

Tehnologija slikovnih senzora UHD TV1 videokamera

Baksa, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:163247>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





Sveučilište Sjever

Završni rad br. 776/MM/2022

Tehnologija slikovnih senzora UHDTV1 videokamera

Mario Baksa, 1839/601

Varaždin, rujan 2023. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Multimediju

Završni rad br. 776/MM/2022

Tehnologija slikovnih senzora UHDTV1 videokamera

Student

Mario Baksa, 1839/601

Mentor

mr.sc. Dragan Matković, dipl.ing

Varaždin, rujan 2023. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za multimediju		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Multimedija, oblikovanje i primjena		
PRISTUPNIK	Mario Baksa	MATIČNI BROJ	1839/601
DATUM	10.3.2022.	KOLEGIJ	Uvod u digitalnu videotehnologiju u elektroničkim medijima
NASLOV RADA	Tehnologija slikovnih senzora UHDTV1 videokamera		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Image sensor technology for UHDTV1 video cameras		
MENTOR	mr.sc. Dragan Matković dipl.ing.	ZVANJE	Viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	doc.dr.sc. Andrija Bernik - predsjednik		
	1.	doc.dr.sc. Domagoj Frank - član	
	2.	mr. sc. Dragan Matković, v.pred. - mentor	
	3.	mr.sc. Stanisavljević Vladimir, v.pred - zamjenski član	
	4.		
	5.		

Zadatak završnog rada

BROJ: 776/MM/2022

OPIS

Zahvaljujući brzom razvoju tehnologije integriranih sklopova u smislu njihove brzine rada (takta), veličine memorije i male fizičke veličine, postalo je moguće nametnuti parametre slike ultra visoke kvalitete (UHD - Ultra High Definition, UHDTV1 i UHDTV2) u cijeli lanac od televizijske proizvodnje, prijenosa i distribucije, zapisa do prikaza slike na zaslonima. Implementacija parametara slike povezana je s ponovljenim istraživačkim radovima o osobinama ljudskog vida iz kojih su dobiveni podaci koji su definirali nove parametre slike u smislu dobivanja boljih piksela (veliki dinamički opseg, HDR - High Dynamic Range), bržih piksela (povećanje broja slika u sekundi) i više piksela (postizanje većih rastera a time i veće rezolucije slike). Vrlo značajan napredak u nekoliko zadnjih godina dogodio se u CMOS tehnologiji. Paralelno su razvijeni CMOS slikovni senzori za kinematografiju čija veličina je vrlo slična fotografumu na 35-milimetarskoj filmskoj vrpci i slikovni senzori za televiziju dijagonale 2/3 inča.

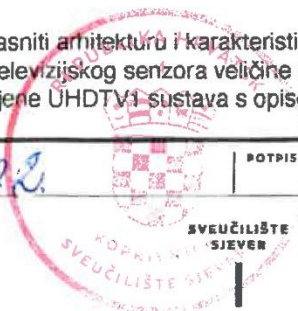
U radu je potrebno:

1. Definirati UHDTV1 sustav sa svim njegovim parametrima i dati prikaz provedbe pojedinih faza sa svojim parametrima.
2. Dati prikaz i objasniti arhitekturu i karakteristike te definirati parametre kinematografskog 35-milimetarskog senzora i televizijskog senzora veličine 2/3 inča.
3. Dati prikaz primjene UHDTV1 sustava s opisom primijenjenih parametara slike.

ZADATAK URUČEN

01.07.2022.

POTPIS MENTORA



Sažetak

Zbog želje gledatelja za većim televizorima s vjernijim prikazom sadržaja, pojavila se potreba i za rastom rezolucije, odnosno broja piksela koje je televizor sposoban prikazati. Stoga su donesene UHD TV norme, koje definiraju razlučivosti koje višestruko premašuju trenutno široko prihvaćenu normu HDTV. Ovaj rad donosi pregled razvoja relevantnih normi i prateće tehnologije, od analize faktora koji su utjecali na definiranje njihovih parametara, do analize problema s implementacijom i tehnoloških rješenja.

Fokus je na normi UHD TV1 (4K), koja definira rezoluciju 3.840x2.160 piksela, s brzinom izmjene slika do 120 slika u sekundi, bez proreda te s kvadratnim pikselima. To je popraćeno novim kolornim prostorima šireg gamuta, te velikim dinamičkim opsegom (HDR), s relativnom HLG (Hybrid Log-Gamma), za proizvodnju sadržaja uživo, te apsolutnom PQ (Perceptual Quantizer) gamom, optimiziranom za unaprijed snimljene filmove i televizijske sadržaje.

Da bi se zadovoljili parametri norme UHD TV1, razvijeni su novi slikovni senzori. Rad objašnjava parametre i princip rada slikovnih senzora do razine fotoelementa, uspoređuje CCD i CMOS tehnologiju senzora, različite metode za registriranje boje (RGB prizma s tri senzora, Bayerov filter), razmatra problem rolajućeg zatvarača te je napravljen osvrt na nekoliko senzora koji se koriste u UHD TV1 televizijskim kamerama (Grass Valleyevi senzori veličine 2/3": Xensium-FT i Xenios), te nekoliko Super 35 i *full frame* senzora korištenih u Canonovim kinematografskim kamerama.

Iako je dostupnost UHD TV sadržaja još uvijek ograničena te mnogi gledatelji nemaju uređaje za prikaz u 4K rezoluciji, ključno je da su donesene norme koje omogućuju implementaciju UHD TV-a u obje definirane rezolucije (i 4K i 8K) pa se s vremenom može očekivati sve veća dostupnost UHD TV sadržaja te sve rasprostranjenija mogućnost gledanja takvog sadržaja.

Ključne riječi: UHD TV, HDR, televizija, senzor, kamera

Summary

Due to viewers' desire for larger TVs with more faithful content reproduction, there has been a need for an increase in resolution, i.e., the number of pixels a TV can display. Therefore, UHD TV standards were introduced, defining resolutions that far exceed the currently widely accepted HDTV norm. This paper provides an overview of the development of relevant standards and accompanying technologies, from analyzing factors influencing the definition of their parameters to addressing implementation issues and technological solutions.

The focus is on the UHD TV1 standard (4K), which defines a resolution of 3,840x2,160 pixels, with a frame rate of up to 120 frames per second, progressive scanning, and square pixels. This is accompanied by new color spaces with a wider gamut and a large dynamic range (HDR), featuring relative HLG (Hybrid Log-Gamma) for live content production and absolute PQ (Perceptual Quantizer) gamma, optimized for pre-recorded movies and TV content.

To meet the parameters of the UHD TV1 standard, new image sensors have been developed. The paper explains the parameters and principles of image sensor operation down to the level of photoelements, compares CCD and CMOS sensor technology, different methods for color recognition (RGB prism with three sensors, Bayer filter), discusses the issue of a rolling shutter, and provides an overview of several sensors used in UHD TV1 television cameras (Grass Valley's 2/3" Xensium-FT and Xenios sensors) and several Super 35 and full-frame sensors used in Canon cinema cameras.

Although the availability of UHD TV content is still limited, and many viewers do not have devices capable of displaying content in 4K resolution, it is crucial that standards have been established to enable UHD TV implementation in both defined resolutions (4K and 8K). Consequently, an increasing availability of UHD TV content and a more widespread opportunity to view such content can be expected over time.

Key words: UHD TV, HDR, television, sensor, camera

Popis korištenih kratica

CRT	Cathode-ray tube Katodna cijev, koja se koristila za prikaz slike u starijim televizorima i monitorima
HD	High definition Visoka rezolucija (obično se odnosi na 1920x1080, nekad na 1280x720)
HDTV	High-definition television Televizijski sustav visoke rezolucije (1080p, 1080i i 720p)
CCD	Charge-coupled device Vrsta tehnologije senzora za prijenos električnog naboja s fotoelementa
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor Vrsta tehnologije senzora kod koje se pretvorba naboja u napon odvija u svakom pojedinom fotolementu
UHD	Ultra HD, Ultra High Definition Ultravisoka razlučivost, obično se odnosi na 4K razlučivost (3.840 x 2.160)
UHDTV	Ultra High Definition Television Televizija ultravisoke razlučivosti (može se odnositi na 4K, kad se još označava kao UHDTV1, i 8K, kad se označava kao UHDTV2)
SD	Standard definition Standardna televizijska rezolucija (480 i 576 linija, ovisno o državi), nekad se označava kao SDTV
HDR	High dynamic range Velik dinamički opseg
SDR	Standard dynamic range Standardni dinamički opseg, ograničen mogućnosti prikaza CRT ekrana
FPS	Frames per second Broj slika u sekundi
LCD	Liquid Crystal Display Zaslon s tekućim kristalima
LED	Light emitting diode Svjetleća dioda
OLED	Organic Light-Emitting Diode Organska LED-ica, organska svjetleća dioda
HD-SDI	High-definition serial digital interface Serijsko sučelje za prijenos digitalnog HD videa u profesionalnom okruženju
HDMI	High-Definition Multimedia Interface Sučelje za prijenos nekomprimiranog videa te komprimiranog ili nekomprimiranog audia
HLG	Hybrid Log Gamma Relativna gama krivulja HDR sustava
PQ	Perceptual Quantization Apsolutna gama krivulja HDR sustava
OETF	Opto-Electronic Transfer Function Prijenosna funkcija koja pretvara svjetlost sa scene u sliku ili video signal
EOTF	Electro-Optical Transfer Function Prijenosna funkcija koja videosignal pretvara u luminanciju na zaslonu
OOTF	Opto-Optical Transfer Function Prijenosna funkcija koja svjetlost sa scene pretvara u svjetlost na zaslonu
HEVC	High Efficiency Video Coding Noviji videokodek visoke učinkovitosti, poznat i kao H.265, nasljednik kodeka AVC
AVC	Advanced Video Coding

	Sveprisutni videokodek, poznat i kao H.264, korišten na Blu-ray medijima i HDTV-u
PSNR	Peak signal-to-noise ratio Mjera za kvalitetu signala (odnos signala i šuma), koja uzima u obzir maksimalno mogući intenzitet signala
QE	Quantum Efficiency Odnos svjetla koje se u senzoru pretvori u električni naboj
SNR	Signal-to-noise ratio Mjera za kvalitetu signala (odnos signala i šuma)
RGB	Red, green, blue Način definiranja boje vrijednostima crvene, zelene i plave komponente
HFR	High frame rate Izmjena slika viša od tipične
CFA	Color filter array Mozaik filtera boje na slikovnom senzoru
DSLR	Digital single-lens reflex camera Vrsta digitalnog fotoaparata s pomičnim zrcalom
RGBW	Red, green, blue, white Inačica Bayerova filtera koja uključuje i prazno mjesto u mozaiku filtera boje
A/D	Analog/digital Odnosi se na vrstu pretvorbe - analogno u digitalno
SOC	System-on-a-chip Sustav integriran u jedan čip, nekad se piše kao SoC
DRAM	Dynamic random-access memory Vrsta poluvodičke memorije koja se mora učestalo i kontinuirano osvježavati
IBIS	In-body Image Stabilization Mehanička stabilizacija senzora unutar tijela kamere
ADC	Analog-to-digital converter Sklop za pretvorbu analognog u digitalni (A/D) signal
MTF	Modulation transfer function Optička ili električna prijenosna funkcija koja zanemaruje fazne efekte
OLP	Optical low-pass filter Filtar na mnogim sensorima, poznat još i kao anti-aliasing filtar, koji smanjuje vizualne artefakte prilikom snimanja vrlo sitnih, kontrastnih uzoraka
DSP	Digital signal processing Sklop za digitalnu obradu signala
WCG	Wide Color Gamut Gamut boja koji pokriva i boje izvan gamuta kolornog prostora Rec. 709
EIS	Electronic Image Stabilization Funkcija elektroničkog stabiliziranja slike prisutna kod nekih kamera
DGO	Dual Gain Output Canonova tehnologija dvojnog pojačanja signala iz fotodioda
IPTV	Internet Protocol television Distribucija televizijskog sadržaja putem IP (Internet Protocol) mreža

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Parametri sustava UHDTV1	3
2.1.	Rezolucija.....	3
2.1.1.	<i>Dimenzije rastera</i>	3
2.1.2.	<i>Odnos pojmovna Ultra HD i 4K</i>	4
2.1.3.	<i>Potreba za UHDTV1 i UHDTV2 rezolucijama</i>	4
2.1.4.	<i>Oblik piksela</i>	5
2.2.	Brzina izmjene slika (<i>framerate</i>).....	5
2.3.	Gamut boja	5
2.4.	Velik dinamički opseg (HDR).....	6
2.4.1.	<i>HDR krivulje</i>	7
2.4.2.	<i>HLG</i>	9
2.4.3.	<i>PQ</i>	10
2.5.	Kodek	10
3.	Faze uvođenja sustava UHDTV	12
3.1.	UHD-1 faza 1	12
3.2.	UHD-1 faza 2	13
3.3.	UHD-2	13
4.	Arhitektura i usporedba tehničkih karakteristika slikovnih senzora.....	14
4.1.	Od svjetlosti do fotoelektrona	14
4.2.	Veličine senzora i fotoelemenata	15
4.2.1.	<i>Senzori veličine 2/3"</i>	16
4.2.2.	<i>Senzori veličine Super 35</i>	17
4.2.3.	<i>Senzori veličine 35 mm full frame</i>	17
4.2.4.	<i>Minimalna veličina fotoelementa</i>	18
4.2.5.	<i>Optimalna veličina fotoelementa</i>	20
4.2.6.	<i>Identifikacija boja - Razlaganje svjetlosti na RGB komponente</i>	21
4.3.	Princip rada CCD i CMOS senzora.....	26
4.3.1.	<i>Princip rada CCD senzora</i>	26
4.3.2.	<i>Princip rada CMOS senzora</i>	27
4.4.	Usporedba tehnologija senzora CCD i CMOS.....	29
4.5.	Rolajući zatvarač (<i>rolling shutter</i>)	31
4.5.1.	<i>Utjecaj rolajućeg zatvarača na sliku</i>	31
4.5.2.	<i>Mogući načini sprječavanja ili umanjivanja posljedica rolajućeg zatvarača</i>	32
4.6.	Senzori veličine 2/3" za UHDTV1 kamere	35
4.6.1.	<i>RGB prizma s tri senzora s pomakom</i>	35
4.6.2.	<i>Senzor većeg formata s Bayerovim filtrom iza konverzijske leće</i>	35
4.7.	35-milimetarski senzori za UHDTV1 kamere	36
4.7.1.	<i>Kinematografski 35 mm senzori</i>	36
5.	Primjeri senzora za snimanje UHDTV1 sadržaja	39
5.1.	Televizijski HD senzor veličine 2/3" - Grass Valley Xensium-FT	39
5.1.1.	<i>Tehnološka izvedba globalnog zatvarača</i>	39

5.1.2.	<i>Prednosti pred postojećim 2/3-inčnim CCD-ovima</i>	42
5.2.	Televizijski UHD-1 senzor veličine 2/3" - Grass Valley Xenios	43
5.3.	Kinematografski 35-milimetarski 4K senzori	43
5.3.1.	<i>Super 35 senzor u Canonu EOS C300, C100 i C500</i>	43
5.3.2.	<i>Super 35 senzor u Canonu EOS C300 Mark II</i>	46
5.3.3.	<i>Full frame 5,9K senzor iz kamera EOS C500 Mark II i EOS C700 FF</i>	50
5.3.4.	<i>Dual Gain Output (DGO) 4K Super 35mm CMOS slikovni senzor</i>	59
6.	Primjena sustava UDHTV1	62
6.1.	Primjena u proizvodnji, emitiranju i distribuciji sadržaja	63
6.2.	Primjena u prijemu i reprodukciji sadržaja	63
6.2.1.	<i>Potrošački reproduktori i prijemnici</i>	64
6.2.2.	<i>Uređaji za prikazivanje</i>	65
7.	Zaključak.....	69
8.	Literatura.....	71

1. Uvod

Krajem 19. stoljeća započela je era nijemog crno-bijelog filma. Stotinjak godina kasnije filmove u boji gledamo u kinu, na platno projicirane digitalnim projektorima, popraćene tutnjavom višekanalnog audiosustava, ili u udobnosti vlastita doma, na televizorima velikih dijagonala. Na istim tim televizorima gleda se i televizijski sadržaj, koji je daleko dogurao, krenuvši od ne uvijek stabilne i čiste slike, niske razine detalja, na zaobljenim monokromatskim televizorima s treperavim CRT ekranima.

Televizija standardne definicije (pre)dugo je vremena bila kralj. Drugačije nije ni moglo, jer tehnologija za bolje nije ni postojala. Stvari su se počele ozbiljnije mijenjati s pojavom televizije visoke definicije (HDTV), koju prati i odgovarajući format sadržaja na optičkom mediju Blu-ray. Da bi to bilo moguće, značajan tehnološki napredak trebao je biti postignut na svim poljima - od kamera, sustava za videomontažu, kodeka, infrastrukture za prijenos takvog sadržaja (digitalni televizijski kanali visoke razlučivosti, internetske veze veće propusnosti) pa sve do uređaja za reprodukciju.

HDTV je danas ono što je televizija standardne definicije bila donedavno. HDTV je danas aktualna, općeprihvaćena, najčešće korištena norma. No, napredak tehnologije nije stao pa se krenulo s razvojem Ultra HDTV normi, koje nude još više detalja putem više razlučivosti, još fluidnije pokrete putem veće brzine izmjene slika, veći dinamički opseg zahvaljujući unaprijeđenim gamama i televizorima koji mogu prikazati takav sadržaj, više boja i finije tonske prijelaze zbog šireg gamuta i veće dubine boja.

U ovom radu napraviti će se pregled normi za iduću generaciju digitalne televizije, što se sve njima definira, kako su implementirane u pojedinim dijelovima cijelog lanca, od proizvodnje do konzumacije sadržaja.

Pokrit će se tehnologija senzora za televizijske i kinematografske kamere za Ultra HDTV1 normu - bez senzora odgovarajućih karakteristika nema odgovarajućeg sadržaja.

Objasnit će se kako je u televizijskim kamerama iz relativno malih senzora HD razlučivosti moguće izvući sliku koja po detaljnosti premašuje mogućnosti HD televizora i zahtijeva UHDTV1 televizor za idealan prikaz.

Prijelaz s CCD na CMOS senzore na televiziji bio je problematičan zbog "nagnutih linija" kod pokreta uzrokovanih rolajućim zatvaračem. Obavit će se analiza problema - koji su uzroci, koje su posljedice, koja su moguća hardverska rješenja, može li se to riješiti ili umanjiti na neke druge načine. Objasnit će se kako je riješen taj problem, odnosno dati prikaz arhitekture i objašnjenje funkcioniranja CMOS senzora s globalnim zatvaračem. Pokušat će se utvrditi i koja je minimalna i optimalna veličina fotoelemenata na senzoru.

Za digitalnu kinematografiju koriste se drugačije kamere nego za televiziju. To su kamere osjetno većih senzora, ali i drugačijeg načina razlaganja svjetlosti na boje, te mogu biti kompatibilne s tradicionalnim kinematografskim objektivima. Objasnit će se kad se koriste takve kamere, koje su razlike u odnosu na televizijske kamere, koje se inovativne tehnologije ugrađuju u njih.

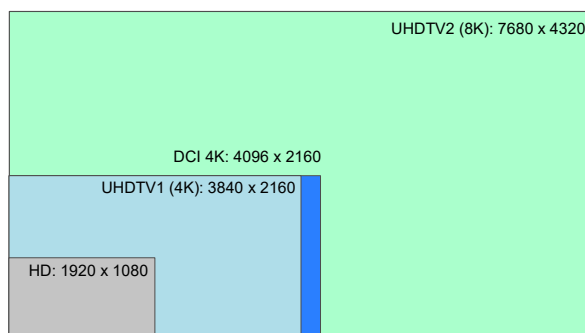
Za sve rečeno, bit će prezentirani i konkretni CMOS senzori veličine 2/3 inča i Super 35, te će biti napravljen pregled ekosustava - od proizvodnje, do gledanja sadržaja.

2. Parametri sustava UHDTV1

2.1. Rezolucija

2.1.1. Dimenzije rastera

Norma UHDTV za UHDTV1 definira rezoluciju 3840x2160 piksela, ponekad označenu i kao 2160p, a za UHDTV2 7680x4320 piksela. Do UHDTV1 rezolucije došlo se udvostručavanjem širine i visine slike HD (1920 x 1080) videozapisa, dakle na jednu sliku Ultra HD videozapisa stanu četiri (2x2) slike HD videozapisa. Istim principom došlo se do UHDTV2 rezolucije, koja podrazumijeva četiri UHDTV1 slike postavljene u dva retka i dva stupca.



Slika 2.1- Prikaz odnosa često korištenih rezolucija

Slovo "p" u 2160p je skraćeno za *progressive*, odnosno za sliku bez proreda. Slika s proredom koristi se radi snižavanja potrebnog *bandwidtha*, odnosno širine pojasa kod analogne, te propusnosti (količine digitalno kodiranih podataka) kod digitalne televizije. Slika s proredom pogodna je za CRT ekrane, ali ne i za moderne ekrane (TFT LCD, OLED) i druge tehnologije prikazivanja, poput projektor. Za razliku od norme za SD i HD televiziju, norma UHDTV ne dopušta sliku s proredom (*interlaced*).

Problem s *bandwidthom* kod UHDTV televizije rješava se na druge načine - bržim vezama i efikasnijim videokodekom. Slika bez proreda omogućava višu vertikalnu rezoluciju i ne pati od efekta "češlja", do kojeg dolazi kad se slika s proredom bez obrade prikazuje na ekranima koji sliku isctavaju bez proreda, a to je većina današnjih uređaja, s obzirom da su CRT televizori i monitori praktički napuštena tehnologija.

2.1.2. Odnos pojmova Ultra HD i 4K

Ultra HD (UHDTV1) rezolucija, tehnički gledano, nije 4K rezolucija, jer bi to podrazumijevalo barem 4.000 piksela po širini slike, no iz marketinških se razloga Ultra HD rezolucija nerijetko označava kao 4K Ultra HD ili samo 4K. Iako slovo "k" u 4K zapravo predstavlja SI oznaku za kilo, odnosno tisuću, a u SI sustavu "K" je oznaka za Kelvin, također se iz marketinških razloga rezolucija označava kao 4K, umjesto 4k. Organizacija SMPTE napominje da se izrazi 4K i 8K ne bi trebali koristiti kad se govori o UHDTV1, odnosno UHDTV2.

Postoje i druge 4K rezolucije, s različitom širinom i/ili visinom, različitim omjerom stranica slike te različitim brojem piksela, koje se koriste kod digitalne kinematografije.

Format	Resolution	Display Aspect Ratio	Pixels
4K Ultra High Definition Television	3840 x 2160	1.78:1	8,294,400
Digital Cinema Initiatives 4K (native resolution)	4096 x 2160	1.91:1	8,847,360
DCI 4K (CinemaScope cropped)	4096 x 1714	2.39:1	7,020,544
DCI 4K (flat cropped)	3996 x 2160	1.85:1	8,631,360
Academy 4K (storage format)	3656 x 2664	1.37:1	9,739,584
Full aperture 4K (storage format)	4096 x 3112	1.32:1	12,746,752

Tablica 2.1 - Češće korišteni 4K formati slike [1]

2.1.3. Potreba za UHDTV1 i UHDTV2 rezolucijama

Kako tehnologija napreduje, kako se snižava cijena proizvodnje, tako industrija proizvodi televizore sve većih dijagonala, koji kupcima postaju sve dostupniji. Ako se ne mijenja udaljenost gledatelja od ekrana, a ekran se povećava, znači da se na reproduciranoj površini povećao i prikaz individualnih piksela, čime slika gubi relativnu oštrinu.

Taj se problem može riješiti na dva načina - udaljavanjem gledatelja od ekrana ili povećanjem rezolucije. Udaljavanje gledatelja od ekrana u kućama i stanovima u mnogim slučajevima zapravo nije moguće, zbog ograničenih dimenzija prostorija. Osim toga udaljenost gledatelja od ekrana definirana je s razlučivošću ljudskog vida od 1 lučne minute. Ako veličina piksela na mjestu gledatelja izražena veličinom kuta iznosi 1 lučnu minutu tada gledatelj više ne vidi piksel, a to znači da ne vidi raster R,G,B piksela. Stoga je jedino pravo rješenje povećati rezoluciju (smanjiti „veličinu digitalnog piksela“, odnosno povećati broj uzoraka u linijskom RGB signalu), a upravo to je glavna karakteristika koju UHDTV donosi. Slika tako visoke rezolucije čak i na jako velikom ekranu izgleda jako dobro i gledatelju omogućava da se bolje uživi u sadržaj (veći horizontalni vidni kut slike).

2.1.4. Oblik piksela

Dok su pikseli (elementi slike) kod televizije standardne definicije (SDTV) pravokutnici s omjerom širine i visine pojedinačnih piksela (PAR) različitim od 1:1 (omjer 10:11 za 480i, 59:54 za 576i) [2], UHDTV je od televizije visoke razlučivosti (HDTV) naslijedio „kvadratičaste“ piksele (PAR 1:1, međusobna udaljenost piksela je ista), ali i omjer stranica slike (širine i visine) rastera, koji je i kod UHDTV-a 16:9 (1,78:1).

2.2. Brzina izmjene slika (*framerate*)

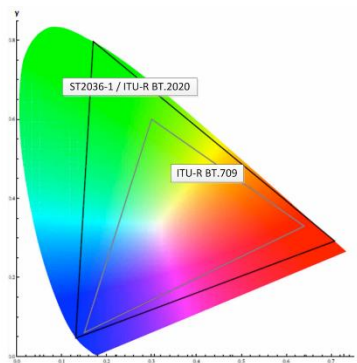
Kao i prijašnje televizijske norme, i norma UHDTV definira *framerateove* (brzinu izmjene slika, frekvenciju slike) usklađene s frekvencijama 50 Hz i 60 Hz. Te frekvencije uvjetovane su geografski, odnosno frekvencijom lokalne mreže izmjenične struje. Za područja sa strujom na 50 Hz (tipično PAL područja, što uključuje Europu, Australiju, dio Azije, Afrike, Južne Amerike), definirane su brzine izmjene slika od 25, 50 i 100 slika u sekundi (FPS).

Za područja s električnom mrežom na 60 Hz (Sjeverna Amerika, dio Južne Amerike, Japan i još neka manja područja) definirani su *framerateovi*: 24/1,001 (23,976), 24, 30/1,001 (29,97), 30, 60/1,001 (59,94), 60, 120/1,001 (119,88), 120 FPS. Treba se podsjetiti da je razlomljeni broj slika u sekundi nastao uvođenjem kolor televizije u SAD-u 1952., crno-bijela televizija radila je s cjelobrojnim brojem slika u sekundi (30). Pritom se ne očekuje da će se *framerateovi* od 29,97 i 30 FPS često ili uopće koristiti u budućnosti u UHDTV-u.

Vrlo visoki *framerateovi*, dakle 100, 119,88 i 120 FPS, posebno su pogodni za prikaz sportskih događanja s obzirom da poboljšavaju prikaz pokreta i smanjuju zamućenje pokreta (*motion blur*) u sadržajima s brzim pokretima. [3]

2.3. Gamut boja

UHDTV norma donosi novi, mnogo širi gamut od dosad najčešće korištenog ITU-R BT.709 (Rec.709). To je ITU-R Recommendation BT.2020, poznat i kao Rec. 2020. Dok je Rec.709 boja najčešće bila kodirana s 8 bita, Rec. 2020 već je u startu predviđen za 10 i 12-bitno kodiranje. Kod 10-bitnog kodiranja boja dozvoljene vrijednosti za sliku videosignala su između 4 i 1019 (potpuna crna je 64, vršna bijela 940), a kod 12-bitnog između 16 i 4079 (potpuna crna je 256, vršna bijela 3760). Uzorkovanje boja može se raditi u 4:4:4, 4:2:2 i 4:2:0 sustavu. [4]

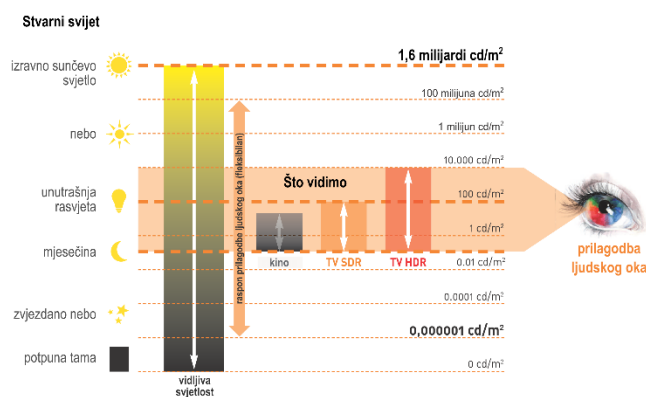


Slika 2.2 - Usporedba novog Rec.2020 i starog Rec.709 gamuta [5]

2.4. Velik dinamički opseg (HDR)

Kad se govori o videosadržaju, dinamički opseg je odnos najsvjetlije i najtamnije moguće točke u slici, odnosno raspon mogućih vrijednosti luminancija. Jedan od problema iz vremena prije definiranja UHDTV norme je prilično ograničen standardni dinamički opseg (SDR), koji, bez korištenja karakteristike koljena u kameri, pri standardnoj i visokoj definiciji iznosi svega 5 EV (omjer ukupnog kontrasta $2^5 = 32$ ili 5 f-stop jedinica). To znači da se izgubi velika količina informacija u jako svijetlim i jako tamnim dijelovima slike.

Slika 2.3 prikazuje dinamički opseg ljudskog oka u odnosu na projekciju u kinodvorani, prikaz na SDR i HDR televizoru, te mogućnost prilagodbe ljudskog oka. Iz slike je jasno da se cilj HDR-a iskoristiti dinamički opseg ljudskog oka, jer SDR sadržaj i uređaji za prikazivanje to ne mogu.



Slika 2.3 - Usporedba dinamičkog opsega SDR i HDR televizije prema stvarnom svijetu [6]

UHDTV norma problemu dinamičkog opsega doskočila je specifikacijom ITU-R BT.[HDR-TV], kojom se definiraju parametri velikog dinamičkog opsega (High ili Higher Dynamic

Range). Postoji više čestih zabluda oko HDR-a, poput toga da se radi samo o svjetlijim slikama videozapisa, da se HDR tiče samo broja bitova pri kodiranju luminancije, da je ograničeni standardni opseg samo pitanje ograničenog dinamičkog opsega senzora te da je ograničen standardni opseg uzrokovan konkretnim mogućnostima uređaja za reprodukciju sadržaja, poput ekrana.

Prva zablude, da HDR znači da će slike videozapisa jednostavno biti svjetlije, potaknuta je činjenicom da je maksimalna luminancija kod HDR-a mnogo viša nego kod SDR-a. Maksimalna luminancija zapravo znači da slika HDR videozapisa može sadržavati svjetlije piksele nego kod SDR-a, čime se postiže veća varijacija u svjetlini, a to omogućava prirodniji prikaz slika, pogotovo prikaz scena snimljenih na otvorenom, pod suncem.

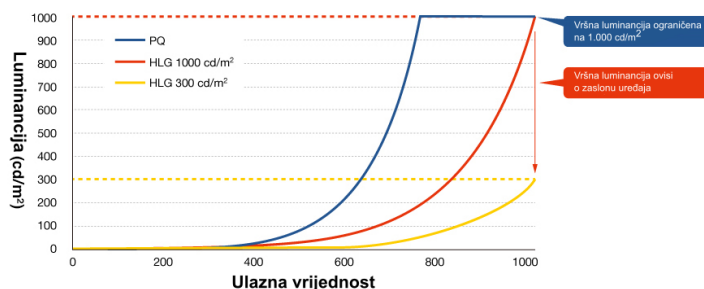
Kod HDR scena snimljenih u zatvorenom očekuje se da će svjetlina biti slična kao kod SDR scena snimljenih u zatvorenom. Za scene snimljene na otvorenom, kod HDR-a se očekuje da će biti svjetlije od scena snimljenih u zatvorenom.

Osim omogućavanja prikaza različite svjetline scena u unutrašnjosti i na otvorenom, HDR omogućava i jako svijetle površine manjih dimenzija poput odsjaja, bljeska, odraza od zrcala ili emitivnih izvora svjetlosti mnogo veće svjetline.

Za HDR potrebno je najmanje 10 bitova po komponenti. U suprotnom, mogli bi se vidjeti kvantizacijski artefakti, s obzirom da, za SDR tipičnih, 8 bitova znači samo 256 razina luminancije, dok 10 bitova znači 1024 razina luminancije.

Kroz sučelja prilikom proizvodnje (HD-SDI, izvorne datoteke) i reprodukcije sadržaja (poput HDMI sučelja) mora se ispravno signalizirati da se radi o HDR sadržaju, jer isti u suprotnom neće biti ispravno prikazan. HDR sadržaj nije zamjena za SDR sadržaj, nego se oni nadopunjuju unutar iste infrastrukture i distribucijskih servisa. [3]

2.4.1. HDR krivulje



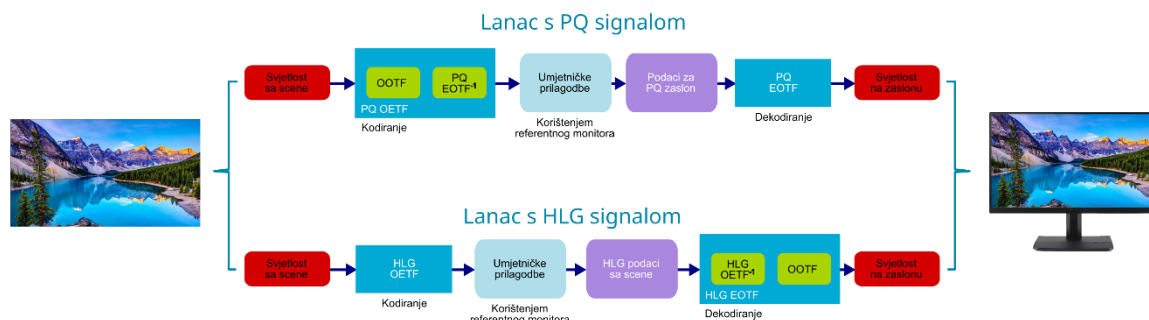
Slika 2.4 - Usporedba PQ i HLG gama krivulja za HDR - vršna luminancija kod PQ krivulje ograničena je na 1.000 nita, dok kod HLG krivulje ovisi o vršnoj luminanciji koju može postići zaslon konkretnog uređaja [7]

Dvije su game HDR sustava (s pratećim prijenosnim funkcijama) koje se koriste u UHDTV-u, a koje su ratificirana 2016. godine u preporuci ITU-T BT.2100: HLG (Hybrid Log Gamma) i PQ (Perceptual Quantization, definirano normom SMPTE ST.2084).

HLG	Velik dinamički opseg (HDR)	PQ
Optimizirano za televizijsku proizvodnju uživo	Primjena	Optimizirano za unaprijed snimljene filmove i televizijske sadržaje, internetski video <i>streaming</i>
Odnosi se na scenu (OETF je specificirana u BT.2100)	Cilj dizajna sustava	Odnosi se na zaslon (EOTF je specificirana u BT.2100)
1) Svjetlina je predstavljena relativnim vrijednostima (jednako postojećim normama); 2) OETF je kompatibilna sa SDR i HDR zaslonima	Karakteristike	1) Svjetlina je predstavljena apsolutnim vrijednostima, do 10.000 cd/m ² 2) Perceptualna kvantizacija temeljena je na čovjekovom sustavu za vid 3) Nije kompatibilna sa SDR zaslonima
< 18 F-stop jedinica za sustav od 2.000 nita	Maksimalni teoretski dinamički opseg	< 28 F-stop jedinica za sustav od 10.000 nita
Relativna vrijednost, ovisi o uređaju za prikazivanje	Vršna svjetlina	Apsolutna svjetlina od 1,000 cd/m ² , konzistentna, bez obzira na uređaj za prikazivanje
0,005 cd/m ² ili manje	Razina crne	0,005 cd/m ² ili manje
10 ili 12 bita	Dubina boje	10 ili 12 bita
BBC i NHK	Predložili	Dolby
ITU-R BT.2100	Referentne norme	SMPTE ST 2084, ITU-R BT.2100

Tablica 2.2 - Usporedba HLG i PQ sustava visokog dinamičkog opsega (tablica sastavljena na temelju tablica iz dva izvora: [8], [7])

Prijenosne funkcije su OETF (Opto-Electronic Transfer Function), EOTF (Electro-Optical Transfer Function) i OOTF (Opto-Optical Transfer Function). OETF svjetlost sa scene pretvara u sliku ili videosignal, a EOTF sliku ili videosignal pretvara u svjetlost na zaslonu. OOTF svjetlost sa scene pretvara u svjetlost na zaslonu i rezultat je korištenja OETF, eventualno umjetničke prilagodbe, i EOTF funkcije te obično nije linearna. [9]



Slika 2.5 - Funkcionalna usporedba PQ i HLG sustava kad gledateljeva okolina odgovara okolini uređivanja videa (ilustracija rekreirana na temelju ilustracije s izvora [10])

S obzirom na različite ciljeve HDR sustava PQ i HLG, odnosno činjenice da je jedan od njih apsolutni, a drugi relativan, tako su i lanci s različitim vrstom HDR signala (Slika 2.5) različiti, a posebno treba uočiti poziciju OOTF funkcije, koja je kod PQ-a na početku, a kod HLG-a na kraju lanca.

2.4.2. HLG

Osim HLG prijenosne funkcije, odnosno game, definirana je i norma za format HLG10, koji se također često označava samo kao HLG, za koji su karakteristični, uz HLG prijenosnu funkciju, BT.2100 primari boje i dubina boje od 10 bita. [11]

HLG je nastao kao proširenje SDR gama krivulje definirane normom Rec.709 – donja polovica krivulje (kad se gleda jakost signala) odgovara SDR gama krivulji, dok je gornja polovica krivulje logaritamska. Djelomična kompatibilnost krivulja znači da će se u praksi slika prikazati relativno dobro na SDR UHDTV uređajima, samo što će biti vidljivo komprimiranje detalja u svijetlim tonovima, dok će uređaji kompatibilni s HLG-om (dakle, HDR uređaji) ispravno interpretirati i logaritamski dio krivulje, odnosno pravilno prikazati detalje u najsvjetlijim tonovima.

Međutim, slika s HLG krivuljom neće biti ispravno prikazana na nekompatibilnim SDR uređajima, jer se za boje kod HLG-a koriste Rec.2020 primari (može se reći i Rec.2100 primari,

s obzirom da su oni isti kao i Rec.2020 primari) pa slika na takvim SDR uređajima ima pomaknute i slabije zasićene boje, s obzirom da SDR uređaji koriste Rec.709 primare.

HLG je relativna gama krivulja. To znači da je luminancija kodirana na način da se zadrži odnos svjetline u sceni. To ujedno znači i da se bolje mogu iskoristiti mogućnosti uređaja na kojemu se sadržaj prikazuje (ili se mogu prilagoditi uvjetima u kojima se sadržaj gleda), jer uređaj (televizor ili neki drugi) može interpretirati relativne svjetline u odnosu na mogućnosti zaslona.

2.4.3. PQ

PQ koristi gama krivulju koja je optimizirana za HDR zaslone i nije kompatibilna sa SDR uređajima. Omogućava veći dinamički opseg od HLG-a, odnosno može prikazati opseg luminancije od duboke crne do izuzetno svijetlih tonova.

Za razliku od HLG-a, PQ je apsolutna gama krivulja. To znači da je za svaku ulaznu vrijednost precizno definirana izlazna luminancija u nitima, koji uređaj za prikazivanje sadržaja mora poštovati. Time se gama ne veže izravno za scenu, nego odgovara luminanciji monitora na kojem je rađen *mastering* sadržaja, dakle namjera je bila da ono što kolorist ili redatelj vidi na ekranu prilikom proizvodnje sadržaja, da to isto gledatelj vidi prilikom gledanja tog sadržaja doma na televizoru. Shodno tome, PQ namijenjen je za prikaz u strogo kontroliranim uvjetima, recimo u kinodvorani.

Kako svi televizori ipak ne mogu prikazati istu razinu luminancije ili se gledaju u uvjetima s više ambijentalnog osvjetljanja, sa sadržajem s PQ gamom obično se prilažu metapodaci koji će poslužiti za bolju interpolaciju vrlo svijetlih tonova, kako ne bi jednostavno bili odrezani kod manje sposobnih zaslona.

2.5. Kodek

Jedna od stvari koje su omogućile Ultra HD sadržaj je novi kodek H.265/HEVC. Kako Ultra HD videosadržaj ima četiri puta veću rezoluciju od danas najčešće korištenog formata kod HDTV-a, to bi značilo da bi za zadržavanje iste kvalitete slike na razini piksela trebalo koristiti četiri puta viši *bitrate* (brzina toka podataka), što je iznimno problematično, ako ne i neizvedivo, odnosno kroz brojne medije - ograničen *bitrate* jednostavno ne dozvoljava tako nešto.

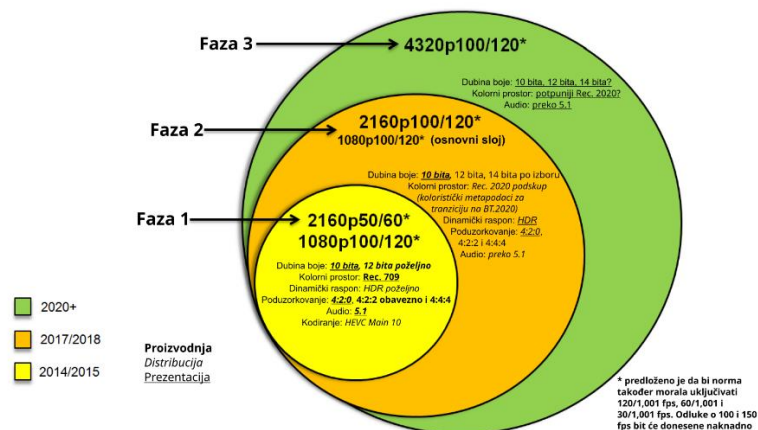
Stoga se krenulo na razvoj novog kodeka, nazvanog HEVC (High Efficiency Video Coding), poznatog još i pod oznakom H.265/HEVC. U odnosu na svog prethodnika H.264/AVC, kodek HEVC prosječno daje 35,4% manju datoteku, a u odnosu na kodek koji se najčešće koristi za SD

televiziju (kodek H.262/MPEG-2 MP) daje 70,8% manju datoteku uz isti vršni omjer signala prema šumu PSNR (*Peak signal-to-noise ratio*).

U svijetu *web-streaminga*, konkretno YouTubea, najviše se koristi slobodni (otvoreni) kodek VP9 – slobodni u smislu da nije opterećen patentima te da za njegovo korištenje ne treba plaćati tantijeme. [12] To je kodek koji je karakteristikama i performansama sličan kodeku HEVC – kod nekih testova ponešto zaostaje (ali je bolji od kodeka AVC), kod drugih je slične učinkovitosti. Sljedeći kodek koji je YouTube počeo polako uvoditi u korištenje je AV1 (AOMedia Video 1), također slobodni kodek, inicijalno učinkovitosti slične HEVC-u, no kroz razvoj učinkovitost mu je podignuta. Tako je ispalo da je u nekim testovima 25-34% učinkovitiji od VP9 te 22% od HEVC-a. [13] AV1 se na tržištu pojavio kao sastavni dio Android TV-a, operacijskog sustava prilagođenog televizorima i multimedijalnim reproduktorima.

3. Faze uvođenja sustava UHDTV

UHDTV sustav provodi se u tri faze, koje su se inicijalno označavale kao Faza 1, Faza 2 i Faza 3 [14], da bi se kasnije prve dvije faze postale dvije faze za UHDTV1 (UHD-1 faza 1, UHD-1 faza 2), a treća faza se odnosi na UHDTV2 (UHD-2). [15]



Slika 3.1 - Inicijalna zamisao kako su faze uvođenja UHDTV-a trebale izgledati, kad je bilo još dosta nepoznanica [14]

3.1. UHD-1 faza 1

Specifikacija sustava UHDTV1 definirana je 2014. godine. Prva faza podrazumijeva UHD-1 razlučivost od 3840 x 2160 piksela, brzinu izmjena slika do 60 FPS, 10-bitnu boju u 4:2:0 formatu, usklađenost s normama BT.709 i BT.2020 (nepotpuna podrška), korištenje postojećih audionormi.

Dok se kod HDTV-a koriste videokodeci MPEG-2 i AVC/H.264, UHD-1 u prvoj fazi uvodi kodek HEVC/H.265, uz korištenje profila Main 10 do razine 5.1. UHDTV prijammnici DVB signala morat će podržavati rezolucije koje podržavaju HDTV HEVC prijammnici, ali i dodatne rezolucije, od kojih sve imaju omjer stranica slike 16:9, a to su 3840 x 2160, 2880 x 2160, 3200 x 1800 i 2560 x 1440.

Sve podržane rezolucije podrazumijevaju progresivnu sliku (sliku bez proreda) i brzine izmjene slika 24/1,001, 24, 25, 30/1,001, 30, 50, 60/1,001 i 60 FPS.

Prijammnici ujedno moraju imati mogućnost dekodiranja *bitstreamova* koji koriste kolorimetriju BT.709 i BT.2020. Zbog televizora koji još ne podržavaju BT.2020, očekuje se prikladna konverzija kolorimetrije BT.2020 u BT.709. Stoga nije dopušteno boje koje izlaze iz gamuta televizora smjestiti na sam rub gamuta, ali isto tako nije dozvoljeno da se širi gamut linearno smanji na gamut koji televizor podržava.

3.2. UHD-1 faza 2

Ultravisoka razlučivost je bila središnji aspekt prve faze. Sad kad je to zadovoljeno, u drugoj se fazi krenulo na veći broj slika u sekundi, velik dinamički opseg i širi kolorni prostor, te audio zbog kojeg će gledatelj moći dublje "uroniti" u iskustvo gledanja.

Tako se u drugoj fazi broj slika u sekundi penje do 120, video je 10-bitni s poduzorkovanjem boja 4:2:0, podržan je širok gamut boja putem kolorimetrije BT.2020, velik dinamički opseg te napredniji zvuk.

3.3. UHD-2

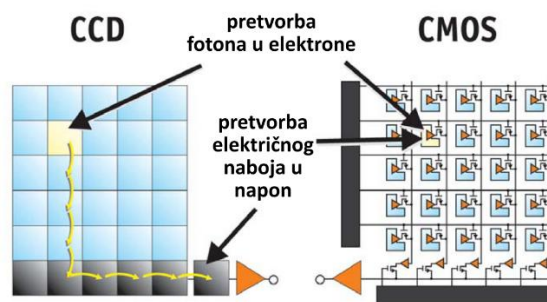
Ova faza ide od 2020. godine nadalje, a glavna karakteristika je dizanje razlučivosti na 8K, odnosno 7680x4320. Brzina izmjene slika također ide do 120 slika u sekundi. [15]

NHK (Japan Broadcasting Corporation) 8K UHDTV format oglašava kao Super Hi-Vision, a uz 120 Hz progresivni video, ističe se 12-bitna boja po kanalu te 22.2-kanalni audio s uzorkovanjem pri 48-96 kHz sa 16, 20 ili 24 bita. Svoj prvi 8K televizijski kanal, BS8K, koji je ujedno uopće prvi 8K televizijski kanal, NHK pokrenuo je 1. prosinca 2018 - i više nego godinu dana ranije od očekivanog početka treće faze uvođenja UHDTV-a. [16]

4. Arhitektura i usporedba tehničkih karakteristika slikovnih senzora

Iako su u prošlosti prevladavali CCD slikovni senzori, napredak CMOS tehnologije, potaknuo je sve učestalije korištenje CMOS senzora. Došlo je i do promjena koje se tiču veličine senzora. Iako se u televizijskim kamerama i dalje obično koriste senzori veličine 2/3", tipično uz korištenje RGB prizme u kombinaciji s tri slikovna CCD ili CMOS senzora, za druge, filmske primjene, sve češće se koriste kamere s jednim većim CMOS sensorom, tipično veličine Super 35 ili *full frame*.

Veći senzori omogućuju lakše ostvarivanje pliće dubinske oštine, pogotovo pri širim kutovima, pogodne za filmske sadržaje, no kod prijenosa uživo posebno su važni zum (raspon žarišnih duljina) i veće polje dubinske oštine, zbog čega kamere sa sensorima veličine 2/3" i dalje ostaju bolje rješenje za televizijske potrebe.



Slika 4.1 - Pretvorba fotona u elektrone i potom u napon kod CCD i CMOS senzora [17]

Glavna razlika između CCD i CMOS senzora je gdje se odvija pretvorba električnog naboja, kojeg pobuđuju fotoni, u napon. Kod CCD senzora to se događa netom prije samog izlaza iz slikovnog senzora, tako da je na izlazu količina naboja (broj elektrona) koja predstavlja veličinu luminancije pretvorena u vrijednost napona videosignala, uslijed čega se CCD senzore može smatrati analognim sensorima. Kod CMOS senzora to događa u samom slikovnom senzoru, u sklopu svakog pojedinog fotoelementa.

4.1. Od svjetlosti do fotoelektrona

Slikovni sensor (engl. imaging sensor, imager) komponenta je koja sudjeluje u "pretvaranju" svjetlosti u električni naboj. Konkretno, fotoni svjetlosti "udaraju" u površinu elemenata senzora (transduktora), čime izbijaju elektrone, ili, preciznije, svjetlosna energija pretvara se u kinetičku

energiju elektrona. To se naziva fotoelektrični efekt, a izbijeni elektroni često se nazivaju fotoelektronima. Količina izbijenih elektrona ovisi o intenzitetu i valnoj duljini svjetlosti.

Fotoelektrični transduktor (ili pretvornik) obično je sačinjen od poluvodičkog materijala osjetljivog na svjetlost. Postoji više vrsta fotoelektričnih transdukatora: fotoemitivna ćelija, fotodioda, fototranzistor, foto-voltaička ćelija i fotoprovodljiva ćelija. [18] U slikovnim senzorima u pravilu se koriste fotodiode.

Konverzija fotona u elektrone nije savršena. Odnos svjetla koje se u senzoru pretvori u električni naboj naziva se kvantna učinkovitost (Quantum Efficiency, QE). Kvantna učinkovitost od 60% znači da je 6 elektrona oslobođeno za svakih 10 fotona koji pogode fotoelement. Kvantna učinkovitost specifična je za svaki senzor, a izvedba kamere ne utječe na krivulju kvantne učinkovitosti.

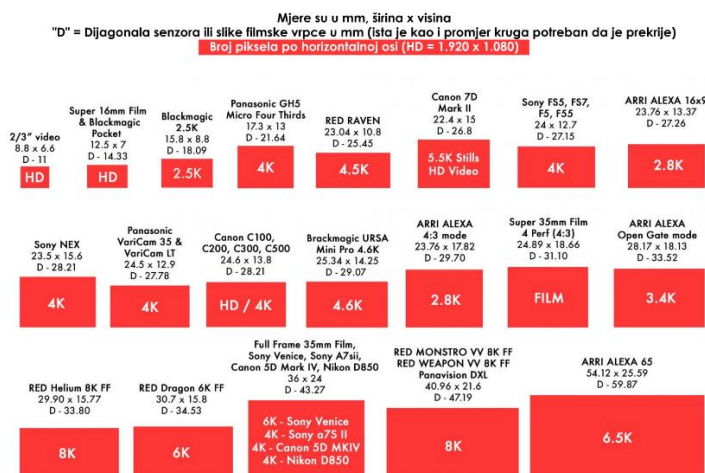
Koliko najviše elektrona fotoni mogu izbiti (maksimalni broj elektrona kojeg fotoelement može zadržati), a da to ima utjecaj na signal, određeno je mjerom *full well capacity*. Veći fotoelementi imaju veći kapacitet za zadržavanje izbijenih elektrona, što rezultira većom osjetljivošću fotoelemenata (a samim time i senzora), boljim odnosom signala i šuma (SNR) te većim dinamičkim opsegom. Mali fotoelementi tipično mogu zadržati 4.000 elektrona, srednji 10.000 elektrona, a veliki 50.000 elektrona. [19]

4.2. Veličine senzora i fotoelemenata

Slikovni senzori proizvode se u različitim veličinama, za različite primjene, od minijaturnih senzora u smartfonima, do velikih senzora u digitalnim fotoaparata i videokamerama. Senzori optimizirani za rad u videokamerama često imaju razlučivost koja odgovara maksimalnoj izlaznoj razlučivosti iz kamere te se ne radi preskakanje fotoelemenata (*photositeova*), kao što je to čest slučaj kod digitalnih fotoaparata, pogotovo ako su tu fotoaparati vrlo visoke razlučivosti.

Veća razlučivost senzora od izlazne nije nužno loša stvar, jer pomoću takvih senzora pri izlaznoj (nižoj) razlučivosti postoji potencijal za dobivanje detaljnije slike boljih boja (tzv. *oversampling*).

VELIČINE SENZORA I FILMSKI FORMATI



Slika 4.2 - Usporedni prikaz veličina senzora i formata filmskih kamera [20]

Slika 4.2 prikazuje razliku u veličini pojedinih senzora (širini, visini, dijagonali, površini), razliku u omjeru stranica te razliku u horizontalnim rezolucijama kod konkretnih kamera.

Kod televizijskih kamera tradicionalno se koriste kamere s RGB prizmom i tri senzora veličine 2/3 inča, a kod digitalne kinematografije koristi se jedan veći senzor s Bayerovom filtrom za boju. Obično su to senzori formata Super 35 ili *full frame*. Veličina fotoelemenata ovisi o veličini i razlučivosti senzora.

4.2.1. Senzori veličine 2/3"

Prelazak s HD razlučivosti na Ultra HDTV 1 razlučivosti predstavlja poseban tehnološki izazov za televizijske videokamere sa sensorima veličine 2/3" (8,8 x 6,6 mm, površine 58,1 mm²), jer tu nije ista situacija kao kod televizora, gdje je potrebno povećati (udvostručiti) dijagonalu, ako je cilj da kvaliteta slike ostane ista, što nije predstavljalo tako velik tehnološki izazov - nije bilo nekih tehničkih granica.

Kod televizijskih kamera, ako je cilj da ostatak sustava ostane isti, trebalo bi učeterostručiti broj fotoelemenata na samom senzoru, što znači da će pojedini fotoelementi tada biti tek 1/4 veličine fotoelemenata kod HD kamera, što nije optimalno.

Ako će se ostatak sustava mijenjati, uz zadržavanje dosadašnje veličine fotoelemenata, to bi podrazumijevalo puno veće kamere (pogotovo one s RGB prizmom i tri senzora) te posve nove, također gabaritima puno veće i puno skuplje objektivne, barem ako bi ti objektivni pokrivali isti raspon žarišnih duljina kao objektivni za senzore veličine 2/3". Stoga su za televizijske kamere izvedena alternativna, kompromisna rješenja.

Kamere za digitalnu kinematografiju nisu ograničene na taj način, a obično se biraju senzori veličine Super 35 (slično APS-C formatu senzora kod digitalnih fotoaparata) ili 35 mm film *full frame*.

4.2.2. Senzori veličine Super 35

Super 35 potječe od kinematografskog formata inicijalno poznatog kao Superscope 235, a dimenzije slike na 35-milimetarskoj celuloidnoj vrpici s četiri perforacije po slici, koja kroz kameru prolazi vertikalno, iznose 24,89 x 18,67 mm. [21]

U digitalnom svijetu veličina senzora Super 35 nema zadane dimenzije, a proizvođači kamera senzore međusobno različitih veličina označavaju kao Super 35. Primjerice, tvrtka RED u kameru Helium 8K S35 ugrađuje senzor dimenzija 29,9 x 15,77 mm (dijagonale 33,8 mm), a u kameru Gemini 5K S35 senzor dimenzija 30,72 x 18 mm (dijagonale 35,61 mm). Canon za Super 35 senzor ugrađen u EOS C300 Mark III i C70 navodi dimenzije aktivne površine senzora 26,2 x 13,8 mm (dijagonale 29,6 mm).

Te se dimenzije mogu usporediti s fotografskim sensorima veličine APS-C, kod kojih također postoje dvije izvedbe - 23,6 x 15,7 mm (Nikon, Sony, Pentax, Fuji) i 22,2 x 14,8 mm (Canon).

4.2.3. Senzori veličine 35 mm *full frame*

35 mm *full frame* senzori, koji se najčešće označavaju kao samo *full frame*, veličine su 36 x 24 mm. Ta veličina odgovara veličine slike na 35-milimetarskom formatu fotografskog filma. Naziv formata dolazi od širine fotografskog filma oznake 135. a kroz kameru, odnosno fotoaparat, prolazi horizontalno. [22]

Iako se i kinematografski i fotografski formati označavaju dimenzijom 35 mm, fotografski film kroz kameru prolazi horizontalno, zbog čega na njega stane veća slika, a na kinematografskom filmu slika formata Super 35 dolazi skoro do granica 35-milimetarskog filma kad kroz kameru prolazi vertikalno.

Uz ovaj format neizravno je vezan i pojam faktor izreza (*crop factor*, nekad označen kao *focal length multiplier*), koji služi za preračunavanja ekvivalentne žarišne duljine, ekvivalentnog otvora blende i ekvivalentne vrijednosti ISO kod uspoređivanja kamera sa sensorima različitih veličina. Faktor izreza definira odnos dijagonale slike na 35-milimetarskom filmu (a samim tim i dijagonale 35-milimetarskog *full frame* senzora) i dijagonale senzora za koji se žele znati ekvivalentni parametri. [23]

Shodno navedenom, faktor izreza za *full frame* senzor iznosi 1 pa kad se s fotoaparatom takve veličine senzora koriste objektivni namijenjeni fotoaparati koji snimaju na 35-milimetarski film, nema konverzije. Kod fotoaparata ili kamere manjeg (ili većeg) senzora treba obaviti preračunavanje. Primjerice, Sonyjevi APS-C fotoaparati imaju faktor izreza oko 1,5 pa objektiv žarišne duljine 24 mm na APS-C fotoaparatu pokriva isti kut kao objektiv žarišne duljine 36 mm na *full frame* fotoaparatu ili kameri.

4.2.4. Minimalna veličina fotoelementa

Kako se povećavaju razlučivosti senzora za digitalne kamere, smanjuje se veličina fotoelemenata (ako se ne povećaju dimenzije senzora). Smanjivanje fotoelemenata naizgled je ograničeno samo tehnološkim procesom, no postoje i teoretske, fizikalne granice, s obzirom da će tijekom određenog trajanja ekspozicije samo određeni broj fotona stići do fotosenzora. [24]

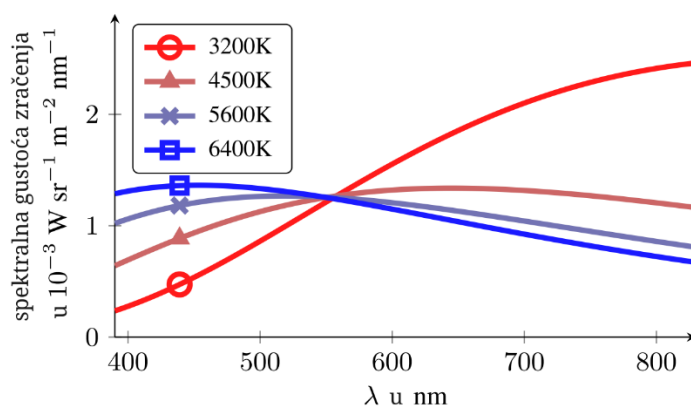
Danas već postoji proizvodni proces za izradu senzora (primarno namijenjenog smartfonima) veličine fotoelemenata od svega 0,64 μm , kao što je to slučaj s novim Samsungovim RGB Bayer CMOS senzorom Isocell HP1. To je senzor formata 1/1,22 inča, efektivne razlučivosti 16.384 x 12.288 fotoelemenata (200 M). Sposoban je za 8K video pri 30 FPS, 4K video pri 120 FPS te HD video pri 240 FPS. [25]

Tih 0,64 μm značajno je manje čak i od receptora u ljudskom oku, koji su veći od 3 μm . [24] Kad su fotoelementi vrlo mali, do nekih od njih će pristizati svega nekoliko fotona tijekom vremena ekspozicije, što će rezultirati niskim omjerom signala i šuma (*signal-to-noise ratio*, SNR) zbog *shot noisea* (šuma nastalog uslijed fluktuacije broja fotona koji udaraju u senzor).

Za idealni sustav (kad tehnologija ne bi imala nedostataka, kad bi efikasnost bila 100%), za zelenu svjetlost valne duljine 555 nm (valna duljina za koju je ljudsko oko najosjetljivije) teoretski najmanja veličina fotoelementa iznosi 0,9 μm . Taj izračun vrijedi za tipičnu scenu u zatvorenom prostoru, luminancije 100 cd/m^2 , koja se snima korištenjem savršeno prozirne leće otvora blende $f/2,8$ i senzora s faktorom ispune (*fill factor*) 1, kvantne efikasnosti 1.

Dodatni uvjeti su maksimalno vrijeme ekspozicije od 0,03 sekunde, te $\text{SNR} = \sqrt{1000} \approx 32$. Za SNR uzima se drugi korijen od 1000 jer su psihofizička istraživanja pokazala da je 1000 fotona granica za uočavanje *shot noisea*.

Na otvorenom prostoru, pod dnevnim svjetlom luminancija je tipično $10^4 \text{cd}/\text{m}^2$, a u idealnim uvjetima to bi značilo da je minimalna veličina piksela bila od 5 do 0,09 μm , ovisno o trenutnom intenzitetu osvjetljenja.



Slika 4.3 - Spektralno zračenje crnih tijela temperature T pri radijanciji (gustoća zračenja) kojeg ljudsko oko percipira kao luminanciju od 100 cd/m^2 [24]

Osim izračuna za zelenu (monokromatsku) svjetlost, mogu se napraviti i izračuni za bijelu svjetlost iz žarulje, određene temperature boje, na temelju modela spektralnog zračenja crnog tijela. Na slici (Slika 4.3) prikazano je spektralno zračenje četiri crna tijela u vidljivom dijelu spektra.

IZVOR SVJETLA	ČUNJIĆ L	ČUNJIĆ M	ČUNJIĆ S	SVJETLINA
T = 3200 K	0,86	1,04	2,13	0,89
T = 4500 K	0,89	1,02	1,64	0,90
T = 5600 K	0,90	1,01	1,45	0,90
T = 6400 K	0,91	1,01	1,36	0,90
$\lambda = 555 \text{ nm}$	0,92	0,92	26,00	0,90

Tablica 4.1 - Minimalna veličina fotoelementa u μm , dobivena na temelju radiometrijskih izračuna [24]

Kad se normalizira spektralno zračenje tako da ljudsko oko percipira 100 cd/m^2 , za scenu u zatvorenom prostoru dobe se rezultati prikazani u tablici (Tablica 4.1). Izražena je minimalna veličina fotoelementa koji bi odgovarali odzivu određenih vrsta čunjića u ljudskom oku na određenu svjetlost, uz pretpostavku idealne kamere s idealnim filtrima za boju, uz maksimalnu teoretsku efikasnost. Dakle, ovisno o tome na koje bi valne duljine određeni fotoelement trebao reagirati, fotoelementi koji odgovaraju čunjićima za srednje (M) i duge (L) valne duljine svjetlosti trebali bi biti veličine od barem $0,86\text{-}1,04 \mu\text{m}$.

Situacije je drugačija s fotoelementima koji bi trebali odgovarati čunjićima za kratke valne duljine svjetlosti (S), odnosno čunjićima za plavu svjetlost. Ovisno o temperaturi boje svjetla, oni bi trebali biti veliki barem $1,36 \mu\text{m}$ za svjetlo temperature boje 6400 K , odnosno barem $2,13$

μm za svjetlo temperature boje 3200 K. Za fotoelemente za plavu svjetlost ujedno se vidi ekstremna situacija za zelenu svjetlost valne duljine 555 nm, za koje bi fotoelement trebao biti veličine čak 26 μm . Razlog tomu je što kod kratkih valnih duljina fotoni imaju veću energiju pa ih je brojčano manje za jednaki tok zračenja (radijacijski fluks). To ujedno objašnjava lošijim performansama u plavoj komponenti kod tipičnih digitalnih kamera.

Svi ovi izračuni temelje se na teoretskim granicama za idealne senzore, a to su granice koje stvarni senzori ne mogu postići. Više je faktora za to. Stvarni senzori nemaju faktor ispune 100% (iako su se senzori kojima se osvjetljava pozadina fotoelemenata - *backside illumination*, odnosno BSI senzori, tome jako približili). Stvarni senzori imaju nižu kvantnu efikasnost, pogotovo kod očitavanja boje, gdje kvantna efikasnost može biti i oko 50%.

Postoje još dvije prepreke. Jedna je ograničen kapacitet fotomjesta za skupljanje elektrona (električnog naboja) do očitavanja. Aptina za neke starije senzore navodi kapacitet od 5000 elektrona, što odgovara dinamičkom opsegu od 5:1 od vidljivog šuma do preeksponiranosti. [26] Taj se problem može umanjiti višestrukim očitanjima tijekom ekspozicije.

Druga prepreka je optička difrakcija, koja će, čak i s idealnom optikom, onemogućiti postizanje više razlučivosti ako je fotomjesto manje od kritične veličine po Sparrowom kriteriju:

$$d_{p,crit} = \frac{\lambda}{2} \cdot f/D \quad (1)$$

Ako se u formulu uvrste parametri iz prvog izračuna, dakle $f/D = 2,8$ i $\lambda = 555$ nm, ispada da je kritična veličina fotoelementa 0,78 μm , i to u idealnim uvjetima. Ako se blenda pritvori, minimalna veličina fotoelementa raste. [24] Primjerice, za $f/D = 5,6$, minimalna veličina fotoelementa je 1,56 μm .

4.2.5. Optimalna veličina fotoelementa

Veličina senzora i razlučivost određuju gustoću fotoelemenata na senzoru, a time i veličinu fotoelemenata. Iako tehnološki proces dopušta izradu senzora s vrlo sitnim fotoelementima, kao što je to slučaj sa sensorima u smartfonima, takvi senzori imaju inferiorne mnoge kvalitativne aspekte. Koja bi bila optimalna veličina fotoelementa, može se procijeniti na temelju veličine fotoelemenata kod profesionalnih kamera visokog razreda. [27]

Tip kamere	Veličina fotoelementa
Full frame DSLR kamere	(5-6 μm) ²
APS-C DSLR kamere	(4-5 μm) ²

4K digitalne kinematografske kamere (sa Super 35 senzorom)	$(5-7 \mu\text{m})^2$
1080p televizijska kamera (sa senzorima veličine 2/3")	$(5 \mu\text{m})^2$

Tablica 4.2 - Veličina fotoelemenata kod različitih vrsta kamera visokog razreda [27]

Iz tablice (Tablica 4.2) vidljivo je da takve kamere imaju fotoelemente dimenzija oko $5 \times 5 \mu\text{m}$ i tome bi trebalo težiti za stvaranje novih modela kamera koje će ponuditi povećanje kvalitete slike.

Iznimka od navedenih $5 \times 5 \mu\text{m}$ televizijske su CCD kamere kad snimaju sliku s proredom, jer se tada spajaju po dva vertikalna fotoelementa, čime oni efektivno postaju jedan fotoelement veličine $5 \times 10 \mu\text{m}$. Time se udvostručava osjetljivost senzora te dinamički opseg naspram situacije kad kamera snima sliku bez proreda. Slično spajanje fotoelemenata radilo se kod *frame transfer* CCD senzora koji su se mogli bez gubitaka prebacivati iz 1080 u 720 linija. Spajanje fotoelemenata na samom senzoru također je radila jedna od prvih kamera za digitalnu kinematografiju, koja je sliku kvazi-cinemascope formata, omjera stranica 2,37:1, snimala u HD razlučivosti.

Kako televizijske kamere HD razlučivosti (1920×1080) sa senzorima veličine 2/3" imaju veličinu fotoelementa od $5 \times 5 \mu\text{m}$, to bi značilo da bi dizanjem razlučivosti na UHDTV1 (3840×2160) veličina fotoelementa spala na $2,5 \times 2,5 \mu\text{m}$. To bi za posljedicu imalo pad osjetljivosti od barem četiri puta, a smanjio bi se i dinamički opseg. Tu se ne može očekivati značajan napredak CMOS tehnološkog procesa, s obzirom da je kvantna učinkovitost (postotak fotona koji srazom s fotoreaktivnom površinom uzrokuju električni naboj) već viša od 60%. Također, i faktor ispunje fotoelemenata približio se 100% pri relevantnim otvorima blende pa ni tu nije moguć napredak.

Daljnja prepreka je potreba za visokim brzinama izmjena slika (HFR, High frame rate). Viša brzina izmjena slike podrazumijeva veću brzinu zatvarača, odnosno kraće vrijeme ekspozicije, čime se efektivno smanjuje osjetljivost. [27]

Sve to ipak nije spriječilo proizvođače da proizvode i senzore s manjim fotoelementima, čak i za profesionalne potrebe. Primjer je Grass Valley, koji je 2021. godine proizveo 2/3-inčni CMOS senzor UHD1 razlučivosti osjetljivosti značajno više od tipičnih CCD senzora, a više čak i od mnogih 2/3-inčnih CMOS senzora. [28]

4.2.6. Identifikacija boja - Razlaganje svjetlosti na RGB komponente

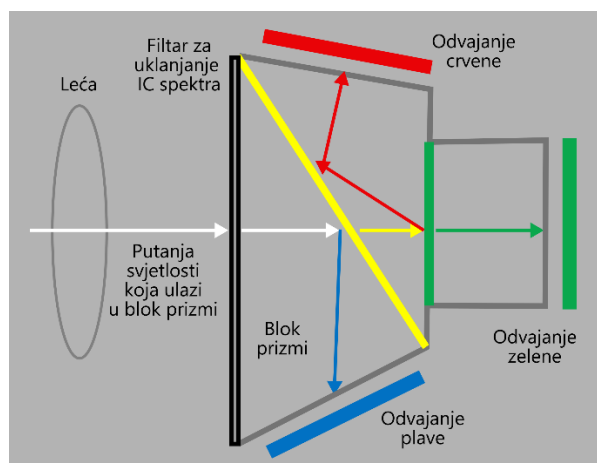
Fotoelementi na slikovnim senzorima primaju bilo kakvu vidljivu svjetlost, bilo koje boje ili kombinacije boja, odnosno primaju svjetlost u vidljivom dijelu spektra. Drugim riječima, fotoni,

koji dođu do fotoosjetljive površine (najčešće fotodioda), pretvorit će se u električni naboj. Stoga bi se moglo reći da su senzori sami po sebi monokromatski pa je na neki način potrebno razdvojiti svjetlost na primarne boje, kako bi senzori mogli registrirati boje.

Dva su temeljna načina za to - korištenjem prizme s dikroidnim filtrima (crvenim, zelenim i plavim), koja će razlomiti upadnu svjetlost u tri osnovne boje primarne aditivne sinteze (crvenu, zelenu i plavu) i svaku od tih komponenti reflektirati u odgovarajući senzor, te korištenje filtra-filtra za boju, najčešće s Bayerovim uzorkom, pomoću kojeg za individualne fotoelemente propušta samo svjetlost željene boje. [29]

4.2.6.1. Blok prizmi i tri senzora

Kamere s tri (ili četiri) senzora imaju optičku prizmu (zapravo blok prizmi) - strukturu na koju su nanoseni tanki slojevi materijala koji filtriraju svjetlost na određene opsege boja. Najčešći je RGB blok prizmi, koji razdvaja svjetlost na crvenu, zelenu i plavu.

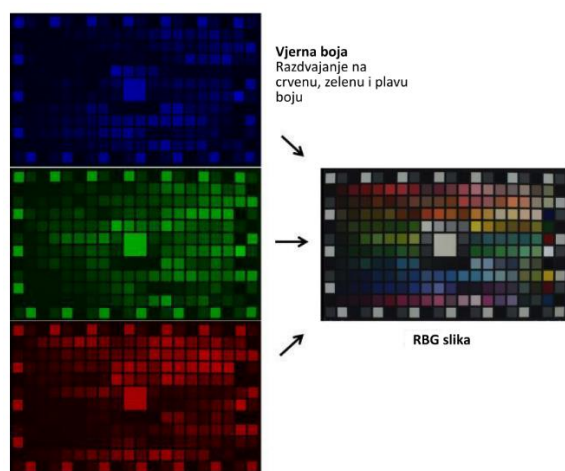


Slika 4.4 - Ilustracija razlaganja svjetlosti pomoću bloka prizmi s dikroidnim zrcalima (filtrima) na tri komponente, od kojih se svaka komponenta svjetlosti reflektira u zasebni senzor [29]

Kad svjetlost prođe kroz objektiv, prolazi kroz filtar za uklanjanje infracrvenog dijela spektra. Prvo se iz svjetlosti odvaja plavi dio spektra (kraće valne duljine), koji se reflektira u senzor za plavu boju. Zatim se odvaja crveni dio spektra, pa na kraju ostane zeleni dio spektra koji prolazi kroz blok prizmi.

Na taj način svaki od tri senzora primi samo svjetlost koja odgovara ciljanom opsegu valnih duljina, odnosno traženoj primarnoj boji. Prizme same po sebi zapravo ne utječu na boju, nego služe kao podloga za dikroidne filtre (*dichroic filter*), putem kojih se odgovarajuće svjetlo reflektira u odgovarajući senzor. Dikroidni filtar propušta jedan raspon valnih duljina svjetlosti, a reflektira ostale. Izveden je kao višeslojni (oko 20-tak slojeva) tanki premaz na staklenoj

površini prizme. Kako kod dikroidnih filtara postoje određena preklapanja i teško je izvesti filter koji će savršeno pokrivati potrebni raspon valnih duljina, na izlaze iz prizmi dodaju se filtri koji će ukloniti neželjene valne duljine za konkretni senzor (*shaping filters*). [30]



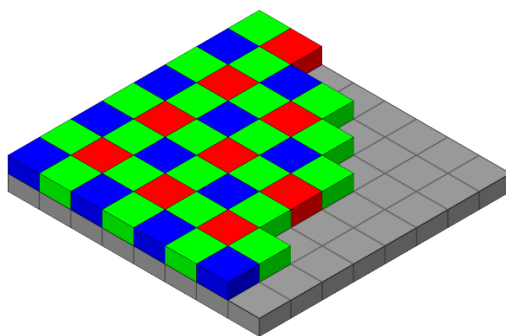
Slika 4.5 - Pikseli konačne slike kod sustava prizmi s tri senzora, s prostorno usklađenim senzorima [29]

Svaki piksel slike dobivene pomoću sustava s prizmama i tri senzora ima punu informaciju o boji kad su sva tri senzora prostorno precizno usklađena. Boja tada odgovara stvarnosti, odgovara svjetlosti koja je došla do tih konkretnih fotoelemenata, odnosno nema interpolacije.

To ne vrijedi kad je riječ o konfiguraciji senzora koji su pomaknuti jedan u odnosu na drugi, kako bi se dobila viša razlučivost nauštrb kvalitete boje, kao što je to slučaj s korištenjem tri HD senzora za UHDTV1 razlučivost izlaza kamere.

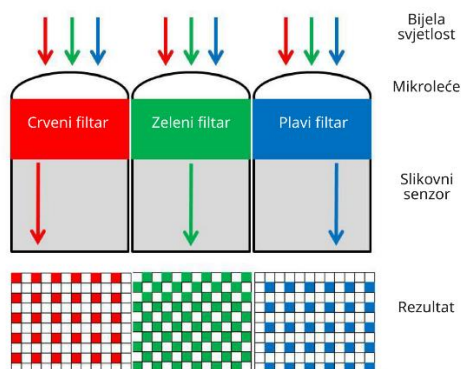
4.2.6.2. Bayerov filter

Rješenja s tri senzora skuplja su, fizički kompliciranija (traže sustav prizmi), traže više prostora unutar kamere (što bi bilo posebno problematično kod većih senzora) te zahtijevaju posebne objektivne namijenjene baš kamerama s tri senzora za optimalno funkcioniranje. Tu u priču ulaze senzori s Bayerovim filtrom za boju (CFA - *color filter array*) .



Slika 4.6 - Raspored filtara za boju u Bayerovoj matrici [31]

Uređaji koji koriste senzor s Bayerovim filtrom nemaju prizmu te koriste samo jedan senzor. To su kamere za digitalnu kinematografiju, poneka televizijska kamera, DSLR i *mirrorless* fotoaparati, pametni telefoni, web-kamere, nadzorne kamere, akcijske kamere, autokamere...



Slika 4.7 - Bayerov filter na fotoelementima i matrice piksela koje nastaju kao posljedica korištenja tog filtra [29]

Senzori s Bayerovim RGB filtrom imaju matricu filtara za boju iznad fotoelemenata, a ispod mikroleća, ako senzor koristi mikroleće. Uzorak je 2 x 2, pri čemu su dva zelena filtra postavljena dijagonalno, a na drugu dijagonalu postavljene su crveni i plavi filter.

Postoje i rješenja s alternativnim uzorcima, poput RGBW, pri čemu je W znači da tu nema filtra za boju (W se odnosi na White, odnosno bijelo svjetlo), čime senzor gubi osjetljivost za zelenu boju, ali pojačavaju se performanse pri slabom svjetlu, te Fujifilmova X-Trans matrica uzorka veličine 6 x 6, s puno više fotoelemenata rezerviranih za zelenu boju. Te alternativne matrice ne koriste se u profesionalnim videokamerama.

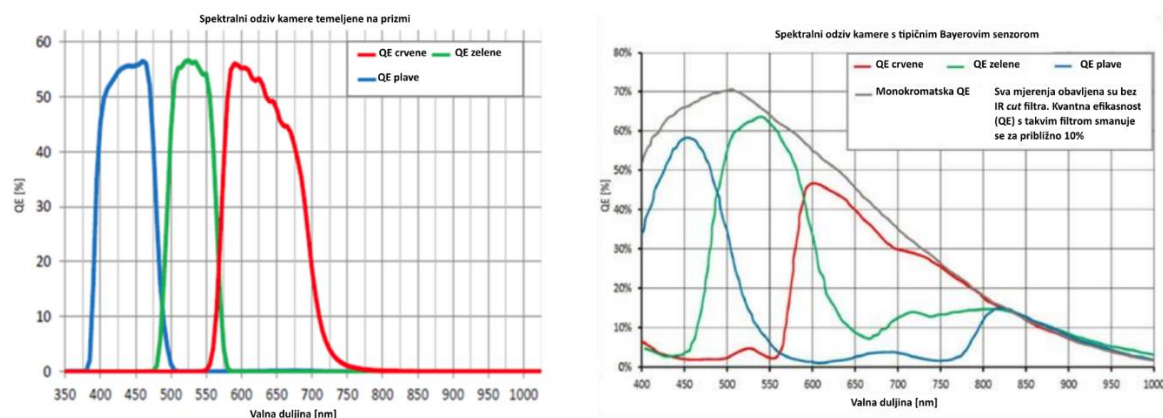
Dok kamere s prizmom i tri senzora razlažu svjetlost na opsege valnih duljina koje idu u specifične senzore, kod Bayerovog filtra za pojedine fotoelemente propuštaju se samo valne duljine koje odgovaraju toj boji, dok se ostale blokiraju, što dovodi do smanjene osjetljivosti

senzora. Bayerov je filtar u osnovi mozaik, te se konačna boja za svaki pojedini piksel mora rekonstruirati (interpolirati) na temelju boje sa susjednih fotoelemenata, za što postoje različiti algoritmi (obično se nazivaju *debayering* ili *demosaiicing* algoritmi).

Kad se koriste senzori iste razlučivosti, sustav prizme s tri senzora i Bayerov sustav uvelike će se razlikovati po broju fotoelemenata za svaku boju. Ako su oba tipa senzora HD razlučivosti (1920 x 1080), to znači da sustav s RGB prizmom i tri senzora ima oko 2 milijuna crvenih, 2 milijuna zelenih i 2 milijuna plavih "piksela". Senzor s Bayerovom matricom ima oko 1 milijun zelenih, 0,5 milijuna crvenih i 0,5 milijuna plavih "piksela". Ako su senzori iste veličine, time senzor s Bayerovom matricom gubi 2 koraka ekspozicije (2 f-stopa) osjetljivosti na račun ukupno manje površine senzora (tri čipa umjesto jednog) i na račun filtriranja boje. [32] Primjerice, na fotoelementu za crveni piksel potpuno se izgube zelena i plava komponenta svjetlosti, dakle po fotoelementu iskoristi se 1/3 svjetlosti, a gubi se 2/3 svjetlosti.

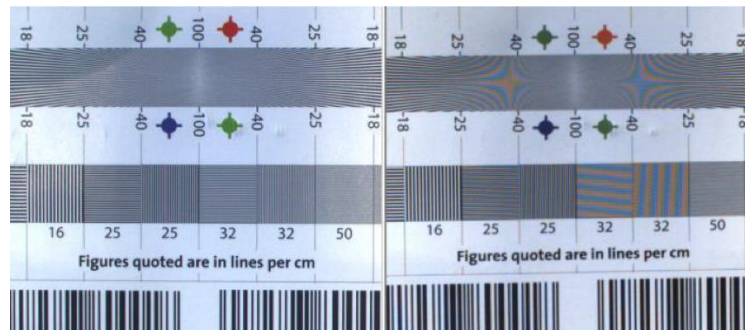
4.2.6.3. Spektralno razdvajanje

Ni prizme, a ni filtri kod Bayerove matrice nisu savršeni, što znači da će dio valnih duljina svjetlosti dolaziti u pogrešne fotoelemente, odnosno dolaziti će do miješanja boja. To je mnogo veći problem kod Bayerovog filtra, jer su boje ili pigmenti koji se koriste kod njih manje efikasni nego dikroidni interferencijski filtri kod sustava prizmi.



Slika 4.8 - Usporedba spektralnog odziva sustava s prizmama i tri senzora te tipičnog Bayerovog senzora bez odbacivanja IR dijela spektra [29]

Kao što se vidi sa slike (Slika 4.8), kod senzora s Bayerovim filtrom ima puno više preklapanja između pojedinih RGB komponenti, što negativno utječe na kvalitetu slike, odnosno kvalitetu, živost boje.



Slika 4.9 - Usporedba snimke testnog uzorka (brojevi na uzorku izraženi su u linijama po centimetru) dobivene kamerom s prizmom i kamerom s Bayerovim senzorom [29]

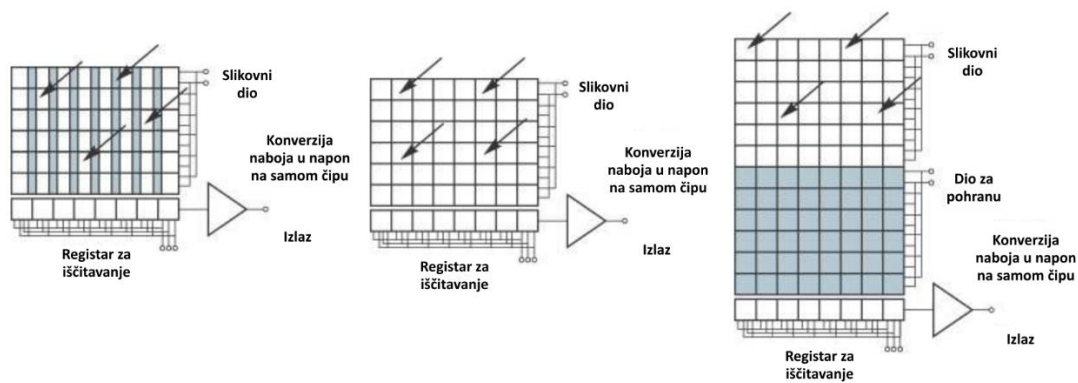
Bayerova matrica češće može uzrokovati probleme s finim uzorcima, kao što se to vidi u ovoj usporedbi (Slika 4.9) - lijevo je uzorak s gusto raspoređenim linijama snimljen kamerom s prizmom, a desno kamerom s Bayerovim senzorom, gdje se jasno vidi *moiré* efekt.

4.3. Princip rada CCD i CMOS senzora

4.3.1. Princip rada CCD senzora

CCD (*charge-coupled device*) slikovni senzori analogni su uređaji, odnosno izlaz CCD senzora niz je električnih naboja (skupine fotoelektrona) dohvaćenih i premještenih sa svakog pojedinog fotoelementa iz matrice. Kamerama za stvaranje slike trebaju digitalne vrijednosti koje predstavljaju količinu električnog naboja na svakom fotoelementu, a da bi kamera to dobila od CCD senzora, u kameri mora biti implementiran odgovarajući sklop. Taj se sklop sastoji barem od pojačala naboja (*charge amplifier*), koje će električni naboj pretvoriti u napon proporcionalan električnom naboju, te analogno-digitalnog (A/D) pretvarača, koji će izmjeriti napon i tu vrijednost proslijediti kameri u digitalnom obliku.

Sam senzor sastoji se od matrice fotoelemenata koji pohranjuju električni naboj ispod fotodiode, u sloju silicija tipa p, te analognih posmačnih registara (*shift registera*). Posmačni registri na CCD senzorima su strukture u siliciju tipa p, pomoću kojih se, korištenjem grupa od po tri elektrode, naboj kroz senzor premješta do susjednog mjesta.



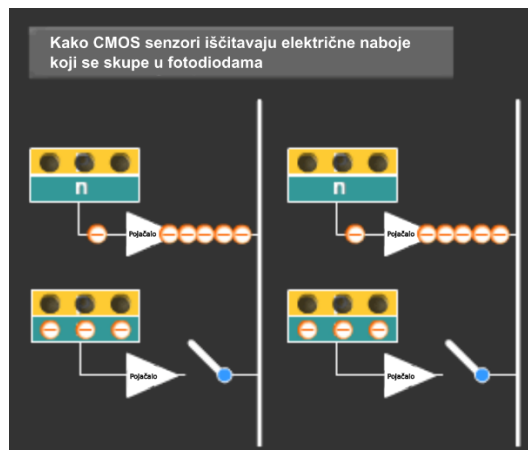
Slika 4.10 - Vrste CCD slikovnih senzora s obzirom na način prijenosa naboja na izlazni pin - međulinijnski (*interline transfer*), poluslikovni (*full frame*) i poluslikovni međulinijnski (*frame transfer*) CCD [33]

Ako je riječ o tipično korištenom međulinijnskom (*interline transfer*) CCD-u, senzor ima onoliko vertikalnih *shift-registara* koliko ima stupaca fotoelemenata te ima jedan horizontalni *shift-register*. Nakon što se završi ekspozicija fotoelemenata, naboj se prebaci u vertikalne *shift-registere* uz svaki fotoelement i počinje seljenje naboja prema horizontalnom *shift registeru* - registru za iščitavanje (*readout register*). Horizontalni *shift register*, nakon što primi naboje svih fotoelemenata u retku, naboje iz tog retka seli na izlaz senzora. Taj se proces ponavlja sve dok se naboj sa svih fotoelemenata senzora ne premjesti na izlaz senzora, čime je senzor sklopovlju kamere prosljedio reprezentaciju jedne slike.

Osim *interline transfer* CCD-a, postoje još i poluslikovni (*full frame*) CCD i poluslikovni međulinijnski (*frame transfer*) CCD, koji ne koriste vertikalne *shift registre*. Umjesto njih, *full frame* CCD kao *shift registre* koristi fotoelemente, a *frame transfer* CCD polovicu senzora rezervira za privremeno spremanje naboja (koja će se kasnije koristiti isto kao i *shift registri*) u koju, nakon eksponiranja senzora (fotoelemenata), u vrlo kratkom vremenu prebaci naboje iz eksponirane polovice senzora u polovicu za spremanje naboja. [33]

4.3.2. Princip rada CMOS senzora

Za razliku od CCD senzora, izlaz iz CMOS senzora digitalni su podaci (ako konkretni CMOS senzor ima A/D pretvarač za videosignal). CMOS senzori općenito u isti čip imaju integrirano više komponenti, više sklopova. Fotoelementi kod CMOS senzora također pretvaraju fotone u električni naboj, međutim konverzija električnog naboja u napon vrši se unutar svakog pojedinog fotoelementa.

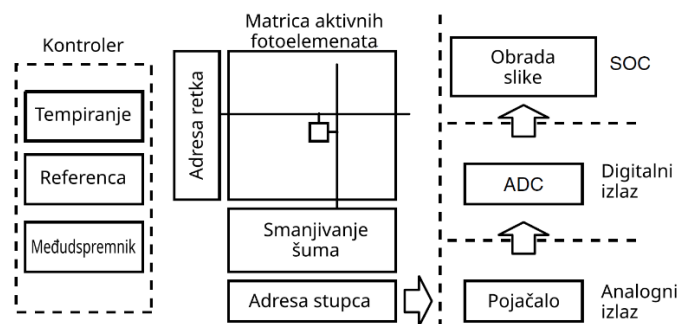


Slika 4.11 - CMOS senzor iščitava se liniju po liniju (liniju za linijom), pri čemu se naboj iz fotodiode (p-n materijal) [34]

Postoje CMOS senzori s aktivnim i pasivnim fotoelementima. Senzori s aktivnim fotoelementima u sklopu svakog fotoelementa imaju pojačalo, dok ga senzori s pasivnim fotoelementima nemaju (kao što ni fotoelementi u CCD senzorima nemaju pojačalo u svakom fotoelementu). U kamerama namijenjenima snimanju videa u pravilu se koriste CMOS senzori s aktivnim elementima, jer pojačanje signala na izvoru (u fotoelementu) čini ga otpornijim na pojavu šuma prilikom prijenosa.

Međutim, kako svaki fotoelement ima svoje pojačalo, to za posljedicu ima nešto nižu uniformnost, koja može negativno utjecati na sliku - povećanje šuma uslijed neujednačenosti. Ta vrsta šuma naziva se *fixed pattern noise*, jer se ta neujednačenost može promatrati kao obrazac (*pattern*). Stoga CMOS senzori s aktivnim fotoelementima često imaju integriran sklop za smanjivanje šuma unutar samog fotoelementa.

Izlaz iz svakog fotoelementa CMOS senzora je napon, a senzori za kamere u pravilu se eksponiraju i očitavaju liniju po liniju, što znači svaki idući red zabilježi ono što je bilo pred objektivom djeličak milisekunde nakon prethodnog, odnosno retci nisu eksponirani u potpuno identičnom trenutku. To za posljedicu ima efekte koje uzrokuje rolajući zatvarač, osim ako se na neki način nije omogućio efektivni globalni zatvarač, primjerice dodavanjem dva tranzistora i zaštićenog mjesta za spremanje naboja (efektivno bi se moglo reći da se tu onda radi o kondenzatoru) po svakom pikselu. Česta izvedba CMOS senzora je ona kod koje svaki stupac ima svoj sklop za smanjivanje šuma i svoje (pret)pojačalo, a mogu se koristiti i višestruki analogno-digitalni pretvarači radi ubrzavanja procesa iščitavanja, kao što je slučaj sa Xensium-FT CMOS senzorom.



Slika 4.12 - Jedna od mogućih konfiguracija CMOS senzora [35]

No, iako je CMOS senzor u osnovi analogni uređaj (signal iz fotoelemenata je napon, odnosno signal je analogni), prema izlazu CMOS senzori mogu biti jednog od tri tipa [35]:

- senzori s analognim izlazom (slično CCD-ovima),
- senzori s digitalnim izlazom (kad su analogno-digitalni pretvarač, odnosno ADC, i prateći sklopovi integrirani u sâm senzor),
- SOC (*System-on-a-chip*) tip senzora, kod kojeg su u senzor integrirani fotoelementi, analogni dio, digitalni dio te obrada slike.

4.4. Usporedba tehnologija senzora CCD i CMOS

Princip rada CCD i CMOS senzora u određenoj je mjeri sličan, no razlike između njih, poput toga gdje se vrši pretvorba električnog naboja u napon, rezultiraju u brojnim različitim karakteristikama.

Karakteristika	CCD	CMOS
Signal iz fotoelementa	paket elektrona	napon
Signal iz čipa	analogni (napon)	digitalni (bitovi)
Šum tijekom iščitavanja	Nizak	niži pri ekvivalentnom FPS-u
Faktor ispune	Visok	srednji do nizak
Foto-odziv	srednji do visok	srednji do visok
Osjetljivost	Visoka	viša
Dinamički opseg	Velik	umjeren do velik
Ujednačenost	Visoka	malo niža
Potrošnja energije	umjeren do visoka	mala do umjeren
Zatvarač	brz, efikasan	brz, efikasan
Brzina	srednja do visoka	viša
Windowing (iščitavanje samo dijela fotoelemenata)	Ograničeno	moguće na više načina

Anti-blooming (sprječavanje širenja električnog naboja na susjedne fotoelemente)	visoko do nepostojeće	visoko, uvijek
Artefakti u slici	Razmazivanje, gubitak naboja prilikom prijenosa (seljenja)	Šum fiksnog uzorka (Fixed Pattern Noise), Pokret (elektronički rolajući zatvarač), parazitska osjetljivost na svjetlo (Parasitic Light Sensitivity)
Biasing i clocking	višestruko, viši napon	isto za sve fotoelemente, niski napon
Kompleksnost sustava	Visoka	niska
Kompleksnost senzora	Niska	visoka
Relativna cijena istraživanja i razvoja	Niska	niska ili visoka, ovisno o seriji

Tablica 4.3 - Usporedba karakteristika CCD i CMOS senzora [36]

Kao što je prikazano u tablici (Tablica 4.3) svaka od tehnologija ima svoje prednosti i mane, zbog čega ni jedna od tehnologija nije univerzalno rješenje za sve primjene. Međutim, za većinu primjena, pogotovo s napretkom tehnološkog procesa proizvodnje CMOS čipova, prednosti CMOS senzora pokazale su se presudnim za većinu primjena.

Jedna od najvažnijih prednosti je smanjenje kompleksnosti sustava (kamere, fotoaparata, mobilnog telefona, digitalnog mikroskopa...) jer su CMOS senzori u pravilu SoC arhitekture, odnosno uređaj s takvim senzorem od senzora dobiva elemente slike u digitalnom obliku. Osim kompleksnosti sustava, a ovisno i o količini proizvedenih primjeraka senzora, proizvodnja sustava s CMOS sensorima može biti jeftinija.

Važna prednost CMOS senzora je i manja potrošnja električne energije. CMOS senzori ujedno ne pate od vertikalnog razmazivanja. CCD senzori imaju prednost u tome što inherentno imaju globalni zatvarač, dok većina CMOS senzora ima rolajući zatvarač i probleme povezane s njim. [36]

S obzirom da CMOS senzori imaju pojačalo za svako fotomjesto ili svaki stupac, to dovodi do manje uniformnosti, odnosno do povećanog šuma fiksnog uzorka. Zbog paralelnog iščitavanja fotoelemenata s CMOS senzora, oni omogućavaju višu frekvenciju slike pri usporedivim razlučivostima, s obzirom na broj žica. Također mogu pristupiti individualnim fotoelementima iz jednog ili više područja na senzoru te tako postići brže i fleksibilnije iščitavanje. Do artefakata poput *bloominga* i razmazivanja ne dolazi jer nema prijenosa električnog naboja kroz senzor, nego se naboj pretvara u napon u samim pikselima, a zbog toga se CMOS senzori ujedno mogu nositi s preeksponiranim dijelovima u slici, te je u HDR načinu rada, zbog velike dinamike

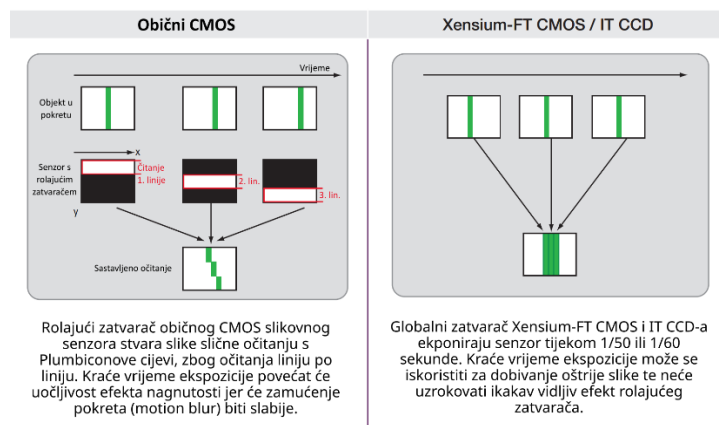
fotoelemenata, moguće ostvariti visoki kontrast uz vrlo svijetle objekte na slici, a da budu vidljiva i tamnija područja slike. [37]

4.5. Rolajući zatvarač (*rolling shutter*)

4.5.1. Utjecaj rolajućeg zatvarača na sliku

Globalni zatvarač (*global shutter*) kod CCD-ova znači da su svi pikseli izloženi svjetlosti kroz isto vrijeme ekspozicije, odnosno u istom trenutku. Električni naboj na senzoru je zadržan i može se iščitati prije sljedeće ekspozicije.

To nije slučaj kod običnih CMOS senzora - oni imaju rolajući zatvarač (*rolling shutter*). Kod njih se sadržaj sa senzora iščitava liniju po liniju, no kondenzator svakog fotoelementa puni se električnim nabojem sve dok se ne počne s iščitavanjem. Kako se svaka linija iščitava u različitom vremenskom odsječku, to znači da treba određeno vrijeme da se iščita cijeli senzor i to može potrajati i nekoliko desetaka milisekundi, ovisno o veličini senzora. Shodno tome, zadnja se linija senzora i eksponira i iščita nekoliko desetaka milisekundi nakon prve pa će dovoljno brzi pokret u kadru biti snimljen u različitim vremenskim trenucima na različitim dijelovima senzora.

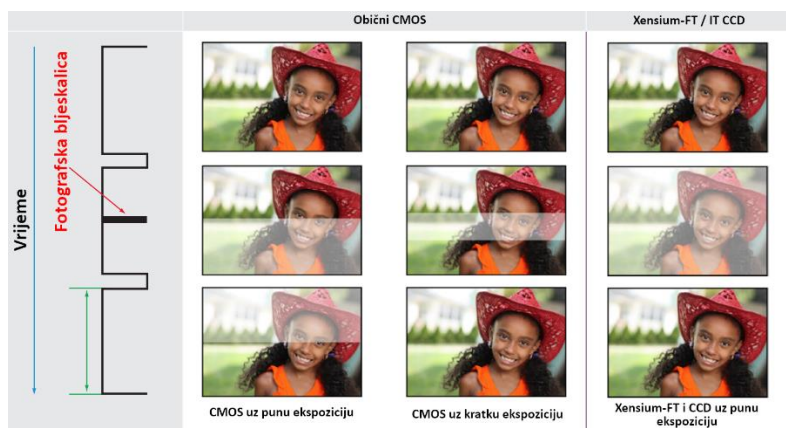


Slika 4.13 - Usporedba iščitavanja sadržaja s običnog CMOS senzora (s rolajućim zatvaračem) i senzora s globalnim zatvaračem (CCD senzori i CMOS senzori s pet tranzistora) [38]

Nekoliko je vizualnih efekata (artefakata) rolajućeg zatvarača. Najčešći su nagnute linije koje bi trebale biti vertikalne (Slika 4.13), što će se dogoditi prilikom bržeg švenka (okretanja kamere lijevo-desno), no kamera može biti i statična i snimati objekt u pokretu, primjerice vlak iz profila

- tada će ostatak scene odgovarati stvarnosti, no vlak će biti izobličen, "nagnut" u jednu stranu (u suprotnu od one prema kojoj ide). [39]

Druga posljedica je "proširenje" prve - "žele" efekt. Kad se kamera trese, na primjer kad se s njom hoda bez prikladne stabilizacije, scena, a pogotovo objekti u pokretu, bit će nepravilno izobličeni, jer se stalno mijenja usmjerenost kamere (gore-dolje-lijevo-desno).



Slika 4.14 - Ilustracija snimanja kadra u trenutku okidanja fotografske bljeskalice kod CMOS senzora s rolajućim zatvaračem kad se koristi puna te kad se koristi kratka ekspozicija, te kod CCD i Xensium-FT senzora s globalnim zatvaračem, pri punoj ekspoziciji [39]

Treća posljedica je snimanje događaja za vrijeme kojeg se koristila fotografska bljeskalica. Kod senzora s globalnim zatvaračem, u trenutku okidanja bljeskalice kadar će biti preeksponiran (slika svijetla ili posve bijela, ovisno o ekspoziciji i jakosti bljeska). Kod senzora s rolajućim zatvaračem, bljesak će biti preko samo dijela slike, odnosno uzrokovat će horizontalnu prugu posvijetljenja slike na jednoj ili više slika snimke, ovisno o duljini ekspozicije. [39]

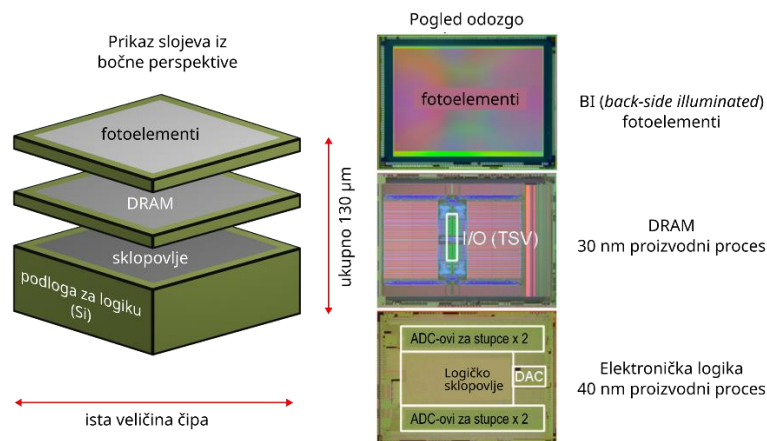
4.5.2. Mogući načini sprječavanja ili umanjivanja posljedica rolajućeg zatvarača

Postoji nekoliko načina na koje se problem *rolling shuttera* može riješiti ili drastično umanjiti. Jedan od načina je korištenje mehaničkog zatvarača, kao kod kamera koje snimaju na celuloidnu vrpcu, kod kojih je zatvarač rotirajući disk iz kojeg je izrezan određeni kut. [40]

Drugi način je dodavanje dva dodatna tranzistora u svaki piksel CMOS senzora, koji će odvojiti fotodiodu od kondenzatora te time odvojiti vrijeme za eksponiranje od vremena za iščitavanje, što je detaljnije objašnjeno u analizi 2/3-inčnog senzora Xensium-FT. S dva dodatna tranzistora senzor dobiva funkcionalnost globalnog zatvarača. [39]

Treći je integriranje memorije (DRAM-a) u sam senzor. Princip rada takvih senzora demonstrirao je Sony sa složenim (*stacked*), troslojnim senzorom: sloj s fotoelementima, sloj s

DRAM-om i sloj s elektroničkim sklopovljem. Sonyjev čip rezolucije je 19,3 megapiksela, s 1 Gbit DRAM-a, s fotoelementima veličine $1,22 \times 1,22 \mu\text{m}$, može postići 120 FPS uz iščitavanje svih 19,3 milijuna piksela, a u HD razlučivosti postiže iščitavanje pri 960 FPS. Razlog razvoja tog senzora je nemogućnost da se u sensor tako sitnih (i sitnijih) fotoelemenata ugradi sklopovlje za čuvanje električnog naboja unutar fotoelemenata. Taj sensor i dalje ima rolaajući zatvarač, no brzina iščitavanja fotoelemenata povećana je za do 120 FPS. [41]



Slika 4.15 - Sonyjev troslojni CMOS senzor s globalnim zatvaračem, mogućim zahvaljujući prijenosu DRAM-u [41]

Iako je to premala veličina piksela za profesionalnu uporabu (ciljni proizvodi za taj senzor su smartfoni), ta se tehnologija može iskoristiti i na velikim sensorima, s velikim pikselima, kao što je to slučaj s fotoaparatom Sony A9. U tom se aparatu DRAM (Dynamic random-access memory) u senzoru doduše koristi samo za fotografiranje, kako bi se postiglo doista nečujno fotografiranje bez korištenja mehaničkog zatvarača [42] (što može biti važno prilikom fotografiranja raznih ceremonija, konferencija), no isti bi se princip mogao iskoristiti i kod kinematografskih kamera.

Sony je nagovijestio potencijal tehnologije složenih senzora, a Canon sproveo u praksu novim fotoaparatom EOS R3 sa složenim sensorom, predstavljenim sredinom rujna 2021. godine. Arhitektura tog senzora još nije predstavljena javnosti, no izmjereno je da se slika sa senzora može očitati u oko 5 ms kad se iščitava čitava površina senzora (5,9K), odnosno oko 10 ms s APS-C/Super 35 izrezom. [43]

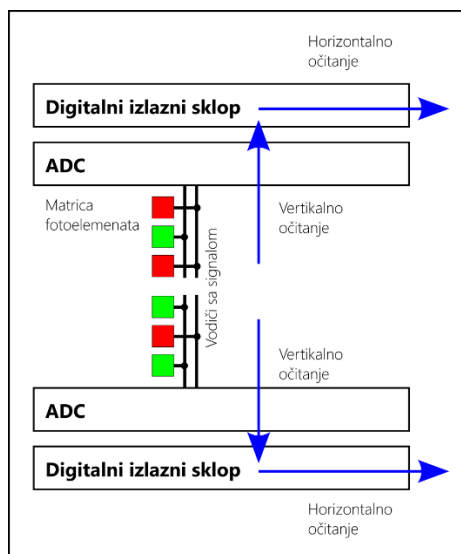
Canon za model svoje kinematografske kamere EOS C700 nudi zamjenu originalnog senzora sa sensorom s globalnim zatvaračem, pod uvjetom da se promijeni i navoj za objektiv u Arri PL (*positive lock*). Taj senzor s globalnim zatvaračem nema (*dual pixel*) autofokus, nešto je niže razlučivosti te ima za jednu F-stop jedinicu manji dinamički opseg. [44]

Osim samom tehnologijom zatvarača i senzora, posljedice rolajućeg zatvarača mogu se umanjiti povećanjem brzine zatvarača (skraćivanjem vremena ekspozicije), opreznijim i sporijim pokretima kamere, optičkom stabilizacijom objektiva, mehaničkom stabilizacijom senzora, stativima i stabilizatorima s gimbalima, odabirom drugačijeg kuta snimanja, povećanjem broja slika u sekundi. [45]

Mehanička stabilizacija, često označavana kao IBIS (In-body Image Stabilization), vrlo je korisna za anuliranje trešnje ruku zbog mogućnosti pomaka senzora po horizontalnoj i vertikalnoj osima.

Ako se efekti rolajućeg zatvarača ne mogu hardverski riješiti, mogu se umanjiti primjenom odgovarajućih vizualnih efekata u nekim programima za videomontažu ili posebnim programima za stabilizaciju, poput Turbo Video Stabilizera.

Zanimljivo je spomenuti da tvrtka Panasonic posebno usavršava iščitavanje slikovnog senzora s rolajućim zatvaračem ističući ostale prednosti takvog čipa (npr. veliko dinamičko područje) u svojim profesionalnim i televizijskim kamerama. Najbitnija tehnologija kojom se to postiže korištenje je dva paralelna lanca za iščitavanje.



Slika 4.16 – Struktura senzora Panasonicovih novih VARICAM 35 kamera s dvostruko bržim iščitavanjem (ilustracija izrađena na temelju ilustracije iz izvora literature [46])

Znači, senzor je podijeljen na gornji i donji dio, a za svaki od ta dva dijela koristi se zasebni lanac s ADC-om (za pretvorbu napona pojedinog fotoelementa u digitalnu vrijednost), čime se vrijeme iščitavanja senzora prepolovi. Da bi to bilo moguće, potrebno je i ubrzati rad tranzistora kojima se bira redak i stupac fotoelemenata. Individualni vodič za signal u takvoj konfiguraciji ujedno ima manju parazitnu kapacitivnost nego kad se koristi samo jedan lanac. [46]

4.6. Senzori veličine 2/3" za UHDTV1 kamere

Kako televizijske kamere moraju ostati na sensorima veličine 2/3" radi kompatibilnosti s postojećom televizijskom opremom te radi funkcionalnosti za prijenose uživo, bilo je potrebno nadograditi kamere s tri 2/3-inčna senzora mogućnošću snimanja UHDTV1 videa. Proizvođači su, pogotovo ispočetka, izbjegavali dizati rezoluciju senzora na UHDTV1 kako ne bi pala osjetljivost senzora pa su razvijena alternativna rješenja za dobivanje UHDTV1 slike iz HD senzora dovoljno visoke kvalitete za televizijsku primjenu.

4.6.1. RGB prizma s tri senzora s pomakom

Jedno od alternativnih rješenja je nastaviti koristiti RGB prizmu i tri senzora od 2/3 inča, razlučivosti 1920 x 1080 fotoelemenata, uz snimanje bez proreda, no uz pomak senzora. Dakle, zadržavaju se iste osnovne karakteristike senzora kao kod HD kamera (mogu se koristiti i isti senzori), no u ovom slučaju tri senzora postavljaju se s pomakom jednog u odnosu na drugi i treći te se radi konverzija u UHDTV1 (ili 4K) razlučivost. Da bi se to moglo učiniti, potrebno je posebno prilagoditi optičko filtriranje te se pomak mora odraziti na RGB RAW (4:4:4) izlaz prije nego se krene s korekcijom detalja.

Ako je navedeni proces dobro sproveden, može se očekivati rezultat sličan kameri s jednim većim 4K senzorom s Bayerovim uzorkom. Prepreku doduše mogu stvarati neki objektivni s prirubnicom (*mount*) B4 (koristi je većina objektivna za 2/3-inčne senzore), ako imaju slabe performanse modulacijske prijenosne funkcije, ako imaju problema s kromatskim aberacijama te zbog difrakcije. Također, moći će se koristiti ograničen raspon otvora blende te ekstremne žarišne duljine kod objektivna sa zumom.

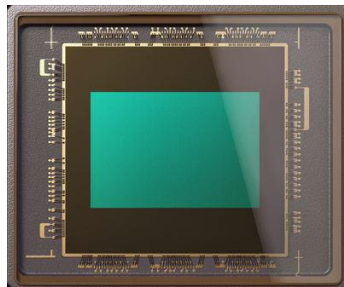
S praktične strane, takve se 4K kamere kod prijenosa uživo ne razlikuju se previše od HD kamera - način rada s njima je jednak, koriste iste objektivne s velikim opsezima zuma.

Postoji i rješenje s RGB prizmom s četiri senzora (s dva senzora za zelenu boju), s pomakom, no zbog dijeljenja svjetlosne energije na dva senzora za valne duljine zelene komponente svjetla, osjetljivost kamere pada za skoro 6 dB, a tu je i povećana složenost takvog sustava. [27]

4.6.2. Senzor većeg formata s Bayerovim filtrom iza konverzijske leće

Televizijska kamera Blackmagic Design URSA Broadcast, iako zapravo nema 2/3-inčni senzor (ima senzor 36% veće dijagonale, odnosno 65% veće površine od 2/3-inčnog senzora), iz perspektive korištenja može funkcionirati kao kamera s 2/3-inčnim senzorom s Bayerovim

filtrom. To je kamera koja dolazi s B4 prirubnicom za objektivne (opcionalno mogu se dokupiti prirubnice za druge objektivne - PL, EF i F) pa se na nju mogu staviti objektivni koji se i inače koriste u televizijskoj produkciji. Zahvaljujući konverzijskoj leći u adapteru s B4 prirubnicom pokrivat će isti kut kao i kamere s 2/3-inčnim senzorom.



Slika 4.17 - Senzor kamere Blackmagic Design URSA Broadcast [47]

URSA Broadcast ima UHD1 senzor, dimenzija 13,056 x 7,344 mm (površina je 95,88 mm²). Te brojke govore da je veličina jednog fotoelementa kod tog senzora 3,4 μm, što URSA Broadcast smješta između kamere s jednim 2/3-inčnim UHD1 senzorom (2,29 μm) i kamere s tri 2/3-inčna HD senzora (4,6 μm). [47]

4.7. 35-milimetarski senzori za UHDTV1 kamere

4.7.1. Kinematografski 35 mm senzori

Trend snimanja digitalnog videa pomoću uređaja s većim senzorima krenuo je 2008. godine, od DSLR fotoaparata Canon EOS 5D Mark II, kad je Vincent Laforet testnim primjerkom tog fotoaparata, koji se tad još nije počeo proizvoditi, snimio kratki film Reverie. [48]



Slika 4.18 - Canon EOS Mark II - Prvi 35-milimetarski full frame fotoaparatusposoban za snimanje 1080p videa [49]

Riječ je o fotoaparatu s *full frame* 35-milimetarskim senzorom s Bayerovim filtrom, te je to bio prvi *full frame* DSLR koji je mogao snimati videosadržaj rezolucije 1080p. Taj se fotoaparatus povremeno koristio i kod snimanja nezavisnih filmova i serija te na televiziji. [49]

Dvije godine kasnije, tvrtka Arri predstavila je kameru Alexa s 2,8K Super 35 mm CMOS senzorom, a godinu dana nakon toga, Canon je pokrenuo liniju digitalnih kinematografskih kamera Cinema EOS, temeljenu na tehnologiji senzora sličnoj EOS-u 5D Mark II, inicijalno sa senzorima veličine Super 35, a kasnije i *full frame*.

Glavna prednost korištenja velikih senzora naspram televizijskih sustava s tri manja senzora je estetika slike, odnosno lakša mogućnost postizanja plitke dubinske oštine, tipično viđene u filmovima.

Prije Canona EOS 5D Mark II jedini fotoaparatus s nešto većim senzorom koji su snimali HD ili kvalitetniji video su bili Nikon D90, sa senzorom veličine APS-C, koji je snimao videosadržaj rezolucije 720p, te Panasonic GH1, koji je bezzrcalni aparat senzora formata Micro Four Thirds, sposoban za snimanje 1080p videa pri 24 slike u sekundi.

Canon EOS 5D Mark II mogao se profesionalno koristiti za snimanje glazbenih spotova, reklama, događaja poput vjenčanja, a posebno je bio cijenjen kod korisnika YouTubea.

Popularnost, uz kvalitetu snimke, može zahvaliti i veličini senzora, koja u kombinaciji s objektivima velikog otvora blende omogućava vrlo plitku dubinsku oštrinu te time iznimno naglašen *bokeh* (kvalitetu zamućenosti dijelova kadra izvan fokusa), čak i više nego u tipičnim filmovima. Razlog tome je što se filmovi tradicionalno snimaju na 35-milimetarskim formatima

filmske vrpce poput Super 35 ili Akademijinih 35 mm, a oni su otprilike upola manji od *full frame* senzora.

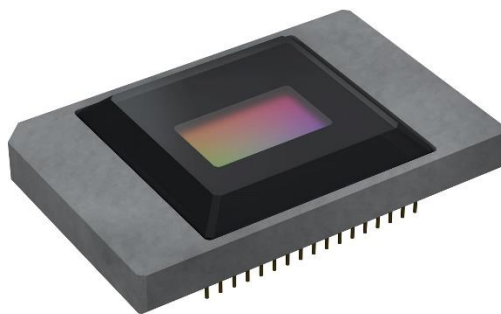
Upravo taj format proizvođači digitalnih kinematografskih kamera pokušavaju slijediti pa tipične digitalne kamere za snimanje filmova imaju senzor formata Super 35 (tipično oko 24,4 mm x 13,7 mm.) ili malo veći (30 mm x 15 mm. Ili više), ali ga reklamiraju kao Super 35. Prva takva digitalna kamera koja je stekla popularnost je Arri Alexa, sa senzorom rezolucije 2,8k, koja je korištena na brojnim projektima poput serija, filmova, glazbenih spotova, a i tvrtka Red Digital Cinema je počela proizvoditi Super 35 kamere te se ustoličila kao alternativa Arrijevim kamerama.

Kako je tehnologija napredovala, kako je na sensorima bilo moguće proizvesti sve sitnije fotoelemente dovoljno visoke efikasnosti te kako su kamere dobivale brže procesore, tako su se počele pojavljivati kamere sa sensorima s Bayerovim filtrom razlučivosti 4K, ali i mnogo više. Cinema EOS serija kamera trenutno ima kameru s 5,9K full frame senzorom (C500 Mark II), a u budućnosti stiže Cinema EOS 8K, Super 35 8K RAW kamera. Arrijeve moderne kamere Alexa LF i Mini LF imaju Super 35 senzore od 4,4K. Red nudi 8K kamere sa sensorima Monstro 8K (40,96 x 21,6 mm) i Helium 8K (Super 35), te 5K i 6K Super 35 senzore Gemini 5K i Komodo 6K. Blackmagic Design u ponudi ima profesionalne Super 35 URSA Mini Pro kamere s 4,5K i 12K sensorima, te "džepne" MFT i Super 35 kamere razlučivosti 4K do 6K. Sony ima Venice, *full frame* 6K kameru. Panasonic nudi VariCam 4K Super 35 kamere, ali i Super 35 5,7K AU-EVA1, te kameru LUMIX S1H s *full frame* 6K senzorom, a tu je i više fotoaparata s mogućnosti snimanja 4K ili 6K videa, sa sensorima veličine Micro Four Thirds i *full frame*.

5. Primjeri senzora za snimanje UHDTV1 sadržaja

5.1. Televizijski HD senzor veličine 2,3" - Grass Valley Xensium-FT

I nakon početka korištenja većih CMOS senzora u digitalnoj kinematografiji, na televiziji zadržali su se 2,3-inčni CCD senzori zbog kompatibilnosti i povoljnijih osobina za tu okolinu.



Slika 5.1 - CMOS Senzor Xensium-FT [50]

Grass Valleyev Xensium-FT prvi je 2,3-inčni CMOS senzor koji objedinjuje prednosti CMOS i CCD tehnologija, čime se započinje neminovan prelazak televizijskih kamera na CMOS tehnologiju. Xensium-FT ima rezoluciju od 1920 x 1080 fotoelemenata i daje sliku koja kvalitetom nadmašuje CCD senzore iste veličine čak i u teškim svjetlosnim situacijama, a za razliku od većine CMOS senzora, ne pati od problema rolajućeg zatvarača. Rolajući zatvarač, odnosno artefakti uzrokovani njime, prepreka su za korištenje tipičnih CMOS senzora u profesionalnoj televizijskoj produkciji. HD razlučivost znači da se u kamerama tri Xensium-FT senzora moraju pomaknuti jedan u odnosu na drugi i treći, kako bi se HD slika mogla interpolirati u UHD1 razlučivost. [39]

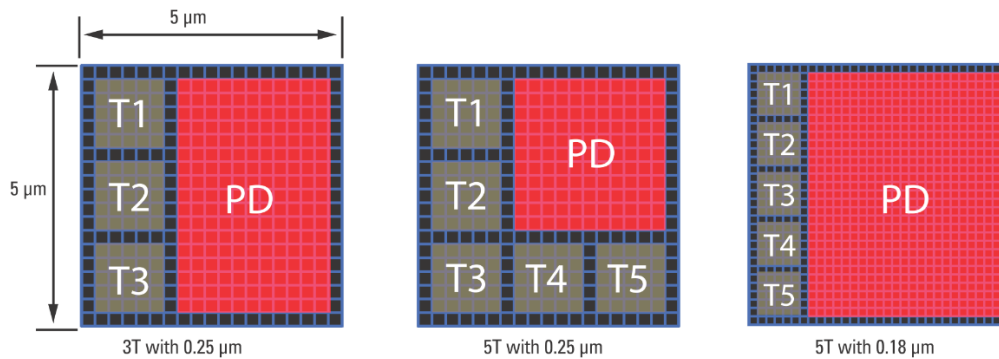
5.1.1. Tehnološka izvedba globalnog zatvarača

5.1.1.1. Tehnički preduvjeti za pet tranzistora po fotoelementu

Xensium-FT ima globalni zatvarač izveden na principu pet tranzistora po fotoelementu. Iako je takva konstrukcija poznata otprije, nije implementirana u dotadašnjim sensorima jer proizvodni proces nije bio dovoljno fin. 2/3-inčni senzor s iščitavanjem bez proreda ima veličinu fotoelemenata od 5 x 5 μm , a u trenutku razvoja prvog Xensium senzora s tri tranzistora, u fotolitografskom procesu bilo je moguće izvesti zakrivanje šablonom rezolucije do 0,25 μm . Kao

posljedica toga, tri senzora zauzimaju 44% ukupne veličine fotoelementa, a 56% površine zauzima fotodiode, odnosno faktor ispunje je 56%.

Kad bi se u istom proizvodnom procesu na fotoelementu stavilo pet tranzistora, fotodiode bi zauzimala tek oko 40% površine, što bi osjetljivost senzora smanjilo za 1/3, a to nije bilo prihvatljivo.



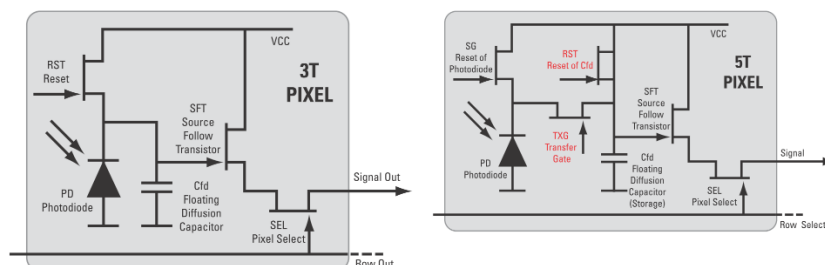
Slika 5.2 - Usporedba faktora ispunje kod prvog Xensiuma, senzora s 3 tranzistora po pikselu uz zakrivanje od 0,25 μm, simulacije faktora ispunje kad bi se u fotoelementu takvog senzora stavilo pet tranzistora, te faktora ispunje kod Xensiuma-FT koji po fotoelementu koristi 5 tranzistora, ali uz zakrivanje od 0,18 μm [38]

Zahvaljujući napretku tehnologije do pojave Xensiuma-FT, zakrivanje je postalo moguće do rezolucije od 0,18 μm, tako da su tranzistori na svakom fotoelementu Xensiuma-FT značajno manji. To je omogućilo stavljanje pet tranzistora u fotoelement, a da pritom veličina fotodiode bude slična kao u izvornom senzoru Xensium s tri tranzistora po fotoelementu.

5.1.1.2. Arhitektura fotoelementa s pet tranzistora

Kod tipičnih CMOS senzora s tri tranzistora po pikselu (3T) fotodiode pretvara upadno svjetlo, tj. fotone, u naboj, odnosno elektrone koji se smještaju u *floating diffusion* kondenzator. *Floating diffusion* znači da se kondenzator nema nužno kamo prazniti - ne može se prazniti u fotodiode, jer kroz diode elektroni ne idu u obratnom smjeru, a ne može se prazniti ni preko SFT tranzistora (Source Follow Transistor) ako mu SFT tranzistor nije omogućio prolazak elektrona. Dakle, za vrijeme trajanja ekspozicije fotodiode električnim nabojem puni kondenzator. Po završetku ekspozicije, SFT tranzistor konvertira električni naboj u napon, a tranzistor SEL otvara put iščitavanju fotoelementa, odnosno konverziji napona u digitalni izlaz. Tek nakon toga RST tranzistor će resetirati diode i kondenzator, odnosno isprazniti ih od električnog naboja, kako bi mogla započeti sljedeća ekspozicija.

Takva arhitektura nema nikakav oblik memorije, a kako svi fotoelementi moraju biti eksponirani jednako dugo i senzor se iščitava liniju po liniju, to znači da će svaka naredna linija biti eksponirana (započeti i završiti ekspoziciju) djelić vremena nakon prethodne (rolajući zatvarač - zatvarač koji ide liniju po liniju), što će rezultirati vizualnim artefaktima.



Slika 5.3 - Usporedba arhitekture fotoelemenata na CMOS senzorima s tri i pet tranzistora po pikselu [38]

Xensium-FT izvornom dizajnu fotoelemenata s tri tranzistora na Xensiumu dodaje dva tranzistora, na slici označena kao TXG (Transfer Gate - vrata za prijenos) i RST (RST iz 3T senzora na slici je preimenovan u SG i sad služi samo za resetiranje fotodiode, ne i za pražnjenje kondenzatora).

Dakle, ova 5T arhitektura tranzistorom razdvaja fotodiodu i kondenzator, čime kondenzator efektivno postaje analogna memorija u kojoj se čuva električni naboj između ekspozicija.

Kod početka ekspozicije TXG tranzistor propušta električni naboj s fotodiode u kondenzator. Kod završetka ekspozicije, TXG tranzistor prekida vezu između fotodiode i kondenzatora, a tranzistor SG može resetirati fotodiodu. Električni naboj u bilo kojem trenutku do iduće ekspozicije može se obraditi na isti način kao i kod 3T tranzistora, dakle pretvoriti u napon preko SFT tranzistora, koji će se očitati kad tranzistor SEL otvori vezu na analogno-digitalni pretvarač. U nekom trenutku nakon očitavanja kondenzator će biti ispražnjen preko tranzistora RST kako bi bio spreman za iduću ekspoziciju. Za iduću ekspoziciju potrebno je samo deaktivirati tranzistor SG kako bi se fotodioda maknula iz stanja pražnjenja i tranzistorom TXG spojiti je na kondenzator, kako bi ponovno punila kondenzator.

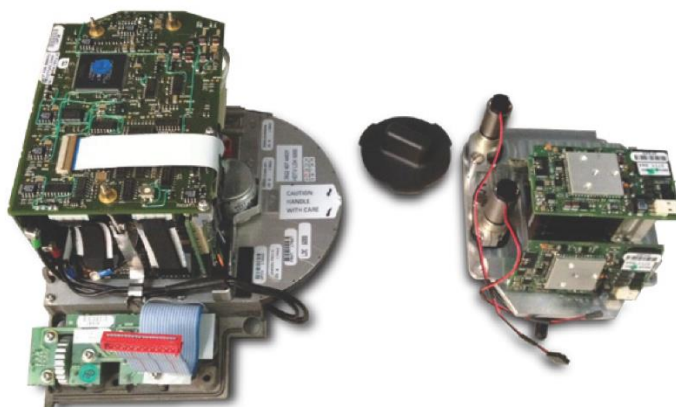
S obzirom da se pomoću dva dodatna tranzistora razdvaja period ekspozicije od perioda prijenosa (ekspozicija za sve piksele počinje i prestaje u istom trenutku), takva arhitektura omogućava globalni zatvarač, funkcionalno identičan CCD-ovima, te ne pati od problema tipičnih za rolajući zatvarač.

5.1.2. Prednosti pred postojećim 2/3-inčnim CCD-ovima

Postojeći CCD senzori, zbog načina iščitavanja slike s proredom i mogućnosti spajanja po dva fotoelementa veličine $5 \times 5 \mu\text{m}$ u jedan veličine $5 \times 10 \mu\text{m}$ općenito gledano dvostruko su osjetljiviji u iščitavanju s proredom (1080i) u odnosu na iščitavanje bez proreda (1080p). Ta pogodnost je funkcionirala kod HDTV-a jer se slika prenosila i u formatima s proredom, no ne funkcionira kod UHDTV-a jer UHDTV norme posve izbacuju sliku s proredom iz uporabe.

Čak i da nije tako, Xensium-FT, zbog povećane kvantne efikasnosti (65% u odnosu na 40% kod tipičnih CCD senzora) u 1080p za 6 dB osjetljiviji je nego tipični međulinijski IT (*interline transfer*) CCD. Konkretno, kad se osjetljivost izražava u F-brojevima, Xensium-FT ima osjetljivost F12 pri 1080i i 1080p, a tipični IT CCD-ovi imaju F11 pri 1080i te osjetno nižih F8 pri 1080p.

Xensium-FT CMOS senzor također ne pati od čestog problema CCD senzora - "razlijevanja" po vertikali kad se u kadru nalazi izrazito svijetli objekt (usmjerena svjetla, reflektirajući nakit, sunce u kadru, refleksije na vodi).



Slika 5.4 - Usporedba prednjeg dijela CCD kamere iz serije LDK 8000 i kamere iz serije LDX sa Xensium-FT senzorom [38]

Dodatna prednost je smanjena kompleksnost sustava, jer mnogo toga što je integrirano u sam čip kod CMOS senzora, kod CCD senzora to sve mora biti implementirano "izvana". Iz CMOS senzora izlaz je digitalan, dok je kod CCD-a analogni pa treba biti obrađen, pojačan i konvertiran vanjskim analogno-digitalnim pretvaračem. Kad je riječ o sustavima s prizmom i tri senzora, to znači da sva ta dodatna elektronika treba biti implementirana tri puta - po jednom za svaki senzor.

Slika 5.4 pokazuje usporedbu Grass Valleyeva CCD i CMOS sustava s tri senzora, kojom se okvirno pokušava dočarati razlika u kompleksnosti, no na temelju te slike ne može se raditi izravna usporedba između njih, jer ti sustavi nisu iste generacije - CCD sustav mnogo je starije

generacije, mnogo niže integracije i čak se vide spajanja mnogih elektroničkih komponenti i čipova zelenom žicom.

5.2. Televizijski UHD-1 senzor veličine 2,3" - Grass Valley Xenios

Iako Grass Valley u materijalima iz 2014. godine za senzor Xensium-FT navodi da bi korištenje tri 2/3-inčna 4K senzora uzrokovalo velik gubitak osjetljivosti, krajem kolovoza 2021. godine objavljen je dokument sa specifikacijama novih modela kamera LDX 100 i LDX 150 s 2/3-inčnim UHD1 senzorima, ukupnog broja fotoelemenata 24.883.200.

Kamera LDX 100 ima tri UHD1 senzora Titan, s rolajućim zatvaračem, osjetljivosti F9 pri 2000 luksa, čime se potvrđuje najava velikog gubitka osjetljivosti, a tu je i problem kojeg donosi rolajući zatvarač, a kojeg je Xensium-FT riješio arhitekturom s 5 tranzistora po fotoelementu.

Međutim, kamera LDX 150 ima tri UHD1 Xenios senzora, s globalnim zatvaračem te osjetljivosti F11 - malo niža osjetljivost nego kod senzora Xensium-FT, koji je osjetljivosti F12, no ostaje globalni zatvarač i senzori imaju nativnu UHD1 razlučivost. Obje kamere u UHD1 razlučivosti mogu snimati do 50, odnosno 59,94 slika u sekundi, a podržavaju i HDR. [28]

5.3. Kinematografski 35-milimetarski 4K senzori

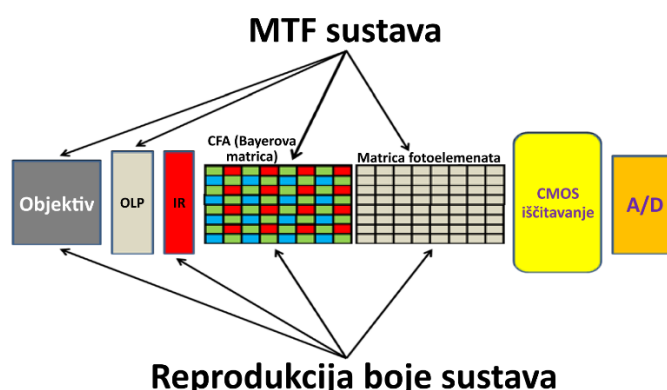
5.3.1. Super 35 senzor u Canonu EOS C300, C100 i C500

Canon je svoju liniju Cinema EOS kamera započeo s tri kamere - kronološkim redoslijedom to su C300, C100 i C500. Sve tri kamere dijele isti 4K senzor veličine Super 35, iako ni jedan od tih kamera ne može snimati u 4K, no C500 daje 4K izlaz preko 3G-SDI sučelja kako bi se 4K/UHD RAW izlaz mogao snimiti vanjskim snimačem. Cilj razvoja tog senzora bio je približiti se filmskim karakteristikama 35-milimetarske vrpce za snimanje filmova. [51]

Fizičke karakteristike		
Aktivna površina senzora		24,6 x 13,8 mm
Ukupan broj fotoelemenata		4206 x 2340
Broj fotoelemenata za aktivnu sliku	4K	4096 x 2160
	UHD	3840 x 2160
Matrica za filtriranje boje (s mikrolećama)		RGB Bayer
Veličina fotoelementa (µm)		6,4 x 6,4 µm
Razmak između fotoelemenata		6,4 µm
Napajanje		3,3 V / 1,8 V
Potrošnja energije		950 mW

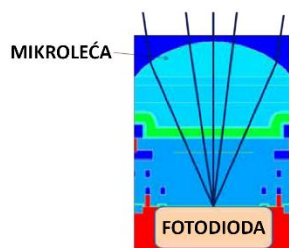
Tablica 5.1 - Fizičke karakteristike Canonova Super 35 senzora u C300, C100 i C500 [51]

Pod Super 35 veličinom senzora Canon tu smatra veličinu slike (fotograma) na 35-milimetarskoj filmskoj vrpci kad se prostire kroz tri perforacije, pa tako je taj senzor dimenzija 24,6 x 13,8. To ga čini malo širim i malo nižim od APS-C senzora. Senzor je razlučivosti 4206 x 2340 fotoelemenata, no prilikom snimanja koristi se nešto manji broj fotoelemenata - broj koji odgovara odabranoj izlaznoj razlučivosti (DCI 4K ili UHD-1).



Slika 5.5 - Osnovni elementi sustava vezani uz očitavanje sa senzora te vanjski optički elementi koji prethode senzoru u Canon EOS C300 i njihov utjecaj na kvalitetu slike [51]

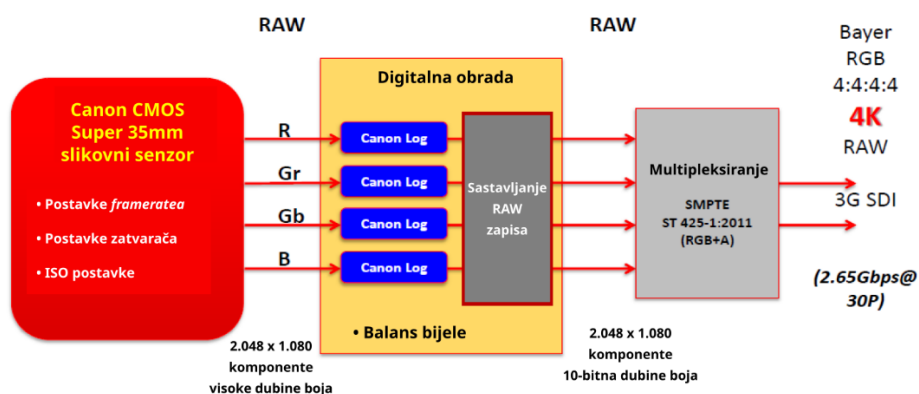
Iz slike (Slika 5.5) vidi se putanja svjetlosti do senzora - preko objektivu s lećama, optičkog niskopropusnog filtra (*optical low-pass filter*, OLP), čija je zadaća blago zamutiti sliku kako ne bi dolazilo do *moire* efekta, filtra za blokiranje infracrvenog dijela spektra (IR), Bayerove matrice za filtriranje boje (CFA) te matrice samih fotoelemenata. Na modulacijsku prijenosnu funkciju u Canonovom EOS-u C300 utječu objektiv, OLP, CFA te matrica fotoelemenata. Na reprodukciju boje ne utječe OLP filter, ali utječe filter za blokiranje IR spektra.



Slika 5.6 - Presjek fotoelementa na senzoru kamera EOS C100, C300 i C500 [51]

Kako bi se smanjila potrošnja senzora, radi nižeg zagrijavanja i mogućnosti ugradnje u manje tijelo kamere, napajanje senzoru daje napon od 3,3 V.

Fotoelementi na ovom senzoru veličine su $6,4 \times 6,4 \mu\text{m}$. Da bi se postigao velik dinamički opseg, razvijena je nova arhitektura fotoelementa, s fotodiodom povećanog kapaciteta te bržim prijenosom naboja i pretvorbom u napon. Povećanje brzine bilo je potrebno i kako bi kamere bile sposobne snimati pri 60 FPS.



Slika 5.7 - Pojednostavljeni prikaz prijenosa signala sa senzora u procesor slike te dalje u pakiranje s audiom, metapodacima i organizacijskim datotekama [51]

Umjesto jednog signala kojim bi se prenosile RGB komponente slike, što je tipičan slučaj kod CMOS senzora s Bayerovom matricom, Canonov senzor preko četiri signala paralelno prenosi sve četiri komponente dobivene preko CFA matrice, nakon čega se one individualno obrađuju (Slika 5.7). Dakako, s obzirom da se radi o Bayerovoj matrici, svaka od komponenti koja se šalje zapravo je razlučivosti 2048×1080 piksela.

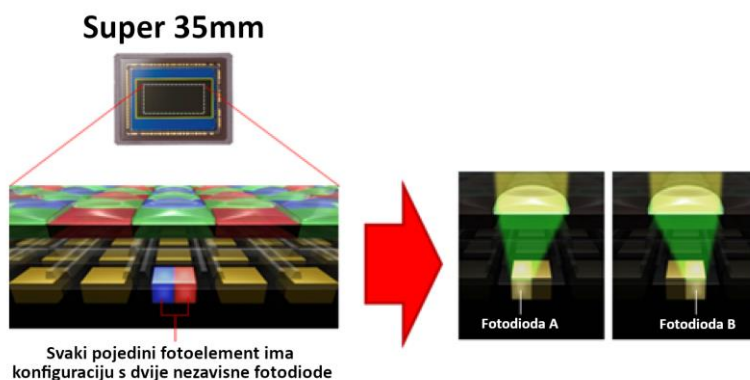
Prilikom slanja audiovideo sadržaja preko SDI sučelja, što uključuje RAW 4K/UHD video, C500 ne šalje tri komponente (RGB), nego multipleksirane sve četiri komponente slike (R-Gr-Gb-B). Dakle, očitavanja s dva fotoelementa za zelenu boju i u zadnjem koraku šalju se individualno.

5.3.2. Super 35 senzor u Canonu EOS C300 Mark II

Nasljednik EOS-a C300 je C300 Mark II, koji se na tržištu pojavio u rujnu 2015. godine, skoro četiri godine nakon modela C300. Za razliku od prethodnika, C300 Mark II može interno (na memorijsku karticu) snimati 4K video.

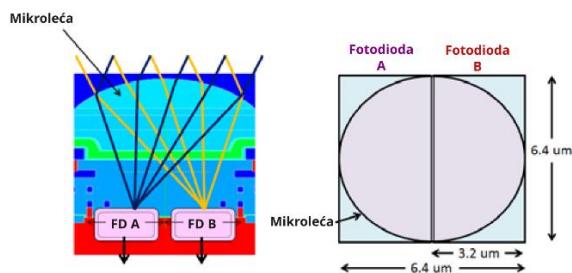
5.3.2.1. Dual pixel CMOS slikovni senzor

Senzor je nov, sa značajnim unapređenjima u odnosu na senzor u starijoj kameri. Također je veličine Super 35 te daje četiri paralelna signala za individualne komponente (R-Gr-Gb-B). [52] Dinamički opseg s 12 kod prethodnog modela, povećan je na 15 f-stop jedinica kod senzora u C300 Mark II. [53]



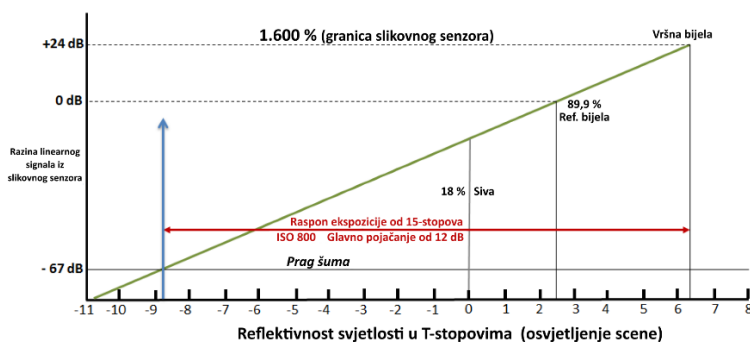
Slika 5.8 - Ilustracija dual pixel CMOS senzora s dvije fotodiode po fotoelementu [52]

Najbitnije tehnološko unapređenje, koje je jednim dijelom zaslužno i za povećanje dinamičkog opsega, korištenje je dvije nezavisne fotodiode po fotoelementu. Mikroleće su ujedno prilagođene tako da se optimizira usmjeravanje upadne svjetlosti na obje fotodiode (Slika 5.8). Radi pojednostavljenja, taj se tip senzora naziva Dual Pixel CMOS slikovni senzor.



Slika 5.9 - Struktura fotoelementa s dvije fotodiode [52]

Zbog toga što su te dvije fotodiode manjih dimenzija nego bi bila jedna veća fotodiode, učinkovitiji je prijenos naboja pa se nakupljeni naboj sa svake diode može brže isprazniti prilikom resetiranja senzora. Naboji s obje fotodiode prilikom očitavanja spajaju se u jedan. Fotodiode su ujedno izrađene od materijala N-tipa veće gustoće što podiže granicu zasićenja elektronima. Sve to skupa rezultira povećanjem dinamičkog opsega svakog pojedinog fotoelementa. [52]



Slika 5.10 - Iskoristivi dio linearnog analognog signala iz senzora [52]

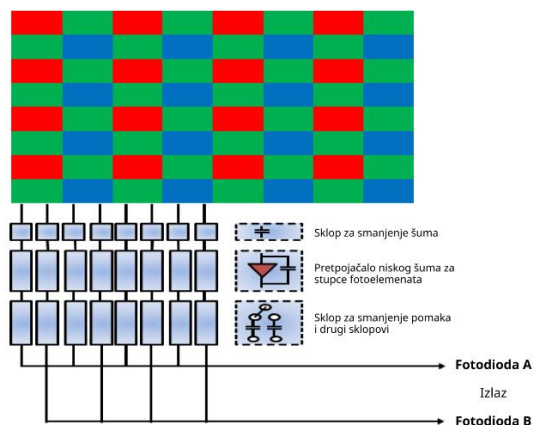
Dinamički opseg senzora ilustriran je grafom (Slika 5.10), iz kojeg se vidi da pri ISO 800, uz pojačanje signala od 12 dB, izlazni signal iz senzora obuhvaća razine osvjetljenja scene od malo iznad -9 do malo iznad 6 T-stop jedinica, što iznosi marginalno preko 15 T-stop jedinica.

Ovdje su kao relativni otvor zaslona objektivna odabrane T-stop jedinice, kao ekvivalent za vrijednost rasvjete na sceni. To je zato što će dva objektivna iste vrijednosti T-stop jedinice dati jednaki svjetlosni tok u lumenima na slikovni senzor, što nije slučaj s F-stop jedinicama. Naime, kod F-stop jedinica u obzir se uzima otvor blende, ali ne i ukupna prozirnost (propusnost) leća određenog objektivna. T-stop inače je ekvivalentan $F\text{-stop} / \sqrt{\text{prozirnost}}$, odnosno T-stop dobije se tako da se F-stop podijeli s korijenom ukupne prozirnosti leća objektivna. [54] Prozirnost je u praksi uvijek manja od 1, odnosno manja od 100%, jer leće nisu savršene, a shodno tome T-stop je u praksi uvijek veći od F-stop.

Razina osvjetljenja od 0 T-stop jedinica odabrana je za 18% sivu (srednje siva, eng. *mid grey*). 18% sive nalazi se na polovici raspona između 90% difuzno reflektirane svjetlosti sa scene i 3,6% reflektirane difuzne svjetlosti u zonalnom sistemu (to odgovara najtamnijoj crnoj u sceni). U T-stop jedinicama, 18% siva nalazi se za 2 i 1/3 jedinice ispod 90% difuzno reflektirane svjetlosti i za 2 i 1/3 jedinice iznad 3,6% reflektirane difuzne svjetlosti. [55]

Niže razine osvjetljenja scene rezultiraju šumom (nema korisnih informacija). Referentna bijela rezultira analognim signalom od 0 dB, a vršna bijela +24 dB. S grafa se vidi dinamički opseg senzora od 91 dB što iznosi 15,1 F-stop jedinica.

Senzor u kameri EOS C300 ima za 1 T-stop jedinicu manji raspon u svjetlijem području te 2 T-stop jedinice manji raspon u tamnijem području nego senzor u C300 Mark II, što znači da senzor u C300 Mark II sačuva više detalja u najsvjetlijim tonovima te da registrira tamnije tonove, "vidi" u još mračniju, slabije osvijetljenu scenu.



Slika 5.11 - Prikaz dvojnog izlaza iz dioda u fotoelementima i obrade signala [52]

Kako se svakoj fotodiodi unutar mjesta može pristupiti individualno, obrada izlaza zasebno se vrši za svaku fotodiodu (Slika 5.11), što uključuje sklop za smanjivanje šuma, pretpojačalo niske razine šuma za stupac, sklop za anuliranje pomaka i eventualno drugi sklopovi.

5.3.2.2. Dual pixel CMOS Auto Focus System

Fotoelementi s dvije fotodiode omogućili su i implementaciju faznog autofokusa, nazvanog Dual Pixel CMOS Auto Focus System. To znači da svaki fotoelement (unutar određenog dijela senzora - obično se za autofokus koristi 80% širine i visine senzora) sudjeluje u faznom automatskom fokusiranju.

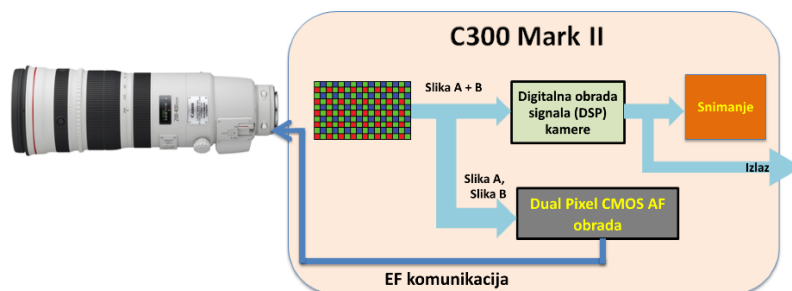
To je jedinstveno rješenje na tržištu. Drugi proizvođači koriste kontrastni autofokus ili na senzor stavljaju određeni broj fotoelemenata specijaliziranih samo za fazni autofokus. Česta su hibridna rješenja, koja kombiniraju fazni autofokus temeljen na specijaliziranim fotoelementima te kontrastni autofokus.

Kod kontrastnog automatskog fokusa fokusiranje se obavlja softverski, analizom slike, a glavni problem takvog načina fokusiranja je što inicijalno nije moguće znati u kojem smjeru točka fokusa mora ići (bliže ili dalje od senzora) te što kamera ne može zaustaviti leće za fokusiranje točno u trenutku kad se ostvari idealni fokus. Često se događa da točka za fokusiranje ode preko točke najoštrijeg fokusa pa se mora vraćati, odnosno ići bliže-dalje, dok se ne ostvari najveća oštrina željenog dijela kadra.

Problem kod specijaliziranih fotoelemenata za fazni autofokus raštrkanih po senzoru je što će kvaliteta fokusiranja ovisiti i o pokrivenosti senzora takvim fotoelementima (broj i raspored

elemenata), pa je uz fazni autofokus nerijetko potrebno koristiti i kontrastni autofokus. Ujedno, takvi fotoelementi obično koriste samo za fokusiranje pa je sadržaj slike na tom mjestu potrebno rekonstruirati (interpolirati) na temelju susjednih piksela.

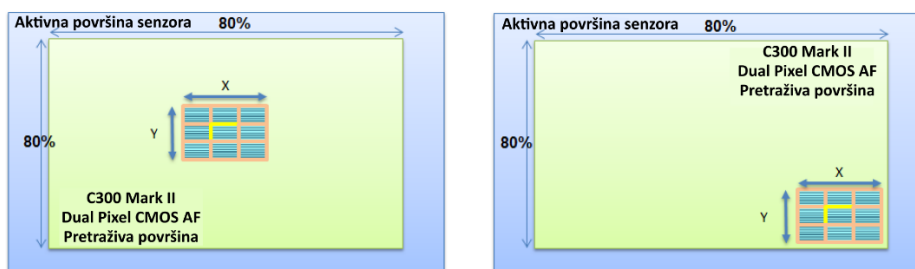
Kod Canonovog *dual pixel* autofokusa nije potrebna rekonstrukcija jer se svaki fotoelement, nakon fokusiranja, iskoristi za sastavljanje slike, a s obzirom da svaki element (unutar aktivnog područja) sudjeluje u automatskom fokusiranju, nije potrebno koristiti i kontrastni autofokus. [56]



Slika 5.12 - Prikaz odvojene obrade podataka sa sve od fotodioda [52]

Na slici (Slika 5.12) prikazano je što se radi s podacima sa svake od fotodioda. Podaci sa senzora idu u Canonov procesor Digic V5, unutar kojeg se podaci sa svake fotodiode zasebno koriste za obradu u sklopu sustava za automatski fokus, a za sustav za obradu RGB videa (DSP, *digital signal processing*) koriste se sumirani podaci obje fotodiode.

Za automatsko fokusiranje ne koriste se podaci sa svih fotodioda senzora, nego samo podaci s fotodioda koje se nalaze u fotoelementima unutar mreže trenutno odabrane za automatsko fokusiranje. Kod prve implementacije *dual pixel* autofokusa, kod kamere C100 Mark II, mreža je bila samo na sredini senzora, dakle *dual pixel* autofokus radio je samo kad korisnik kamere objekt koji je trebao biti o fokusu stavio u središte kadra.



Slika 5.13 - Mogućnost pomicanja područja senzora koje će se koristiti za automatsko fokusiranje kod kamere C300 Mark II [52]

Kod C300 Mark II koristi se veća mreža, koja se ujedno *joystickom* na kameri može pomicati unutar kadra, kroz 80% širine i visine senzora, kako bi se u fokusu mogli držati objekti koji nisu u samom središtu kadra.



Slika 5.14- Mreža za uzorkovanje za sustav za autofokus kod kamere C300 Mark II [52]

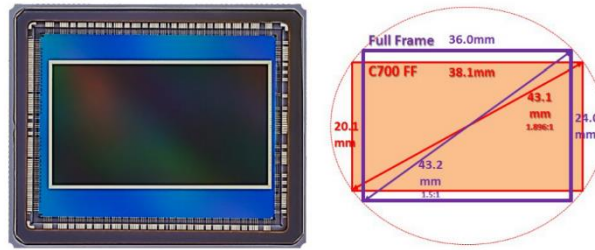
Dio mreže na slici (Slika 5.14) označen crvenim okvirom funkcionalno odgovara cijeloj mreži kod kamere C100 Mark II, dakle C300 Mark II ima 3 x 3 matricu podmreža, što je jedan od faktora za postizanje boljih performansi sustava za autofokus kod C300 Mark II (bolje performanse pri slabom osvjetljenju, poboljšana preciznost sustava pri višim ISO vrijednostima, bolji algoritmi i brža obrada).

Svaka podmreža ima veći broj linija (na slici označeno s Y) nego mreža kod C100 Mark II, a svaka od linija dobivena je obradom više linija fotoelemenata.

Iz mreže sustav za autofokus primi podatke nad kojima je potrebna sofisticirana obrada. Nad slikama dobivenim iz individualnih fotodioda (iz jedne fotodiode fotoelemenata stvori se jedna slika, iz druge druga) vrše se razne korekcije i prilagodbe i usporedbom te dvije slike određuje se razlika u fazi. Na temelju te razlike u fazi korigira se točka fokusa.

5.3.3. Full frame 5,9K senzor iz kamera EOS C500 Mark II i EOS C700 FF

Sljedeća stepenica u liniji senzora za Canonove kinematografske kamere je *full frame* 5,9K senzor. Kamera C500 Mark II visoku razlučivost tog senzora iskorištava za dobivanje kvalitetnije 4K slike te za 5-osnu elektroničku stabilizaciju, a implementirana je i elektronička korekcija difrakcije. [8]



Slika 5.15 - Senzor u kameri Canon EOS C500 Mark II [8]

Dok tipični *full frame* senzori imaju aktivnu površinu 36 x 24 mm, uz omjer stranica 3:2 (1,5:1), senzor u C500 Mark II ima senzor omjera stranica 17:9 (1,896:1). Zadržana je visina o 24 milimetra, no senzor je širi od tipičnih *full frame* senzora - 38,1 mm (Slika 5.15). Razlog tome je da se u potpunosti iskoristi krug koji projiciraju *full frame* objektivni na senzor, bez obzira je li izlazni video razlučivosti i omjera stranica Ultra HD ili DCI 4K.

Senzor ima ukupno 6062 x 3432 fotoelementa, od kojih se aktivno koristi 5952 x 3140 fotoelemenata. Iz razlučivosti i dimenzija aktivnog dijela senzora može se izračunati veličina fotoelementa - 6,4 x 6,4 μm , dakle ista veličina kao i kod prije opisanih Canonovih kinematografskih Super 35 senzora.

U postavkama kamere C500 Mark II može se odabrati način iščitavanja senzora:

1. *Full frame* 5,9K videoomjera stranica 17:7,
2. 4K (DCI ili UHD) - smanjeno (*downsampled*) s izvornih 5,9K,
3. 2K (DCI ili HD) - smanjeno (*downsampled*) s izvornih 5,9K,
4. Anamorfna (horizontalno stisnuta) slika - uključujući 2x i 1,3x.

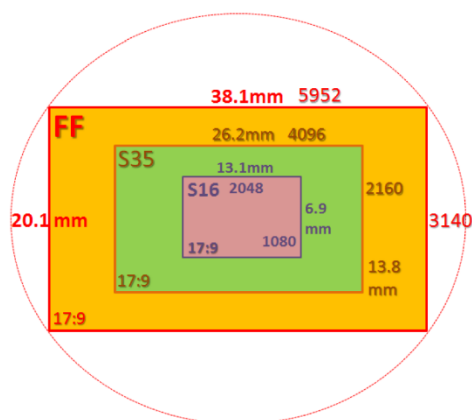
5.3.3.1. Formati slike i objektivni

Zahvaljujući veličini senzora i razlučivosti, EOS C500 Mark II može se upariti s nizom kinematografskih objektivni, što uključuje 35-milimetarske *full frame* objektivni, Super 35 objektivni i Super 16 objektivni. Na kameru se mogu staviti čak i zum objektivni za televizijske kamere sa senzorima veličine 2/3" uz korištenje Canonova optičkog adaptera za prilagodbu prirubnice B4 na PL ili EF prirubnicu.



Slika 5.16 - EOS C500 Mark II može se koristiti s kinematografskim i televizijskim objektivima [8]

Slika 5.16 prikazuje podržane formate objektivima, odnosno koliki dio senzora pokrivaju. Najmanji dio površine senzora pokrivaju Super 16 objektivima i B4 objektivima za senzore od 2/3 inča. Ovisno o korištenom objektivu, u postavkama kamere može se odabrati odgovarajući izrez.

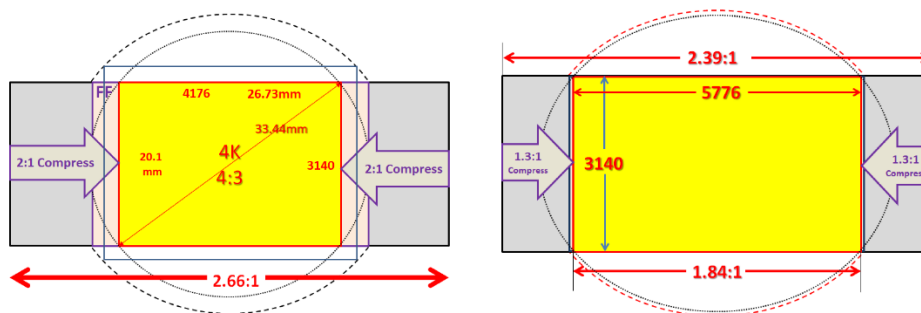


Slika 5.17 - Formati slike koje podržava C500 Mark II, ovisno o korištenom objektivu [8]

Širina i visina izreza, te razlučivost u 4K i 2K DCI formatima naznačeni su na slici (Slika 5.17), iz koje je vidljivo da kamera s ovim senzorom ima nativnu 4K razlučivost kad se koristi sa Super 35 objektivima.

5.3.3.2. Anamorfno snimanje

C500 Mark II podržava dvije vrste anamorfni objektivima - one koji projekciju slike na senzor horizontalno stisnu dvostruko (2x) i one koji stisnu 1,3x.



Slika 5.18 - Izrez senzora kod korištenja anamorfnih objektivna za 2x (lijevo) i 1,3x (desno) horizontalnu kompresiju ("stiskanje" slika po horizontali) [8]

Na slici (Slika 5.18) sivi pravokutnik označava kadar koji se snima, a žuti horizontalno stisnutu projekciju kadra na aktivnu površinu senzora.

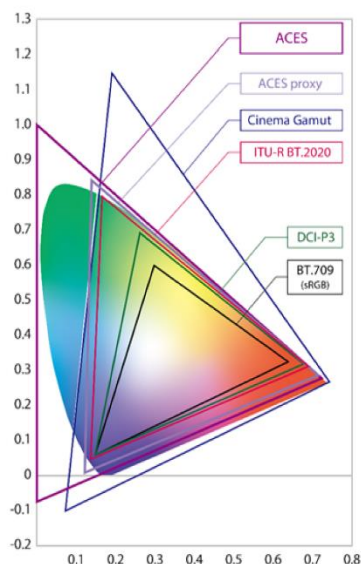
Kod korištenja 2x anamorfnog objektivna, slika omjera stranica 2,66:1 projicirat će se na 4:3 izrez aktivne površine senzora. 2,66:1 malo je šire od češće korištenog CinemaScope omjera 2,39:1, no upravo ta dodatna širina omogućava više fleksibilnosti tijekom postprodukcije.

Kod korištenja 1,3x anamorfnog objektivna, za snimanje slike omjera stranica 2,39:1, iskoristit će se gotovo čitava aktivna površina senzora. *Full frame* senzor je idealan za to, jer nudi nešto veću visinu slike od Super 35 mm filma kad se koriste četiri perforacije (20,1 mm naspram 18,67 mm).

5.3.3.3. Velik dinamički opseg i širok gamut boja

Za velik dinamički opseg, kod EOS-a C500 Mark II na raspolaganju su dvije OETF optičko-električne prijenosne funkcije - Canon Log2, s 15, te Canon Log3, s 14 F-stop jedinica dinamičkog opsega. Kod snimanja videa, kamera nudi još i dva standardizirana HDR sustava - HLG i PQ, koji su sukladni HDR preporukama ITU-R BT.2408 i BT.2390. Te opcije mogu se odabrati u izborniku kamere kad se snima u XF-AVC formatu.

Među normiranim gamutima boje C500 Mark II podržava su i BT.709, DCI-P3 i Wide Color Gamut (WCG) BT.2020. Podržan je i Canonov vlastiti Cinema Gamut, namijenjen snimanju filmova.



Slika 5.19 - Usporedba Canonovog Cinema Gamuta s ostalim popularnim normama [8]

Kad kamera snima u RAW formatu, koristi se vlastiti Color Gamut i OEFT prijenosna funkcija za kodiranje s maksimalnim zadržavanjem informacija, bez obzira na odabrani ISO. Prilikom obrade RAW snimki, podaci se mogu konvertirati u neku od OETF krivulja poput Canon Log2, Canon Log3 ili ITU-R BT.709) te se može primijeniti željeni gamut (BT.2020, Canon Cinema Gamut, DCI P3, BT.709). [8]

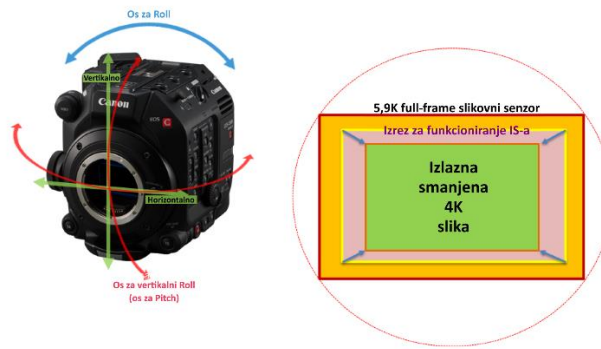
5.3.3.4. Elektronička stabilizacija slike

EOS C500 Mark II prva je kamera u liniji Cinema EOS kamera s elektroničkom stabilizacijom slike (Electronic Image Stabilization, EIS). Ona se može vršiti u pet osi:

1. Horizontalni pomak (lijevo-desno) - *shift left-right*,
2. Vertikalni pomak (gore-dolje) - *shift up-down*,
3. Okretanje naprijed-natrag (rotiranje oko horizontalne osi) - *pitch*,
4. Okretanje lijevo-desno (rotiranje oko vertikalne osi) - *yaw*,
5. Bočno okretanje - *roll*.

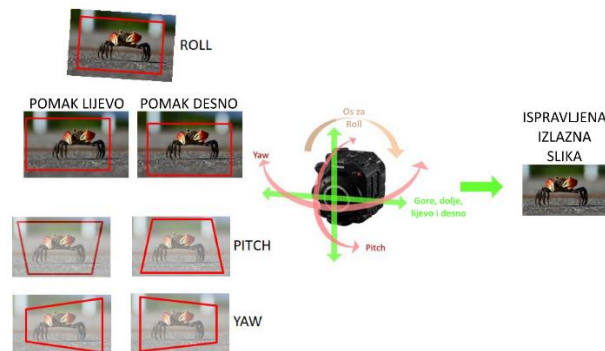
Korekcija se vrši po tih pet osi kad se s kamerom koristi objektiv koji nema optičku stabilizaciju, odnosno po tri osi (horizontalno i vertikalno pomicanje te bočno okretanje) ako objektiv vrši stabilizaciju horizontalnog i vertikalnog okretanja.

Elektronička stabilizacija ne funkcionira kad se video snima u RAW formatu, nego samo kad se snima u XF-AVC formatu, dakle razlučivost snimljenog videa tada je 4K ili niža.



Slika 5.20 - Osi pomicanja i okretanja koje EIS može kompenzirati, uz prikaz izreza senzora koji se koristi za elektroničku stabilizaciju [8]

Kad je EIS uključen, više se ne koristi cijela površina senzora za dobivanje slike, nego tek jedan dio, jedan izrez, na slici (Slika 5.20) označen žutim okvirom. To je zato da se taj izrez može "pomicati" unutar aktivne površine senzora u smjeru suprotnom vanjskim vibracijama. Kad se koristi *full frame* objektiv, izrez je i dalje veći od 4K razlučivosti što bi, zahvaljujući *oversamplingu*, trebalo osigurati visoku kvalitetu 4K videa i uz elektroničku stabilizaciju. Kad se koristi Super 35 objektiv, onda će neminovno doći do niže oštine slike 4K videa, jer tada nema *oversamplinga*.



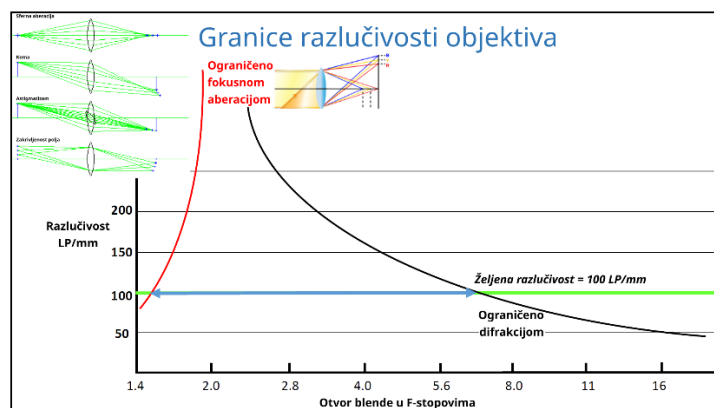
Slika 5.21 - Primjeri poremećaja u svakoj od pet osi koje EIS pokušava ispraviti [8]

Za registriranje pokreta, kamera ima ugrađen žiroskopski senzor koji procesoru Digic DV7 šalje podatke o rotiranjima kamere u tri osi, a EIS se oslanja i na vektore pokreta u slici.

Procesor visokom brzinom obavlja izračune za pomicanje izreza unutar aktivnog dijela senzora. Korekcija okretanja naprijed-natrag i lijevo-desno može uzrokovati gubitak oštine i utjecati na perspektivu u slici.

5.3.3.5. Sustav za korekciju difrakcije

Dva su optička ograničenja koja utječu na oštrinu slike. Prvo ograničenje je valna priroda svjetlosti, odnosno pojava difrakcije, koja pritvaranjem relativnog otvora blende točku u slici (kao najmanji detalj slike) pretvara u krug zamućenosti (*circle of confusion*), a drugo je izobličenje leće zvano lateralna kromatska aberacija koja nastupa pri najvećim relativnim otvorima zaslona objektiv. [57]



Slika 5.22 - Prikaz optimalnog raspona otvora blende pri kojem se zadržava razlučivost od barem 100 LP/mm, a da tu razlučivost ne ograničavaju krug zamućenosti (crvena krivulja) i difrakcija (crna krivulja) [57]

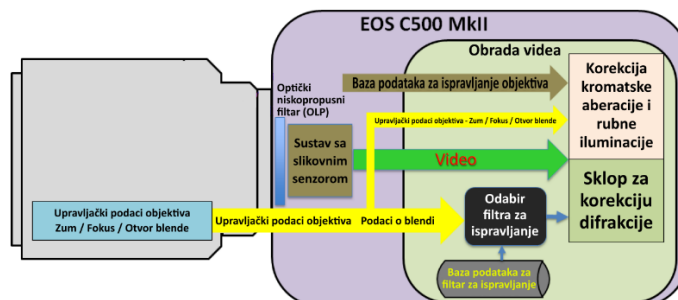
Sustav za korekciju difrakcije u procesoru kamere C500 Mark II u stvarnom vremenu za 4K/UHD/2K/HD video (ne i RAW video) vrši kompenzaciju difrakcije i optičkog predfiltriranja. To radi na temelju baze podataka unutar samog procesora, za konkretne objektiv i otvore blende kod tih objektiv.



Slika 5.23 - Proces za izradu baze podataka za korekciju difrakcije [8]

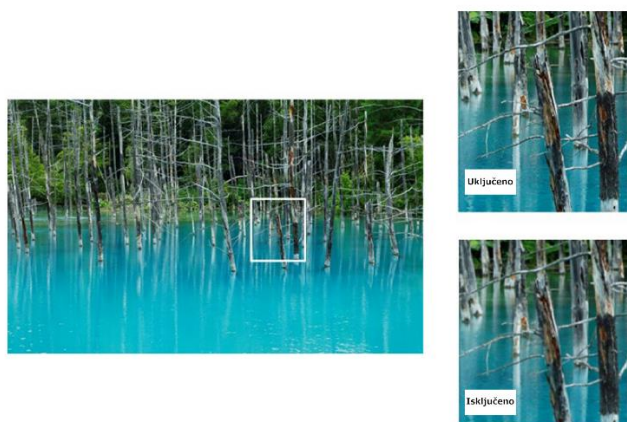
Ta baza podataka izrađena je na temelju procjene degradacije tekstura u slici kad svjetlost prvo prolazi kroz otvor blende objektiv, a zatim i kroz OLPF (Optical Low Pass Filter). Za to je bilo potrebno detaljno analizirati što se događa sa zrakama svjetla kad prolaze kroz objektiv i OLPF pri različitim otvorima blende (od maksimalno otvorene do maksimalno pritvorene), odnosno odrediti matematički model "razmazivanja" točaka svjetlosti (*point spread function*, PSF). Ta "razmazivanja" se tada pretvore u optičke prijenosne funkcije (*optical transfer function*, OTF). Potom se stvore inverzne funkcije koje, kad ih sklop za korekciju difrakcije primijeni,

sliku vraćaju u stanje slično kad se snima s posve otvorenom blendom (kad objektiv teoretski ima najviši MTF).



Slika 5.24 - Prikaz komunikacije između objektiva i videoprocatora u C500 Mark II za odabir odgovarajućeg filtra za korekciju difrakcije te drugih optičkih problema [8]

Za korekciju difrakcije tijekom snimanja kameri treba biti poznat samo otvor blende, no u bazi podataka objektiva spremljeni su i podaci potrebni za korekciju lateralnih kromatskih aberacija i rubnog osvjetljenja. Za njihovu korekciju procesor mora imati podatke o trenutnom zumu, fokusu i otvoru blende, dakle ta korekcija je dinamična i usklađena s operativnim postavkama objektiva.



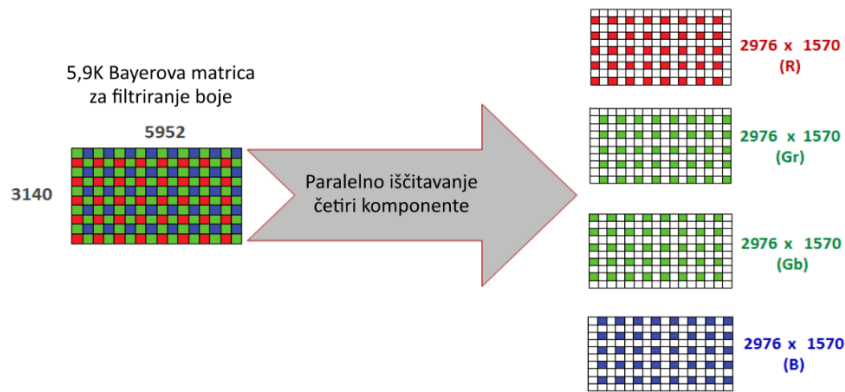
Slika 5.25 - Primjer korekcije difrakcije [8]

Na slici (Slika 5.25) vidi se povećanje oštrote kad se vrši korekcija difrakcije. To nije tradicionalno izoštravanje slike, nego je to korekcija koja počiva na zabilježenoj predvidljivosti, vraćaju se fine teksturalne informacije koje se inače izgube uslijed difrakcije i OLPF-a

5.3.3.6. Obrada izlaza iz senzora prilikom snimanja na samoj kameri

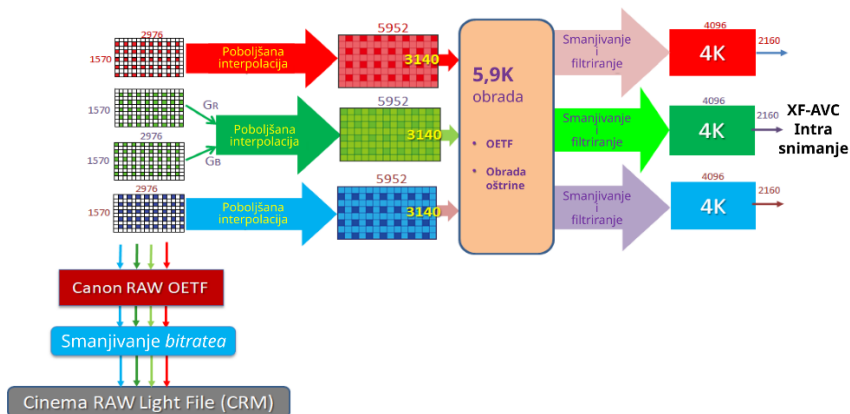
EOS C500 Mark II na memorijske kartice može snimati video u RAW formatu (Cinema RAW Light File) u izvornoj razlučivosti od 5,9K, te u nižim razlučivostima 4K i 2K uz središnji izrez slike (kadra).

Kamera može snimati i 4K DCI/UHD i 2K DCI/HD video korištenjem XF-AVC Intra kodeka, uz mogućnost snimanja cijelog kadra zahvaljujući algoritmu "Over Sampling 5.9K Processing". Dakle, cilj je dobiti kvalitetniji 4K/UHD (ili 2K/HD) video korištenjem pune razlučivosti senzora od 5,9K.



Slika 5.26 - Iz senzora u C500 Mark II paralelno idu četiri digitalna signala [8]

Kao i kod prethodno opisanih Super 35 senzora, ovaj *full frame* senzor daje četiri paralelna digitalna signala (Slika 5.26), samo što je sad tu razlika u razlučivosti. Iz Bayerove matrice od 5952 x 3140 fotoelemenata dobiju se četiri matrice razlučivosti 2976 x 1570 potpiksela - matrica s crvenim potpiksela (R), dvije matrice za zelenim potpiksela (Gr, Gb) te matrica s plavim potpiksela (B).



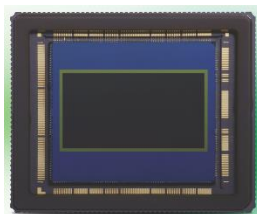
Slika 5.27 - Dva moguća pravca iz četiri matrice - RAW ili XF-AVC [8]

Ako se snima u RAW formatu, kamera na matrice primijeni RAW OETF, naprednim procesom smanji se *bitrate* i sve četiri komponente (R-Gr-Gb-B) spremaju se u CRM format datoteke.

Kod snimanja 4K videa XF-AVC kodekom, situacija je mnogo složenija. Prvo se dvije zelene matrice spajaju u jednu zelenu, tako da se dalje radi s tri matrice - RGB. Potom se sve tri matrice poboljšanim algoritmima interpoliraju na punu razlučivost senzora (5952 x 3140). Obrada slike vrši se pri razlučivosti od 5,9K, a to uključuje i OETF i prilagodbu oštine. Zatim se, uz filtriranje, razlučivost svake od komponenti smanji na 4K (*downsampling*) pa one dalje ide konverzija iz RGB u YCbCr i kodiranje XF-AVC Intra kodekom.

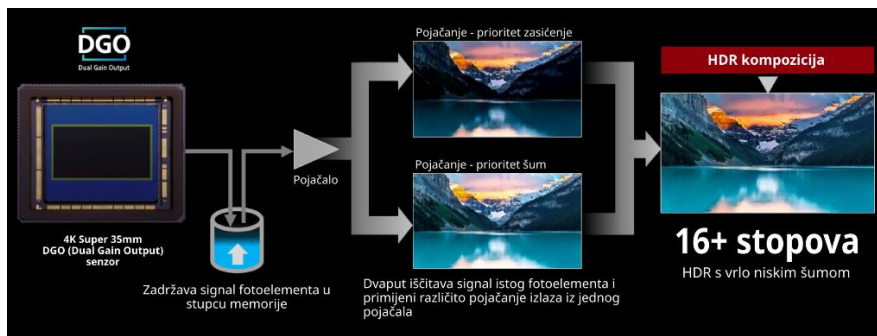
5.3.4. Dual Gain Output (DGO) 4K Super 35mm CMOS slikovni senzor

Jedan od najnovijih Canonovih kinematografskih 4K Super 35 senzora ugrađuje se u digitalne kinematografske kamere EOS C300 Mark III i EOS C70. Kao i drugi senzori iz Cinema EOS serije kamera, i ovaj ima dvije fotodiode po fotoelementu radi omogućavanja *dual-pixel* autofokusa, no korištenje dvije fotodiode po fotoelementu doprinosi i većem dinamičkom opsegu, jer se električni naboj, uslijed kraće udaljenosti, može brže konvertirati u napon. [58]



Slika 5.28 - Super 35 mm CMOS senzor s Dual Gain Output funkcionalnosti, koji se nalazi u Canonovim kamerama EOS C300 Mark III i EOS C70 [58]

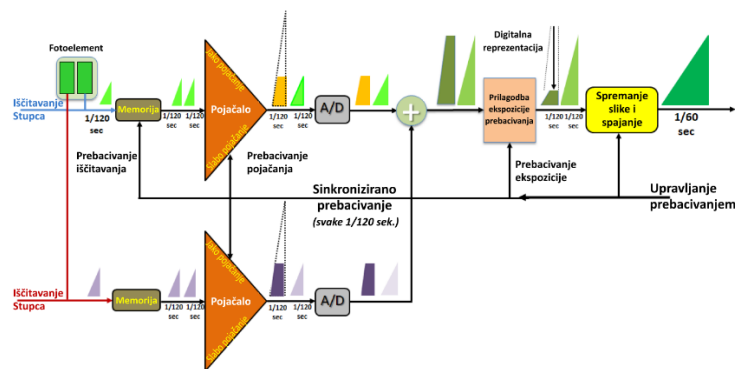
Radi dodatnog proširenja dinamičkog opsega, Canon je u taj senzor implementirao tehnologiju Dual Gain Output (DGO). Kod DGO-a različito se pojačavaju i obrađuju signali za isti fotoelement, koji se potom kombiniraju u jedan signal većeg dinamičkog opsega (HDR), preko 16 koraka ekspozicije, uz malo šuma u tamnijim dijelovima.



Slika 5.29 - Pojednostavljen prikaz kombiniranja dvije slike nastale korištenjem dva sklopa za pojačanje signala, jednog kojem je prioritet zasićenje, a drugom količina šuma [58]

Kad se koristi DGO, senzor će očitati sadržaj obje fotodiode unutar 1/120 sekunde i spremiti sadržaj svake od njih u zasebnu memoriju. Signali s fotodiode u ovom dijelu procesa obrađuju se paralelno, odvojeno za svaku fotodiodu. Iz memorije slijede dva očitavanja, od kojih svako traje 1/120 sekunde. Signal prolazi kroz analogno pojačalo, jednom s visokim pojačanjem signala (*high gain*) $\times G$, a drugi put sa standardnim pojačanjem signala.

Dalje različito pojačan par signala po fotodiodi ide u analogno-digitalni pretvarač, zatim se parovi signala zbrajaju s parovima signala iz istog fotoelementa. Tad se korigira (smanji) signal s visokim pojačanjem tako da ga se podijeli s G (time mu se korigira ekspozicija).

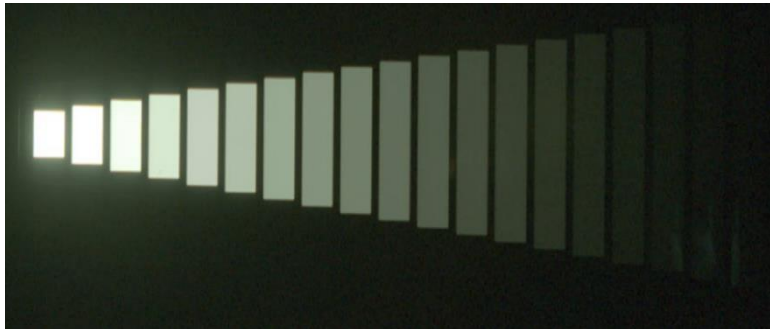


Slika 5.30 - Prikaz funkcioniranja sustava DGO, kod kojeg se vidi kako se kombiniraju uzastopni signali s različitih fotodiode iz istog fotoelementa u zajednički izlazni signal [58]

Dva signala iskombiniraju se u jedinstveni izlazni signal, koji se potom iščitava učestalošću ovisnom o tome na koji broj slika u sekundi je postavljena kamera, primjerice 23,98, 25, 29,97, 50 ili 59,94 FPS.

Dva signala kombiniraju se u izlazni signal na način da se signalu s visokim pojačanjem u analogno/digitalno pretvaraču "odrežu" svijetli tonovi, a potom se tim signalom "pregaze" tamni tonovi u standardno pojačanom signalu. Time se dobije najbolje od oba signala - za vrijednost G

pojačan signal ima manje šuma u sjenama (prag šuma snizi se za preko 1 vrijednosti ekspozicije, te se smanje artefakti prisutni kod očitavanja pri slabom svjetlu), a standardno pojačan signal zadržava svijetle tonove (štiti detalje u svijetlim tonovima) i boju. [58]

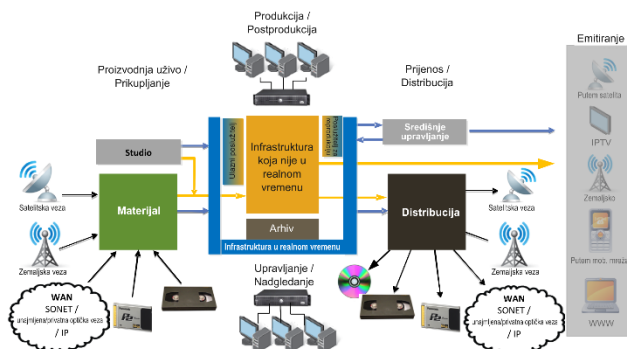


Slika 5.31 - Primjer performansi (omjera kontrasta) Super 35 mm senzora kamere EOS C300 Mark III uz korištenje tehnologije DGO [58]

Tehnika DGO drugačija je od ranije implementirane HDR tehnike kod Canonovih digitalnih fotoaparata, primjerice kod EOS-a 5D Mark IV. Kod takvih uređaja uzastopno se okidaju po dvije slike pri različitim pojačanjima signala i potom ih se spaja u jednu. Kako te dvije slike nisu okinute u isto vrijeme, prilikom spajanja u jednu HDR sliku videozapisa može doći do distorzija u slici, pogotovo ako se snima iz ruke. [59]

6. Primjena sustava UDHTV1

Model sustava UHDTV za televizijsku jedinicu za produkciju, distribuciju i difuziju sadržaja sastoji se od više dijelova.



Slika 6.1 - Referentni dijagram UHDTV ekosustava za televizijsku proizvodnju i emitiranje [5]

Jedan od primjera takvog sustava može se vidjeti na gornjoj ilustraciji (Slika 6.1), a njegove sastavnice su:

1. Proizvodnja sadržaja uživo i prikupljanje medijskog sadržaja,
2. Produkcija i postprodukcija, vezana uz infrastrukturu koja nije u realnom vremenu (za proizvodnju sadržaja koji će se naknadno emitirati),
3. Upravljanje i nadgledanje, vezano uz infrastrukturu u realnom vremenu (za prijenose uživo),
4. Prijenos i distribucija sadržaja,
5. Emitiranje.

Prvi dio načelno uključuje 4K (i eventualno 8K) sadržaj koji se snima u studiju 4K kamerama te sadržaj koji se pribavlja putem satelita, zemaljske veze, Interneta, memorijskih kartica i videokazeta. Ovisno o potrebi, odnosno namjeni, ulazni sadržaj može proći kroz jednu ili obje vrste infrastrukture (infrastrukturu za proizvodnju sadržaja uživo, te za proizvodnju sadržaja za naknadnu distribuciju ili emitiranje). Da bi infrastruktura mogla podržavati UHDTV, razvijena je mješavina optičkih i koaksijalnih sučelja za kabele, zbog potrebe za vrlo velikom propusnošću nekomprimiranog UHDTV videosignala. [5]

Preko sobe za središnje upravljanje (*master control room*) sadržaj za prijenos uživo šalje se na emitiranje putem satelita, IPTV-a, zemaljske radiodifuzije... Emitirati se može i unaprijed pripremljen sadržaj. Obje vrste sadržaja, dakle i onaj za emitiranje uživo i onaj pripremljen unaprijed, može se i naknadno distribuirati, putem satelitske ili zemaljske, mrežne infrastrukture (optičke veze, IP...) ili snimiti na fizičke medije.

6.1. Primjena u proizvodnji, emitiranju i distribuciji sadržaja

UHDTV1 tehnologija već se koristi na mnoge načine, što ilustrira Slika 6.2. Servisi koji omogućavaju gledanje videa, poput YouTubea, Vimeoa, Amazon Primea, Vudu i brojni drugi već niz godina nude mogućnost gledanja 4K videa (neki, poput YouTubea, već nude i 8K).



Slika 6.2 - Prošlo i buduće UHDTV1 emitiranje i distribucija [60]

Servisi koji naplaćuju pretplatu ili unajmljivanje sadržaja, poput Netflixia i Amazon Primea, u ponudi imaju profesionalno producirane filmove, serije i drugi 4K sadržaj (dio sadržaja sami produciraju), a kod drugih servisa, poput YouTubea i Vimeoa, korisnici obično sami snimaju, obrađuju i *uploadaju* 4K sadržaj, što je moguće najviše zahvaljujući 4K kamerama (fotoaparatom, mobitelima, akcijskim kamerama, a rjeđe kućnim ili kinematografskim kamerama, s mogućnosti snimanja 4K videa), koji su danas cjenovno dostupni mnogima. Uz 4K kamere, pristupačna je i ostala potrebna oprema, poput dovoljno snažnih računala, mikrofona, stativa, slušalica. Također, dostupan je i softver koji omogućuje videomontažu 4K videa. [61]

U UHDTV1 razlučivosti snimaju se i prenose i neki veliki sportski događaji, na primjer neke Olimpijske igre, nogometna prvenstva...

U Europi trenutno je dostupno pedesetak UHDTV1 (4K) televizijskih programa, sličan broj ih je i u Aziji, a u ostatku svijeta dostupno je dvadesetak 4K programa. UHDTV2 (8K) televizijskih programa trenutno je samo tri - dva iz Japana (BS Fuji 8K i NHK BS8K) te jedan iz Kine (CCTV-8K). [16]

6.2. Primjena u prijemu i reprodukciji sadržaja

Prijam i reprodukcija sadržaja odnose se na potrošačku stranu sustava UHDTV1, dakle u osnovi na kućne korisnike kao potrošače (konzumente), odnosno kao vlasnike opreme za prijam i reprodukciju UHDTV1 sadržaja, te gledatelje takvog sadržaja na spomenutoj opremi. Postoji nekoliko vrsta opreme, počevši od uređaja za prijam i reprodukciju sadržaja, do uređaja za

prikazivanje. Za prikazivanje specifičnog UHDTV sadržaja, svaki uređaj u lancu mora biti kompatibilan s odgovarajućim UHDTV normama, a uređaji su u pravilu kompatibilni s prijašnjim normama, poput HDTV-a i SDR-a. [6]

6.2.1. Potrošački reproduktori i prijemnici

Četiri su kategorije uređaja za prijem UHDTV1 signala ili reprodukciju Ultra HD sadržaja (ovdje se pod "reprodukcijom" misli na uređaje za dekodiranje i obradu digitalnog videa i audia - tzv. *playere*): Ultra HD Blu-ray *playeri*, DVB-S2 satelitski prijamnici, *streaming* set-top uređaji. Njima se pridružuju i AV prijemnici (AV *receivers*), kao spona između prijamnika, odnosno reproduktora UHD sadržaja te uređaja za prikaz takvog sadržaja.

6.2.1.1. Ultra HD Blu-ray reproduktori

Blu-ray format inicijalno se koristio za prikaz HD videa, uz korištenje kodeka H.264/AVC i H.262/MPEG-2, u kapacitetima od 25 i 50 GB, ovisno o tome radi li se o jednoslojnom ili dvoslojnom mediju. Ultra HD Blu-ray nastavlja se na taj format medija, no kao videokodek koristi se efikasniji H.265/HEVC.

Minimalni kapacitet kod Ultra HD Blu-rya je 50 GB (dvoslojni medij, uz korištenje *bitratea* od 72-92 Mbit/s), no dodane su i izvedbe od 66 GB (također dvoslojni medij) te troslojni medij kapaciteta 100 GB. Kod potonja dva dozvoljen je *bitrate* između 92 i 123 Mbit/s, koji se može popesti i do 144 Mbit/s, no na takvim diskovima se zbog maksimalne brzine rotacije diska od 5.000 o/min pri unutarnjem radijusu diska *bitrate* ograničava na 92 Mbit/s. [62]

Zahvaljujući iznimno visokom kapacitetu Ultra HD Blu-ray medija, i shodno tome visokom *bitrateu* videa, upravo reproduktori Ultra HD Blu-ray medija omogućavaju najkvalitetniji prikaz Ultra HD sadržaja. Valja napomenuti da stari Blu-ray reproduktori ne podržavaju reprodukciju Ultra HD Blu-ray medija.

6.2.1.2. Televizijski i medijski prijamnici

Iako UHD televizori dolaze s integriranim prijamnicima za digitalnu televiziju, neki se korisnici ipak odlučuju za kupnju zasebnih prijamnika digitalnog televizijskog signala (zemaljskog ili, od 2015. godine dostupnih, prijamnika satelitskog signala), zbog dodatnih mogućnosti koje takvi uređaji donose te jednostavnosti uporabe.

Televizijska kuća Sky Germany od listopada 2016. korisnicima njihovih plaćenih TV kanala isporučuje UHD satelitske i kabelske prijamnike, a medijske UHD prijamnike u Njemačkoj isporučuju Deutsche Telekom i Vodafone.

6.2.1.3. Uređaji za streamanje

Samostojeći uređaji za *streamanje* 4K sadržaja (SDR i HDR) nude se za više platformi, poput Amazonovog Fire TV 4K, Apple TV 4K i igraću konzolu Nvidia Shield. Ti su uređaji kompaktni, a uz *streamanje* 4K videa, nude i igre i aplikacije.

Tu su i usluge poput Amazon Video, iTunes i Netflix, a video sadržaj iz njihovih Ultra HD biblioteka može se reproducirati praktički na svakom televizoru, što uključuje i obične televizore (one koji ne spadaju u klasu smart TV-ova), pa vlasnici starijih Ultra HD televizora nisu nužno zaknuti. Za korištenje tih usluga ipak je potrebno imati brzu internetsku vezu, sposobnu za 25 Mbit/s, a televizor mora imati HDMI 2.0 ulaz s podrškom za HDCP 2.2.

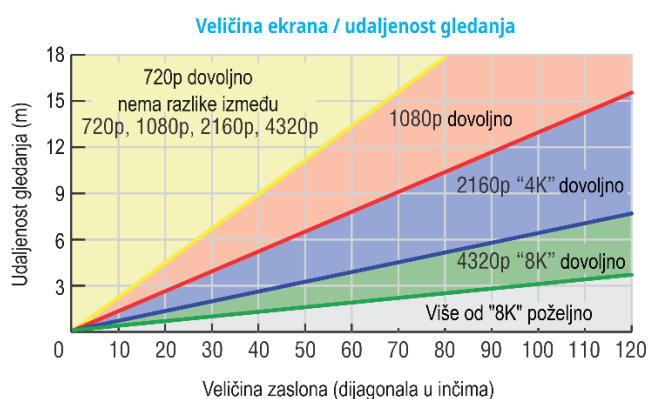
6.2.2. Uređaji za prikazivanje

UVDTV1 sadržaj može se gledati na više vrsta elektroničkih uređaja, bilo da ti uređaji sami mogu reproducirati UHDTV1 sadržaj, bilo da se na njih spoje odgovarajući reproduktori i prijemnici.

6.2.2.1. Televizori

Televizori koji podržavaju Ultra HD razlučivost, a koji se često marketinški oglašavaju kao 4K televizori, iako tehnički gledano nemaju horizontalnu razlučivost od barem 4.000 piksela, pogodni su za reprodukciju UHDTV1 sadržaja. Ukoliko podržavaju kodek H.265/HEVC, a takvih je većina aktualnih modela, onda im ni ne trebaju samostojeći prijamnici za zemaljsku digitalnu televiziju.

Danas najčešće tehnologije prikaza kod televizora su LCD i OLED, ponekad obogaćeni tehnologijom kvantnim točkama, kao što je to u slučaju sa Samsungovim QLED televizorima. Neki televizori imaju ravne ekrane, drugi zakrivljene.

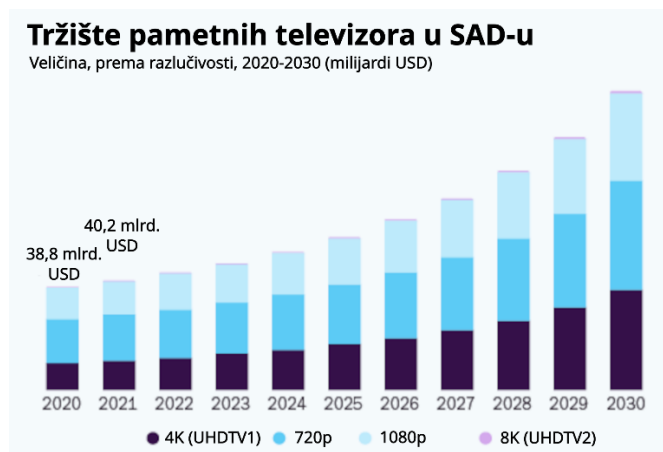


Slika 6.3 - Preporučene dijagonale ekrana u ovisnosti o razlučivosti i udaljenosti gledatelja od

Dijagonale ekrana kreću se od 40 do 79" (102 - 201 cm), s tim da kupci najčešće biraju dijagonale od 55 do 65" (140 - 165 cm). Optimalni raspon dijagonala ekrana televizora, s obzirom na rezoluciju i udaljenost s koje će gledatelj gledati televizijski program, prikazani su na ilustraciji (Slika 6.3). Što je vidno polje bolje pokriveno slikom, a da je to popraćeno višom rezolucijom, to se povećava dojam realnosti i osjećaj da je gledatelj u prikazanom sadržaju. [14]

Kupci također mogu birati marku televizora prema tome koji operacijski sustav žele na pametnom televizoru. Televizori provjereno visoke kvalitete ponekad nose oznaku "Ultra HD Premium", bilo da se radi o LCD, bilo o OLED televizorima.

Svjetlina nekih LCD televizora prelazi 900 cd/m^2 , što im omogućava reprodukciju sadržaja velikog dinamičkog opsega (HDR). Jedna od lošijih karakteristika LCD televizora je reprodukcija crne, no na tom polju rade se poboljšanja, a vjernost boja je već dostigla izvrsnu kvalitetu te već postoje LCD televizori koji skoro 100% pokrivaju gamut boje DCI-P3. Prikaz videa ovisi od televizora do televizora, jer koriste različite tehnike rada pozadinskog osvjetljenja i tehnologije poboljšanja videa.



Slika 6.4 - Projekcija prodaje pametnih televizora u SAD-u [63]

Prodaja 4K (UHDTV1) pametnih televizora u SAD-u još nije dostigla HDTV televizore, no, kao što to prikazuje Slika 6.4, očekuje se da će se vrijednost prodanih 4K televizora do 2030. godine značajno približiti prodaji 1080p HDTV televizorima, no predviđa se da će tržište 8K (UHDTV2) televizora i dalje do tada ostati vrlo malo. [63]

Plazma televizori ispali su iz igre, a danas su najveća konkurencija LCD televizorima OLED televizori. Za razliku od LCD televizora koji imaju pozadinsko osvjetljenje i RGB filter za boju, kod OLED televizori ekran je sastavljen od matrice organskih LED-ica, od kojih svaka reproducira emitira svjetlo konkretne boje, odnosno svaka LED-ica je i izvor svjetlosti. To OLED

televizorima omogućava izvrsni kontrast i sposobni su postići gotovo putpunu crnu - razina crne može biti i svega 0,0005 cd/m². Ipak, najveća svjetlina zaostaje za LCD televizorima - zasad do 540 cd/m². [6]

Izostanak pozadinskog osvjetljenja ujedno im omogućava da budu vrlo tanki. Na tržištu se već nalaze OLED televizori čiji ekrani mogu pokriti više od 95% kolornog prostora DCI-P3, što znači da i oni mogu izvrsno prikazivati boju.

6.2.2.2. Monitori

Monitori Ultra HD rezolucije sve su češći kod korisnika koji igraju igre te onih koji se profesionalno bave grafikom i uređivanjem videa. Nisu predviđeni za gledanje filmskog Ultra HD sadržaja te im nerijetko nedostaju odgovarajuća sučelja za taj zadatak, poput HDMI 2.0 i HDCP 2.2, a često im nedostaju i druga poboljšanja koje nudi Ultra HD norma. Igračima finiji detalji na Ultra HD monitorima mogu pomoći kad igraju protiv drugih igrača na natjecanjima i turnirima.

Za grafiku i videomontažu Ultra HD monitori donose puno radnog prostora, a u određenim slučajevima čak mogu zamijeniti višemonitorске sustave te mogu poslužiti i kao monitori specijalizirani za pregled (*preview*) visokorezolucijskih slika i videa. U pogledu prikaza boje, Ultra HD monitori ne zaostaju za modelima nižih rezolucija. Ultra HD monitori zbog svoje vrlo visoke razlučivosti mogu poslužiti i za videonadzor, jer se na ekran iste dijagonale može poslagati puno više prikaza s nadzornih kamera, a da se zadrži rezolucija tih prikaza.

6.2.2.3. Projektori

Oni kojima televizori nisu dovoljno veliki, imaju mogućnost kupiti UHD projektor, kojih ne nedostaje na tržištu. Sony je svoj prvi projektor sposoban za prikaz UHD sadržaja predstavio još 2011. godine, s tim da je tu riječ o DCI 4K rezoluciji od 4.096 x 2.160 piksela. Međutim, očekuje se da će se za kućne projekcije proizvođači više usmjeriti na razvoj UHD 4K projektorа, a razvoju novih modela pogoduje dostupnost Texas Instrumentovih Ultra HD procesora slike. Za skaliranje HD rezolucije na Ultra HD, mnogi projektori već nude e-shift tehnologiju, no to rješenje je i dalje temeljeno na HD procesoru slike. Projektori sposobni za prikaz HDR slike i s podrškom za kolorni gamut BT.2020 dostupni su od 2016. godine.

6.2.2.4. Smartfoni

Uslijed napretka tehnologije proizvodnih procesa, danas na tržištu već postoje mnogi mobiteli koji mogu snimati UHD video, čak i mobiteli srednjeg razreda. Najčešće se radi o snimkama rezolucije 3.840 x 2.160 pri 30 slika u sekundi, no već postoji i preko dvadeset modela koji mogu snimati pri 60 slika u sekundi. Smartfoni tipično ne podržavaju prateće mogućnosti Ultra HD

norme, poput širokog gamuta boje ili HDR-a. Videozapisi snimljeni takvim smartfonima mogu se reproducirati na praktički svim uređajima sposobnim za reprodukciju Ultra HD sadržaja.

Iako će i mnogi smartfoni bez problema reproducirati takav UHD sadržaj, vrlo je malo smartfona s UHD rezolucijom ekrana, dakle smartfona koji mogu prikazati sve detalje iz UHD videozapisa. Malo je vjerojatno da će se ta situacija promijeniti u dogledno vrijeme, jer prilikom gledanja UHD sadržaja na tako malim ekranima (oko 5.5 inča) ljudskom je oku jedva primjetna razlika u odnosu na gledanje HD sadržaja na istoj dijagonali ekrana.

7. Zaključak

Kako se mijenjaju potrebe, želje i zahtjevi potrošača, tako se mijenja i tehnologija, u skladu s mogućnostima tehnološkog napretka - uvijek postoje neka tehnološka ograničenja pa je napredak često skokovit. Isto se dogodilo i s televizijskim tehnologijama.

Kako su rasle dijagonale televizora i želja za jasnijom, kvalitetnijom slikom, tako je rasla potreba za višom rezolucijom zaslona, vjernijom bojom i boljim dinamičkim opsegom. To je za sobom povuklo rast rezolucije videokamera (a time i senzora) i razvoj prateće infrastrukture sposobne za rad s višim rezolucijama.

Televizijska tehnologija prilično dugo je stagnirala, da bi se značajna promjena dogodila s definiranjem i primjenom HDTV norme, koja je donijela HD razlučivost od 1920 x 1080 piksela. No, to nije dovoljno visoka razlučivosti za velike televizijske zaslone, za idealno gledanje, pa se krenulo s razvoje Ultra HD normi, koje podrazumijevaju značajno više rezolucije, marketinški označene kao 4K (četiri puta više piksela od HD razlučivosti) i 8K (četiri puta više piksela od 4K razlučivosti i 16 puta više piksela od HD razlučivosti). Ujedno, pravokutni pikseli više nisu dopušteni te su pikseli u UHD TV normama uvijek kvadratnog oblika.

Također su se postavili novi zahtjevi za fluidnošću videa pa UHD TV norme podrazumijevaju i značajno više frekvencije izmjene slika od tipičnih televizijskih 50-60 Hz, odnosno FPS, te se mogu koristiti i *framerateovi* od 100 ili 120 FPS. Pritom se ujedno raskrstilo sa slikom s proredom pa UHD TV norme dopuštaju samo sliku bez proreda, odnosno slike pune razlučivosti.

Povećan je i gamut boja, a nije preskočen ni dinamički opseg, pa su HDR krivulje HLG i PQ omogućile vrlo velik dinamički opseg. To je omogućilo da slika na HDR televizorima postane vjernija stvarnosti ili, u najmanju ruku, da gledatelj vidi "dublje" u jako tamne i jako svijetle tonove.

Da bi sve to bilo moguće, prvo se slika takve razlučivosti, brzine izmjene i dinamičkog opsega trebala moći snimiti, radi čega su razvijeni odgovarajući slikovni senzori. Kako se htjelo iskoristi što je moguće više postojeće infrastrukture (uključujući objektivne), cilj je bio razviti senzore istih ili sličnih dimenzija, samo više rezolucije. Za to postoje tehnološke prepreke koje je trebalo premostiti, jer viša rezolucija na istoj dijagonali senzora znači manje fotoelemente, a fotoelementi se ne mogu unedogled smanjivati bez značajnih gubitaka u kvaliteti (dinamičkom opsegu, količini šuma).

Tako je praktički došlo i do smjene tehnologija - CMOS je u osnovi zamijenio CCD tehnologiju, koja nije mogla pratiti zahtjeve za tako visokim razlučivostima i brzinama iščitavanja (što je još bilo popraćeno i većim utroškom električne energije). To je dovelo i do novih problema, jer CMOS senzori sami po sebi imaju rolajući zatvarač (CCD-ovi inherentno

imaju globalni) pa je to uzrokovalo vizualne artefakte u određenim slučajevima. Da bi se to riješilo ili barem ublažilo, CMOS senzori moraju iščitati sliku videozapisa što je brže moguće, ili je arhitektura senzora zahtijevala promjene pa su fotoelementi dodavanjem po dva tranzistora u neke senzore (tad ti fotoelementi imaju pet tranzistora) omogućili globalni zatvarač i u CMOS senzoru.

Uz televizijske UHDTV1 senzore i kamere, razvijeni su i kinematografski UHDTV1 senzori i kamere. S obzirom da kinematografski senzori nisu dimenzijama ograničeni na veličinu televizijskih UHDTV1 senzora (tipično 2/3"), omogućili su "kvalitetnije fotoelemente", odnosno u slici takvih senzora mogu se zabilježiti sitniji detalji, može imati veći dinamički opseg i bolji tonalitet. Kinematografski UHDTV senzori omogućili su prelazak s filmske vrpce na digitalnu tehnologiju prilikom snimanja filmova i drugih sadržaja koji su se tradicionalno snimali na filmsku vrpcu.

Uređaji za reprodukciju UHDTV1 videosadržaja, odnosno 4K razlučivosti, danas su dostupni mnogima, no dostupnost takvih sadržaja još uvijek je prilično ograničena, ako izuzmemo YouTube (na YouTubeu uglavnom se ne nudi komercijalni 4K sadržaj poput filmova i televizijskih serija, nego sadržaj kojeg su proizveli pojedinačni korisnici YouTubea). Televizijskih 4K programa nema mnogo (pogotovo u usporedbi s HDTV programima) i mnogi se plaćaju. Plaćaju se i *streaming* servisi koji nude 4K sadržaj, poput Netflix i HBO Maxa, s tim da oni nisu svugdje dostupni.

S obzirom na povećanje količine i dostupnosti UHDTV1 sadržaja, te na projicirani rast tržišta UHDTV1 televizora (veći rast nego rast HDTV tržišta televizora), sve više ljudi će imati prilike gledati 4K sadržaj. Bitno je što se mnogo sadržaja koji ne ide uživo danas proizvodi u barem 4K rezoluciji pa će taj sadržaj u toj rezoluciji, odnosno kvaliteti, u budućnosti postati dostupan i onima kojima sada nije. 8K rezolucija još uvijek je vrlo slabo prihvaćena, no odgovarajuće norme su donesene i tehnološka rješenja postoje pa se može očekivati i rast prihvaćenosti 8K UHDTV-a.

U Varaždinu, 29.9.2023.

Mano Baksa

8. Literatura

- [1] Grass Valley, »White Paper: The Road to UHD TV,« 2013.
- [2] K. F. Nagels, »PAR, SAR, and DAR: Making Sense of Standard Definition (SD) video pixels,« 15. 7. 2016. [Mrežno]. URL: <https://bavc.org/blog/par-sar-and-dar-making-sense-standard-definition-sd-video-pixels>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [3] TR 037: Video System Requirements for UHD TV and an Advanced 1080p Television Format, Geneva: EBU, 2016.
- [4] »Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange,« ITU-R, Geneva, 2015.
- [5] »UHD TV Ecosystem Study Group Report,« Society of Motion Picture and Television Engineers, 2014.
- [6] German TV-Platform, »Ultra HD Explained (3rd revised edition),« 2018.
- [7] »The Ins and Outs of HDR — Gamma Curves,« EIZO, 1. 7. 2022. [Mrežno]. URL: <https://www.eizo.com/library/management/ins-and-outs-of-hdr/index2.html/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [8] L. Thorpe, »EOS C500 MARK II - FULL FRAME DIGITAL CINEMA CAMERA (White Paper),« Canon, 2020.
- [9] »Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange (Recommendation ITU-R BT.2100-2),« ITU-R, 2018.
- [10] M. Brennesholtz, »HLG vs PQ Systems for HDR Television,« 2017. [Mrežno]. URL: <https://www.displaydaily.com/article/display-daily/hlg-vs-pq-systems-for-hdr-television>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [11] Ultra HD Forum, »Ultra HD Forum Guidelines (Revision: 2.4),« Freemont, 2020..

- [12] »VP9,« Wikimedia Foundation Inc, [Mrežno]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/VP9>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [13] »AV1,« Wikimedia Foundation Inc, [Mrežno]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/AV1>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [14] EBU, »Ultra High Definition Television - Roadmap, Ideas & Concepts,« 2013..
- [15] M. Nilsson, »Ultra High Definition Video Formats and Standardisation,« British Telecom Media & Broadcast, 2015.
- [16] »Ultra-high-definition television,« [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-definition_television. [Pokušaj pristupa 18. 9. 2023].
- [17] D. Litwiller, »CMOS vs. CCD: Maturing Technologies, Maturing Markets,« *Photonics Spectra*, br. August, 2005.
- [18] Elprocus, »Photoelectric Transducer : Working and Applications,« [Mrežno]. URL: <https://www.elprocus.com/photoelectric-transducer-working-applications/>. [Pokušaj pristupa 2. 9. 2023].
- [19] J. Chouinard, »The Fundamentals of Camera and Image Sensor Technology,« Baumer Ltd..
- [20] ShareGrid, »A Filmmaker's Guide to Sensor Sizes and Lens Formats,« [Mrežno]. URL: <https://vmi.tv/blog/learn-help/guide-to-sensor-sizes-and-lens-formats/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [21] »Super 35,« [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Super_35. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [22] »35 mm format,« Wikipedia, [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/35_mm_format. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [23] »Crop factor,« Wikipedia, [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Crop_factor. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].

- [24] M. Schöberl, A. Brückner, S. Foessel i A. Kaup, »Photometric limits for digital camera,« *Journal of Electronic Imaging*, svez. 21, br. Apr-Jun, 2012.
- [25] Samsung, »Isocell HP1,« [Mrežno]. URL: <https://www.samsung.com/semiconductor/minisite/isocell/mobile-image-sensors/isocell-hp1/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [26] M. Schöberl, A. Brückner, S. Foessel i A. Kaup, »Photometric limits for digital camera systems,« *Journal of Electronic Imaging*, svez. 21(2), 2012.
- [27] K. Weber, »Beyond HD: Status of Image Acquisition Solutions for,« *SMPTE Motion Imaging Journal*, 2015.
- [28] Grass Valley, »LDX 100 - Introducing the Next Generation of Premium Live Image Capture,« 2021.
- [29] P. Prayagi, Y. Wang i S. Shibui, »White paper - How does prism technology help to achieve superior color image quality?,« JAI, 2018.
- [30] A. Roberts, *Circles of Confusion*, Geneva: A European Broadcasting Union Technical Publication, 2009.
- [31] Wikipedia, »Bayer filter,« [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [32] P. G. M. Centen, »Next-Generation CMOS Imager for Broadcast Cameras,« *SMPTE Motion Imaging Journal*, br. 119, pp. 53-58, 2010.
- [33] Oxford Instruments, »CCD Architecture: Full Frame CCD, Frame Transfer and Interline CCD,« [Mrežno]. URL: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/ccd-sensor-architectures>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [34] Canon Inc, »Canon Science Labs - CMOS Sensors,« [Mrežno]. URL: https://global.canon/en/technology/s_lab/light/003/05.html. [Pokušaj pristupa 30. 8. 2023].
- [35] J. Nakamura, »Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras,« Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, 2006.

- [36] G. P. Pierre Fereyre, »CMOS Image Sensors are Entering a New Age,« Teledyne e2v, 2016.
- [37] »CCD or CMOS: can CMOS sensors replace CCDs in all cases?,« Stemmer Imaging, 2016.
- [38] K. Weber, »New Trends and Implementations in Imaging Technology for the Future of Live Production,« Grass Valley, 2013.
- [39] Grass Valley, »LDX Series Cameras with Xensium-FT Imagers - A Superior Replacement for CCD Technology,« 2014.
- [40] »Global & Rolling Shutters,« RED, [Mrežno]. URL: <https://www.red.com/red-101/global-rolling-shutter>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [41] »IEDM 2017: Sony's 3-layer stacked CMOS image sensor technology,« WikiChip Fuse, [Mrežno]. URL: <https://fuse.wikichip.org/news/763/iedm-2017-sonys-3-layer-stacked-cmos-image-sensor-technology/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [42] »Alpha 9 Full Frame Mirrorless Camera with CMOS Sensor | ILCE-9 | Sony UK,« Sony Europe B.V., [Mrežno]. URL: <https://www.sony.co.uk/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-9>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [43] R. Butler, »Canon EOS R3 Initial Review,« Digital Photography Review, 14. 9. 2021. [Mrežno]. URL: <https://www.dpreview.com/reviews/canon-eos-r3-initial-review/2>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023.].
- [44] »EOS C700 Global Shutter Sensor Replacement Service,« Canon, [Mrežno]. URL: <https://www.canon-europe.com/pro/services/upgrades/eos-c700-global-shutter-cmos-sensor-replacement/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [45] G. Cromie, »UNDERSTANDING & FIXING THE ROLLING SHUTTER EFFECT,« [Mrežno]. URL: <https://shotkit.com/rolling-shutter/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].

- [46] Panasonic, »VARICAM 32 Newly Developed super 35mm MOS SENSOR Reference manual,« 2015.
- [47] Blackmagic Design, »Blackmagic URSA Broadcast,« [Mrežno]. URL: <https://www.blackmagicdesign.com/products/blackmagicursabroadcast>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [48] »Vincent Laforet,« Wikipedia, [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Vincent_Laforet. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [49] »Canon EOS 5D Mark II,« Wikipedia, [Mrežno]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Canon_EOS_5D_Mark_II. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [50] Grass Valley, »LDK Xensium CMOS Sensor Product Shots,« [Mrežno]. URL: https://wwwapps.grassvalley.com/cgi-bin/ImageArchive_in3.pl?p=&f=Product%20Shots/LDK%20Xensium%20CMOS%20Sensor&skin=gvcmsneww. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [51] L. Thorpe, »NEW 35MM CMOS IMAGE SENSOR FOR DIGITAL CINE MOTION IMAGING,« Canon, 2014.
- [52] L. Thorpe, »Advances in CMOS Image Sensors and Associated Processing,« Canon, 2016.
- [53] »Larry Thorpe Announces Canon C300 mark II Dynamic Range Improvements,« CineD, [Mrežno]. URL: <https://www.cined.com/larry-thorpe-canon-c300-mark-ii-dynamic-range-improvements/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [54] H. Guinness, »What is a T-Stop in Photography and Videography?,« How-To Geek, 15. 6. 2018. [Mrežno]. URL: <https://www.howtogeek.com/355506/what-is-a-t-stop-in-videography/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [55] C. Poynton, »Scene-Linear Workflow/ACES - Seminar Notes,« 2012.
- [56] R. Winston, »Canon Autofocus Series: Dual Pixel CMOS AF Explained,« Canon, 27. 4. 2018. [Mrežno]. URL:

- <https://www.usa.canon.com/internet/portal/us/home/learn/education/topics/article/2018/July/Canon-Autofocus-Series-Dual-Pixel-CMOS-AF-Explained/Canon-Autofocus-Series-Dual-Pixel-CMOS-AF-Explained>.
[Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [57] SMPTE, »The Technology of Motion-Image Acquisition,« SMPTE, 2020.
- [58] L. Thorpe, »New Dual Gain Output (DGO) 4K Super 35mm CMOS Image Sensor,« Canon U.S.A., Inc., 2020.
- [59] Canon, EOS 5D Mark IV - Camera Instruction Manual, Canon Inc., 2016.
- [60] Dair Design and Consulting Ltd., »Update on UHD*,« 2015.
- [61] Riverside, »How to Film a YouTube Video in Professional Quality: 7 Steps,« 1. 8. 2023. [Mrežno]. URL: <https://riverside.fm/blog/how-to-film-a-youtube-video>. [Pokušaj pristupa 29. 9. 2023].
- [62] »Blu-ray Disc Format White Paper (9th Edition), 1. C Physical Format Specifications for BD-ROM,« Blu-ray Disc Association, 2015.
- [63] Grand View Research, »Smart TV Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2030,« [Mrežno]. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-tv-industry>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].
- [64] S. H. D. J. S. V. H. W. U. Freyer, »Ultra HD Explained,« Deutsche TV-Platform e.V., 2016.
- [65] R. v. Fintel, »White Paper: Modern CMOS Cameras as Replacements for CCD,« Basler, 2018.
- [66] P. Prayagi, Y. Wang i S. Shibui, »White paper - How does prism technology help to achieve,« JAI, 2018.
- [67] »Canon Patent Application: Quad Pixel Auto Focus sensor,« Canon News, [Mrežno]. URL: <https://www.canonnews.com/canon-patent-application-quad-pixel-auto-focus-sensor>. [Pokušaj pristupa 10. 9. 2019].

- [68] Light Illusion Ltd., »What is HDR? Understanding PQ HDR and HLG,« [Mrežno]. URL: https://www.lightillusion.com/what_is_hdr.html. [Pokušaj pristupa 19. 9. 2023].
- [69] »Dual Pixel Raw,« Canon, [Mrežno]. URL: <https://www.canon.hr/cameras/eos-5d-mark-iv/dual-pixel-raw/>. [Pokušaj pristupa 28. 9. 2023].

Popis slika

Slika 2.1- Prikaz odnosa često korištenih rezolucija	3
Slika 2.2 - Usporedba novog Rec.2020 i starog Rec.709 gamuta [5].....	6
Slika 2.3 - Usporedba dinamičkog opsega SDR i HDR televizije prema stvarnom svijetu [6]	6
Slika 2.4 - Usporedba PQ i HLG gama krivulja za HDR - vršna luminancija kod PQ krivulje ograničena je na 1.000 nita, dok kod HLG krivulje ovisi o vršnoj luminanciji koju može postići zaslon konkretnog uređaja [7].....	7
Slika 2.5 - Funkcionalna usporedba PQ i HLG sustava kad gledateljeva okolina odgovara okolini uređivanja videa (ilustracija rekreirana na temelju ilustracije s izvora [10])	9
Slika 3.1 - Inicijalna zamisao kako su faze uvođenja UHD TV-a trebale izgledati, kad je bilo još dosta nepoznanica [14]	12
Slika 4.1 - Pretvorba fotona u elektrone i potom u napon kod CCD i CMOS senzora [17]	14
Slika 4.2 - Usporedni prikaz veličina senzora i formata filmskih kamera [20].....	16
Slika 4.3 - Spektralno zračenje crnih tijela temperature T pri radijanciji (gustoća zračenja) kojeg ljudsko oko percipira kao luminanciju od 100 cd/m^2 [24]	19
Slika 4.4 - Ilustracija razlaganja svjetlosti pomoću bloka prizmi s dikroidnim zrcalima (filtrima) na tri komponente, od kojih se svaka komponenta svjetlosti reflektira u zasebni senzor [29]	22
Slika 4.5 - Pikseli konačne slike kod sustava prizmi s tri senzora, s prostorno usklađenim sensorima [29].....	23
Slika 4.6 - Raspored filtara za boju u Bayerovoj matrici [31].....	24
Slika 4.7 - Bayerov filtar na fotoelementima i matrice piksela koje nastaju kao posljedica korištenja tog filtra [29].....	24
Slika 4.8 - Usporedba spektralnog odziva sustava s prizmama i tri senzora te tipičnog Bayerovog senzora bez odbacivanja IR dijela spektra [29]	25
Slika 4.9 - Usporedba snimke testnog uzorka (brojevi na uzorku izraženi su u linijama po centimetru) dobivene kamerom s prizmom i kamerom s Bayerovim senzorom [29]	26
Slika 4.10 - Vrste CCD slikovnih senzora s obzirom na način prijenosa naboja na izlazni pin - međulinijski (interline transfer), poluslikovni (full frame) i poluslikovni međulinijski (frame transfer) CCD [33].....	27
Slika 4.11 - CMOS senzor iščitava se liniju po liniju (liniju za linijom), pri čemu se naboj iz fotodiode (p-n materijal) [34]	28
Slika 4.12 - Jedna od mogućih konfiguracija CMOS senzora [35]	29

Slika 4.13 - Usporedba iščitavanja sadržaja s običnog CMOS senzora (s rolajućim zatvaračem) i senzora s globalnim zatvaračem (CCD senzori i CMOS senzori s pet tranzistora) [38].....	31
Slika 4.14 - Ilustracija snimanja kadra u trenutku okidanja fotografske bljeskalice kod CMOS senzora s rolajućim zatvaračem kad se koristi puna te kad se koristi kratka ekspozicija, te kod CCD i Xensium-FT senzora s globalnim zatvaračem, pri punoj ekspoziciji [39].....	32
Slika 4.15 - Sonyjev troslojni CMOS senzor s globalnim zatvaračem, mogućim zahvaljujući prijenosu DRAM-u [41]	33
Slika 4.16 – Struktura senzora Panasonicovih novih VARICAM 35 kamera s dvostruko bržim iščitavanjem (ilustracija izrađena na temelju ilustracije iz izvora literature [46])	34
Slika 4.17 - Senzor kamere Blackmagic Design URSA Broadcast [47]	36
Slika 4.18 - Canon EOS Mark II - Prvi 35-milimetarski full frame fotoaparatusposoban za snimanje 1080p videa [49].....	37
Slika 5.1 - CMOS Senzor Xensium-FT [50]	39
Slika 5.2 - Usporedba faktora ispune kod prvog Xensiuma, senzora s 3 tranzistora po pikselu uz zakrivanje od 0,25 μm , simulacije faktora ispune kad bi se u fotoelemente takvog senzora stavilo pet tranzistora, te faktor ispune kod Xensiuma-FT koji po fotoelementu koristi 5 tranzistora, ali uz zakrivanje od 0,18 μm [38].....	40
Slika 5.3 - Usporedba arhitekture fotoelemenata na CMOS senzorima s tri i pet tranzistora po pikselu [38].....	41
Slika 5.4 - Usporedba prednjeg dijela CCD kamere iz serije LDK 8000 i kamere iz serije LDX sa Xensium-FT senzorom [38].....	42
Slika 5.5 - Osnovni elementi sustava vezani uz očitavanje sa senzora te vanjski optički elementi koji prethode senzoru u Canon EOS C300 i njihov utjecaj na kvalitetu slike [51]	44
Slika 5.6 - Presjek fotoelementa na senzoru kamera EOS C100, C300 i C500 [51].....	45
Slika 5.7 - Pojednostavljeni prikaz prijenosa signala sa senzora u procesor slike te dalje u pakiranje s audiom, metapodacima i organizacijskim datotekama [51].....	45
Slika 5.8 - Ilustracija dual pixel CMOS senzora s dvije fotodiode po fotoelementu [52].....	46
Slika 5.9 - Struktura fotoelementa s dvije fotodiode [52]	46
Slika 5.10 - Iskoristivi dio linearnog analognog signala iz senzora [52]	47
Slika 5.11 - Prikaz dvojnog izlaza iz dioda u fotoelementima i obrade signala [52]	48
Slika 5.12 - Prikaz odvojene obrade podataka sa sve od fotodioda [52]	49
Slika 5.13 - Mogućnost pomicanja područja senzora koje će se koristiti za automatsko fokusiranje kod kamere C300 Mark II [52].....	49
Slika 5.14- Mreža za uzorkovanje za sustav za autofokus kod kamere C300 Mark II [52].....	50
Slika 5.15 - Senzor u kameri Canon EOS C500 Mark II [8].....	51

Slika 5.16 - EOS C500 Mark II može se koristiti s kinematografskim i televizijskim objektivima [8].....	52
Slika 5.17 - Formati slike koje podržava C500 Mark II, ovisno o korištenom objektivu [8].....	52
Slika 5.18 - Izrez senzora kod korištenja anamorfnih objektivna za 2x (lijevo) i 1,3x (desno) horizontalnu kompresiju ("stiskanje" slika po horizontali) [8].....	53
Slika 5.19 - Usporedba Canonovog Cinema Gamuta s ostalim popularnim normama [8]	54
Slika 5.20 - Osi pomicanja i okretanja koje EIS može kompenzirati, uz prikaz izreza senzora koji se koristi za elektroničku stabilizaciju [8]	55
Slika 5.21 - Primjeri poremećaja u svakoj od pet osi koje EIS pokušava ispraviti [8]	55
Slika 5.22 - Prikaz optimalnog raspona otvora blende pri kojem se zadržava razlučivost od barem 100 LP/mm, a da tu razlučivost ne ograničavaju krug zamućenosti (crvena krivulja) i difrakcija (crna krivulja) [57]	56
Slika 5.23 - Proces za izradu baze podataka za korekciju difrakcije [8]	56
Slika 5.24 - Prikaz komunikacije između objektiva i videoprosesora u C500 Mark II za odabir odgovarajućeg filtra za korekciju difrakcije te drugih optičkih problema [8].....	57
Slika 5.25 - Primjer korekcije difrakcije [8].....	57
Slika 5.26 - Iz senzora u C500 Mark II paralelno idu četiri digitalna signala [8]	58
Slika 5.27 - Dva moguća pravca iz četiri matrice - RAW ili XF-AVC [8]	58
Slika 5.28 - Super 35 mm CMOS senzor s Dual Gain Output funkcionalnosti, koji se nalazi u Canonovim kamerama EOS C300 Mark III i EOS C70 [58]	59
Slika 5.29 - Pojednostavljen prikaz kombiniranja dvije slike nastale korištenjem dva sklopa za pojačanje signala, jednog kojem je prioritet zasićenje, a drugom količina šuma [58]	60
Slika 5.30 - Prikaz funkcioniranja sustava DGO, kod kojeg se vidi kako se kombiniraju uzastopni signali s različitih fotodioda iz istog fotoelementa u zajednički izlazni signal [58].....	60
Slika 5.31 - Primjer performansi (omjera kontrasta) Super 35 mm senzora kamere EOS C300 Mark III uz korištenje tehnologije DGO [58]	61
Slika 6.1 - Referentni dijagram UHDTV ekosustava za televizijsku proizvodnju i emitiranje [5]	62
Slika 6.2 - Prošlo i buduće UHDTV1 emitiranje i distribucija [60].....	63
Slika 6.3 - Preporučene dijagonale ekrana u ovisnosti o razlučivosti i udaljenosti gledatelja od televizora [1].....	65
Slika 6.4 - Projekcija prodaje pametnih televizora u SAD-u [63].....	66

Popis tablica

Tablica 2.1 - Češće korišteni 4K formati slike [1]	4
Tablica 2.2 - Usporedba HLG i PQ sustava visokog dinamičkog opsega (tablica sastavljena na temelju tablica iz dva izvora: [8], [7])	8
Tablica 4.1 - Minimalna veličina fotoelementa u μm , dobivena na temelju radiometrijskih izračuna [24].....	19
Tablica 4.2 - Veličina fotoelementa kod različitih vrsta kamera visokog razreda [27].....	21
Tablica 4.3 - Usporedba karakteristika CCD i CMOS senzora [36]	30
Tablica 5.1 - Fizičke karakteristike Canonova Super 35 senzora u C300, C100 i C500 [51].....	44

Popis jednadžbi

$d_{p, \text{crit}} = \lambda^2 \cdot f/D$ (1).....20

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Mario Baksa (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor ~~ica~~ završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Tehnologija slikovnih senzora UHDTV1 videokamera (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
Mario Baksa

Mario Baksa
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Mario Baksa (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/ica s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Tehnologija slikovnih senzora UHDTV1 videokamera (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
Mario Baksa

Mario Baksa
(vlastoručni potpis)