, br. 3, pp. 286-308, 2006.
 - [57] M. D. Fairchild i G. M. Johnson, „Meet iCAM: A Next-Generation Color Appearance Model,” u *The Tenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering*, Scottsdale, Arizona, USA, 2002.

- [58] J. Kuang, G. M. Johnson i M. D. Fairchild, „iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering,“ *Journal of Visual Communication and Image Representation*, t. 18, br. 5, pp. 406-414, 2007.
- [59] A. Boschetti, N. Adami, R. Leonardi i M. Okuda, „High Dynamic Range image tone mapping based on local Histogram Equalization,“ u *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, Suntec City, Singapore, 2010.
- [60] Y. Kimura i M. Ikebe, „Halo control for LHE based local adaptive tone mapping,“ u *2015*, Quebec City, QC, Canada, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP).
- [61] J. Duan, M. Bressan, C. Dance i Q. Guoping, „Tone-mapping high dynamic range images by novel histogram adjustment,“ *Pattern Recognition*, t. 43, br. 5, pp. 1847-1862, 2010.
- [62] S. Shimoyama, M. Igarashi, M. Ikebe i J. Motohisa, „Local adaptive tone mapping with composite multiple gamma functions,“ u *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Cairo, Egypt, 2009.
- [63] M. Qiao i M. K. Ng, „Tone mapping for high-dynamic-range images using localized gamma correction,“ *Journal of Electronic Imaging*, t. 24, br. 1, 2015.
- [64] G. Eilertsen, R. K. Mantiuk i j. Unger, „Real-time noise-aware tone mapping,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 34, br. 6, p. 198, 2015.
- [65] P. Ledda, A. Chalmers, T. Troscianko i H. Seetzen, „Evaluation of tone mapping operators using a High Dynamic Range display,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 24, br. 3, pp. 640-648, 2005.
- [66] A. Yoshida, V. Blanz, K. Myszkowski i H.-P. Seidel, „Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes,“ u *Proc. SPIE 5666, Human Vision and Electronic Imaging X*, 2005.
- [67] L. Lenzen i M. Christmann, „Subjective viewer preference model for automatic HDR down conversion,“ *Electronic Imaging, Image Quality and System Performance XIV*, t. 7, pp. 191-197, 2017.

- [68] D. El Mezeni, N. Tonic i S. Rakic, „Spatially adaptive tone mapping for display of high dynamic range (HDR) images“. United States of America Patent 9621767, 11 April 2017.
- [69] D. El Mezeni i L. Saranovac, „Enhanced local tone mapping for detail preserving reproduction of high dynamic range images“, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, t. 53, pp. 122-133, 2018.
- [70] M. Fairchild, „The HDR Photographic Survey“, 2008. [Na mreži]. Available: <http://rit-mcs1.org/fairchild/HDRPS/HDRthumbs.html>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [71] M. Cadik, „Evaluation of tone mapping operators“, 2005. [Na mreži]. Available: <http://cadik.posvete.cz/tmo/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [72] P. E. Debevec, „Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs“, 1997. [Na mreži]. Available: <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/#radiancemaps>. [Poslednji pristup 27 mart 2017].
- [73] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen i N. Chiba, „Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes“, 2003. [Na mreži]. Available: <http://resources.mpi-inf.mpg.de/tmo/logmap/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [74] F. Durand i J. Dorsey, „Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images“, MIT LCS, 2003. [Na mreži]. Available: <https://people.csail.mit.edu/fredo/PUBLI/Siggraph2002/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [75] „EMPA HDR images dataset“, 2013. [Na mreži]. Available: <http://www.empamedia.ethz.ch/hdrdatabase/index.php>. [Poslednji pristup 20 septembar 2017].
- [76] R. Fattal, „High Dynamic Range Data“, 2002. [Na mreži]. Available: <http://www.cs.huji.ac.il/~danix/hdr/results.html>. [Poslednji pristup 25 mart 2018].
- [77] H. Yeganeh i Z. Wang, „Subject-rated image database of tone-mapped images“,

2012. [Na mreži]. Available: <https://ece.uwaterloo.ca/~z70wang/research/tmqi/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [78] E. Reinhard, „High Dynamic Range Data,“ 2009. [Na mreži]. Available: <http://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/hdr/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [79] „Luminance HDR,“ Open Source Community, 2014. [Na mreži]. Available: <http://qtpfsgui.sourceforge.net/>. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [80] J. Kuang i M. Fairchild, „High-Dynamic-Range (HDR) Image Rendering,“ Munsell Color Science Laboratory, 2007. [Na mreži]. Available: https://www.rit.edu/cos/colorscience/re_iCAM06.php. [Poslednji pristup 27 mart 2018].
- [81] T. O. Aydin, R. Mantiuk, K. Myszkowski i H.-P. Seidel, „Dynamic Range Independent Image Quality Assessment,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 27, br. 3, p. 69, 2008.
- [82] R. Mantiuk, K. J. Kim, A. G. Rempel i W. Heidrich, „HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 30, br. 4, p. 40, 2011.
- [83] H. Yeganeh i Z. Wang, „Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 22, br. 2, pp. 657-667, 2013.
- [84] H. R. Nasrinpour i N. D. B. Bruce, „Saliency weighted quality assessment of tone-mapped images,“ u *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Quebec City, QC, Canada, 2015.
- [85] D. Kundu i B. L. Evans, „Visual attention guided quality assessment of Tone-Mapped images using scene statistics,“ u *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA, 2016.
- [86] K. Ma, H. Yeganeh , K. Zeng i Z. Wang, „High Dynamic Range Image Compression by Optimizing Tone Mapped Image Quality Index,“ *IEEE Transactions on Image Processing* , t. 24, br. 10, pp. 3086-3097, 2015.

- [87] H. Z. Nafchi , A. Shahkolaei, R. F. Moghaddam i M. Cheriet, „FSITM: A Feature Similarity Index For Tone-Mapped Images,“ *IEEE Signal Processing Letters*, t. 22, br. 8, pp. 1026-1029, 2015.
- [88] L. Krasula, M. Narwaria, K. Fliegel i P. Le Callet, „Preference of Experience in Image Tone-Mapping: Dataset and Framework for Objective Measures Comparison,“ *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, t. 11, br. 1, pp. 64-74, 2017.
- [89] A. Mittal, A. K. Moorthy i A. C. Bovik, „No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 21, br. 12, pp. 4695-4708, 2012.
- [90] M. A. Saad, A. C. Bovik i C. Charrier, „Blind Image Quality Assessment: A Natural Scene Statistics Approach in the DCT Domain,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 21, br. 8, pp. 3339-3352, 2012.
- [91] L. Zhang, L. Zhang i A. C. Bovik, „A Feature-Enriched Completely Blind Image Quality Evaluator,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 24, br. 8, pp. 2579-2591, 2015.
- [92] K. Gu, S. Wang, G. Zhai, S. Ma, X. Yang, W. Lin, W. Zhang i W. Gao, „Blind Quality Assessment of Tone-Mapped Images Via Analysis of Information, Naturalness, and Structure,“ *IEEE Transactions on Multimedia*, t. 18, br. 3, pp. 432-443, 2016.
- [93] R. Boitard, K. Bouatouch, R. Cozot, D. Thoreau i A. Gruson, „Temporal coherency for video tone mapping,“ u *Proceedings Volume 8499, Applications of Digital Image Processing XXXV*, San Diego, California, United States, 2012.
- [94] S. B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder i R. Szeliski, „High dynamic range video,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 22, br. 3, pp. 319-325, 2003.
- [95] S. D. Ramsey, T. Johnson i C. Hanses, „Adaptive temporal tone mapping,“ u *International Conference on Computer Graphics and Imaging CGIM*, Kauai, Hawaii, 2004.

- [96] C. Kiser, E. Reinhard, M. Tocci i N. Tocci, „Real time automated tone mapping system for HDR video,“ u *IEEE International Conference on Image Processing*, Orlando, 2012.
- [97] S. N. Pattanaik, J. Tumblin, H. Yee i D. P. Greenberg, „Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display,“ u *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2000.
- [98] P. Ledda, L. P. Santos i A. Chalmers, „A local model of eye adaptation for high dynamic range images,“ u *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, Stellenbosch, South Africa, 2004.
- [99] J. H. Van Hateren, „Encoding of high dynamic range video with a model of human cones,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 25, br. 4, pp. 1380-1399, 2006.
- [100] E. Reinhard, T. Pouli, T. Kunkel, B. Long, A. Ballestad i G. Damberg, „Calibrated image appearance reproduction,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 31, br. 6, p. 201, 2012.
- [101] A. Benoit, D. Alleysson, J. Herault i P. Le Callet, „Spatio-temporal Tone Mapping Operator Based on a Retina Model,“ u *International Workshop on Computational Color Imaging*, 2009.
- [102] T. O. Aydin, N. Stefanoski, S. Croci, M. Gross i A. Smolic, „Temporally coherent local tone mapping of HDR video,“ *ACM Transactions on Graphics*, t. 33, br. 6, p. 196, 2014.
- [103] R. Boitard, R. Cozot, D. Thoreau i K. Bouatouch, „Zonal brightness coherency for video tone mapping,“ *Signal Processing: Image Communication*, t. 29, br. 2, pp. 229-246, 2014.
- [104] G. Eilertsen, R. Wanat, R. K. Mantiuk i J. Unger, „Evaluation of Tone Mapping Operators for HDR-Video,“ *Computer Graphics Forum*, t. 32, br. 7, pp. 275-284, 2013.
- [105] M. Melo, M. Bessa, K. Debattista i A. Chalmers, „Evaluation of HDR video tone

- mapping for mobile devices," *Journal Image Communication*, t. 29, br. 2, pp. 247-256, 2014.
- [106] M. Melo, M. Bessa, K. Debattista i A. Chalmers, „Evaluation of Tone-Mapping Operators for HDR Video Under Different Ambient Luminance Levels," *Computer Graphics Forum*, t. 34, br. 8, pp. 38-49, 2015.
- [107] „LiU HDRv Repository - Resources," Linkopings University - Visual Computing Laboratory, 2013. [Na mreži]. Available: <http://www.hdrv.org/Resources.php>. [Poslednji pristup 30 mart 2018].
- [108] J. Froehlich, S. Grandinetti, B. Eberhardt, S. Walter, A. Schilling i H. Brendel, „Creating cinematic wide gamut HDR-video for the evaluation of tone mapping operators and HDR-displays," u *Proceedings Volume 9023, Digital Photography X*, San Francisco, California, United States, 2014.
- [109] S. Paris i F. Durand, „A Fast Approximation of the Bilateral Filter Using a Signal Processing Approach," *International Journal of Computer Vision*, t. 81, br. 1, pp. 24-52, 2009.
- [110] Q. Yang i N. Ahuja, „Constant Time Median and Bilateral Filtering," *International Journal of Computer Vision*, t. 112, br. 3, pp. 307-318, 2015.
- [111] B. Weiss, „Fast median and bilateral filtering," *ACM Transactions on Graphics*, t. 25, br. 3, pp. 519-526, 2006.
- [112] P. Viola i M. J. Jones, „Robust Real-Time Face Detection," *International Journal of Computer Vision*, t. 57, br. 2, pp. 137-154, 2004.
- [113] F. Porikli, „Integral histogram: a fast way to extract histograms in Cartesian spaces," u *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, CA, USA, USA, 2005.
- [114] F. Porikli, „Constant time $O(1)$ bilateral filtering," u *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Anchorage, AK, USA, 2008.
- [115] Q. Yang , K.-H. Tan i N. Ahuja, „Real-time $O(1)$ bilateral filtering," u *IEEE*

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, USA, 2009.

- [116] M. Igarashi, M. Ikebe, S. Shimoyama, K. Yamano i J. Motohisa, „O(1) bilateral filtering with low memory usage,“ u *IEEE International Conference on Image Processing*, Hong Kong, China, 2010.
- [117] K. He i J. Sun, „Fast guided filter,“ arXiv, 2015.
- [118] D. El Mezeni i L. Saranovac, „Fast self-guided filter with decimated box filters,“ u *INFOTEH-JAHORINA*, Jahorina, RS, 2016.
- [119] T. Q. Vinh, J. H. Park, Y.-C. Kim i S. H. Hong, „FPGA Implementation of Real-Time Edge-Preserving Filter for Video Noise Reduction,“ u *International Conference on Computer and Electrical Engineering*, Phuket, Thailand, 2008.
- [120] A. Gabiger-Rose, M. Kube, R. Weigel i R. Rose, „An FPGA-Based Fully Synchronized Design of a Bilateral Filter for Real-Time Image Denoising,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 61, br. 8, pp. 4093-4104, 2014.
- [121] B. Johnson, J. K. Moncy i S. J. Rani, „Self adaptable high throughput reconfigurable bilateral filter architectures for real-time image de-noising,“ *Journal of Real-Time Image Processing*, pp. 1-20, 2017.
- [122] C. Charoensak i F. Sattar, „FPGA design of a real-time implementation of dynamic range compression for improving television picture,“ u *6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*, Singapore, Singapore, 2007.
- [123] Q. Yang, „Hardware-Efficient Bilateral Filtering for Stereo Matching,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, t. 36, br. 5, pp. 1026-1032, 2014.
- [124] Y.-C. Tseng, P.-H. Hsu i T.-S. Chang, „A 124 Mpixels/s VLSI Design for Histogram-Based Joint Bilateral Filtering,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, t. 20, br. 11, pp. 3231-3241, 2011.

- [125] C.-C. Kao, J.-H. Lai i S.-Y. Chien, „VLSI Architecture Design of Guided Filter for 30 Frames/s Full-HD Video,“ *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, t. 24, br. 3, pp. 513-524, 2014.
- [126] L. Wu i C. C. Jong, „A VLSI architecture for real-time gradient guided image filtering,“ u *IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC*, Tallinn, Estonia, 2016.
- [127] C. Ttofis i T. Theocharides, „High-quality real-time hardware stereo matching based on guided image filtering,“ u *Europe Conference and Exhibition in Design, Automation and Test (DATE)*, Dresden, Germany, 2014.
- [128] X. Zhang, H. Sun, S. Chen i N. Zheng, „VLSI Architecture Exploration of Guided Image Filtering for 1080P@60Hz Video Processing,“ *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, t. 28, br. 1, pp. 230-241, 2018.
- [129] M. D. Ercegovac i T. Lang, *Digital arithmetic*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2004.

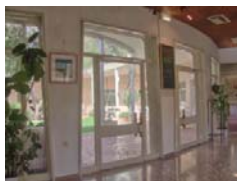
7 PRILOZI

PRILOG 1 SLIKE KORIĆENJE PRI TESTIRANJU ELTM-A.....	230
---	-----

PRILOG 1 SLIKE KORIŠĆENE PRI TESTIRANJU ELTM-A



AtriumMorning [73]



belgium [76]



bristolb [78]



cadik-desk02 [71]



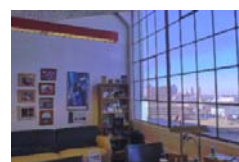
cathedral [76]



clockbui [78]



designCenter [74]



office1 [74]



groveC [72]



groveD [72]



HancockKitchenInside
[70]



Memorial [72]



oaks [78]



FORTH1 [75]



paul_bunyan [70]



PeckLake [70]



FORTH3 [75]



Rosette [72]



Snowman [78]



tinterna [78]



vinesunset [72]



synagogue [76]



Zurich [75]



SwissSunset [75]



RevelStoke [75]



Knososs5 [75]



MarketMires2 [75]



cadik-desk01 [71]



cadik-night_street
[71]



cadik-window [71]



JesseBrownsCabin [70]



LadyBirdRedwoods
[70]



LabTypewriter [70]



LasVegasStore [70]



LuxoDoubleChecker
[70]



M3MiddlePond [70]



McKeesPub [70]



NorthBubble [70]



OCanadaLights [70]



OCanadaNoLights
[70]



RoundStoneBarn
[70]



RoundBarnInside
[70]



Peppermill [70]



RITTiger [70]



mountain [77]



kitchen [77]



office [77]



woman [77]



treeUnil [77]



BenJerrys [70]

Biografija autora

Dragomir El Mezeni je rođen 26.11.1985. u Beogradu. Osnovnu školu „Jovan Jovanović Zmaj“ je završio u Obrenovcu 2000. godine a Matematičku gimnaziju u Beogradu 2004. U srednjoj školi je bio polaznik Istraživačke stanice Petnica na seminaru fizike. U tom periodu je objavio rad u zborniku radova Petničke sveske pod naslovom „Uticaj kompeticije na efikasnost sistema u Minority game-u“, koji je prezentovan na konferenciji Korak u nauku 2004. godine. Po završetku srednje škole ostao je angažovan u Istraživačkoj stanici Petnica najpre u svojstvu mlađeg saradnika a potom u svojstvu stručnog saradnika.

Osnovne studije na Elektrotehničkom fakultet, Univerziteta u Beogradu upisao je 2004. godina a diplomirao je 2008. na odseku za elektroniku sa prosekom 9.96 (bez poništavanja ispita). Diplomski rad pod nazivom „*Implementacija periferija na Embedded PowerPC procesoru*“ je odbranio sa ocenom 10 pod mentorstvom prof. dr. Lazara Saranovca. Master studije na istom odseku je završio 2010. godine sa prosečnom ocenom 10. Master rad pod nazivom „*Implementacija JPEG XR enkodera na heterogenom multiprocesorskom sistemu*“ je odbranio 2010. godine sa ocenom 10 pod mentorstvom prof. dr. Lazara Saranovca. Doktorske studije na odseku za elektroniku Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu je upisao 2010. godine. Sve ispite na doktorskim studijama je položio sa ocenom 10. Temu doktorske disertacije pod nazivom „Lokalni operator za reprodukciju slika širokog dinamičkog opsega uz očuvanje detalja“ je prijavio u decembru 2016. godine. U martu 2018. godine je prihvaćen rad sa nazivom „*Enhanced local tone mapping for detail preserving reproduction of high dynamic range images*“ u vrhunskom međunarodnom časopisu sa SCI liste, kategorije M21 čime je ostvaren uslov za predaju doktorske disertacije.

Od 2008. Dragomir je zaposlen na katedri za elektroniku kao saradnik u nastavi a 2011. je unapređen u zvanje asistenta. U zvanju asistenta je bio do juna 2017. godine kada je počeo da radi u svojstvu višeg laboratorijskog inženjera. U toku perioda rada na katedri izvodio je vežbe na tabli iz većeg broja predmeta katedre za elektroniku među kojima su Osnovi analogne elektronike za IR, Osnovi digitalne elektronike, Digitalna elektronika, Uvod u projektovanje integrisanih kola, Uvod u projektovanje VLSI sistema, Digitalni VLSI sistemi, Integrisani višeprocesorski sistemi, Digitalna obrada slike, Praktikum iz

računara.

Od jula 2009. do aprila 2010. godine kandidat je obavljao stručnu praksu u kompaniji Silicon Hive iz Ajndhovena gde je radio na implementaciji JPEG XR algoritma za kompresiju slike na heterogenom višeprosorskom sistemu pogodnom za korišćenje u mobilnim uređajima. Rezultati ove prakse iskorišćeni su za master rad. Od 2011. godine Dragomir je angažovan na projektu koji kompanija Intel ima sa Elektrotehničkim fakultetom a koji se bavi razvojem i implementacijom algoritama digitalne obrade slike za upotrebu na prenosnim platformama. Od 2011. je angažovan na dva projekta Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja. Od 2013. godine je započeo rad na projektu koji se bavi razvojem sistema za rad sa slikama širokog dinamičkog opsega. Konkretni cilj je bio da se razvije algoritam koji omogućava efikasnu redukciju dinamičkog opsega uz što bolje očuvanje detalja. Samo rešenje je namenjeno za mobilne platforme uz zahtev da se podrži rad sa video sekvencama. Rezultat rada na ovom projektu predstavljaju 3 US patenta, i 3 rada od kojih je jedan objavljen u časopisu kategorije M21, drugi prihvaćen za objavljivanje u časopisu kategorije M23 dok je treći rad trenutno na recenziji.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Драгомир Ел Мезени

Број индекса 2010/5034

Изјављујем

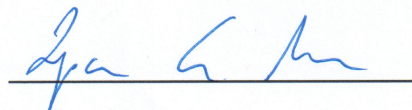
да је докторска дисертација под насловом

**Локални оператор за репродукцију слика широког динамичког опсега уз
очување детаља**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 03.04.2018.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____ Драгомир Ел Мезени _____

Број индекса _____ 2010/5034 _____

Студијски програм _____ Електротехника и рачунарство _____

Наслов рада Локални оператор за репродукцију слика широког динамичког
опсега уз очување детаља

Ментор _____ др Лазар Сарановац, редовни професор _____

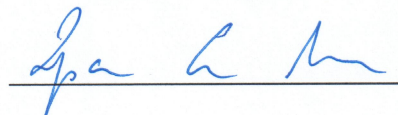
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____ 03.04.2018. _____



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Локални оператор за репродукцију слика широког динамичког опсега уз очување детаља

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

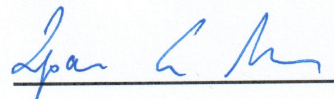
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 03.04.2018.



1. **Ауторство.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.