

ANALIZA I PRIMJENA HEVC NORME ZA KOMPRESIJU VIDEO SADRŽAJA

Mojaš, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:572076>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**



SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU
ODJEL ZA ELEKTROTEHNIKU I RAČUNARSTVO

PETAR MOJAŠ
ANALIZA I PRIMJENA HEVC NORME ZA KOMPRESIJU
VIDEO SADRŽAJA

DIPLOMSKI RAD

Dubrovnik, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU
ODJEL ZA ELEKTROTEHNIKU I RAČUNARSTVO

ANALIZA I PRIMJENA HEVC NORME ZA KOMPRESIJU
VIDEO SADRŽAJA

DIPLOMSKI RAD

Studij: Elektrotehničke i komunikacijske tehnologije u pomorstvu

Kolegij: Kompresija podataka i zaštitno kodiranje

Mentor: doc. dr. sc. Anamaria Bjelopera

Student: Petar Mojaš

Dubrovnik, rujan 2023.

SAŽETAK

Cilj kompresije video sadržaja je osmisliti učinkovite tehničke strategije koje rezultiraju smanjenjem podataka uz minimiziranje izobličenja signala. Ovakav način omogućuje lakšu distribuciju, reprodukciju i pohranjivanje značajnih količina podataka. Specifični standardi kompresije olakšavaju smanjenje video sadržaja iskorištavanjem statističke i subjektivne redundancije. Na primjer, ljudski vizualni sustav pokazuje smanjenu osjetljivost na zamršene detalje i boje. Štoviše, nizovi pokretnih slika često pokazuju značajne sličnosti između uzastopnih i/ili prethodnih slika u nizu. U ovom radu će se opisati razvoj normi za kompresiju videa uz detaljno definirane temeljne značajke i alate H.264 (AVC) postupka kompresije. Također, definirati će se glavne značajke i alati HEVC postupka kompresije te objasniti poboljšanje HEVC postupka kompresije u odnosu na H.264 (AVC). Za ispitivanje i usporedbu rezultata HEVC postupka kompresije, potrebno je definirati mjere za ocjenu kvalitete videa. Naposljetku će se prikazati primjena HEVC norme za kompresiju te dati pregled najnovijih dostignuća u pogledu ove vrste kompresije.

Ključne riječi: *video kompresija, HEVC, H.264 (AVC), transformacija, kodiranje*

ABSTRACT

The objective of video content compression is to devise effective technical strategies that result in data reduction while minimizing signal distortion. This facilitates the distribution, reproduction, and storage of substantial data volumes. Specific compression standards facilitate the reduction of video content by capitalizing on both statistical and subjective redundancies. For instance, the human visual system exhibits reduced sensitivity to intricate details and colors. Moreover, sequences of moving images often exhibit considerable similarities between successive and/or preceding frames. This paper will describe the development of video compression standards with the fundamental features and tools of the H.264 (AVC) compression process defined in detail. It will also define the main features and tools of the HEVC compression process and explain the improvement of the HEVC compression process compared to H.264 (AVC). To test and compare the results of the HEVC compression process, it is necessary to define measures for the evaluation of video quality. Finally, the application of the HEVC compression standard will be presented and an overview of the latest developments in this type of compression will be given.

Keywords: *video compression, HEVC, H.264 (AVC), transformation, coding*

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KARAKTERISTIKE VIDEO.....	2
2.1. Prostorno i vremensko uzorkovanje	2
2.2. RGB i YCbCr prostor boja	3
2.2.1. Poduzorkovanje krominantnih komponenti	4
2.3. Video rezolucija	5
2.4. Dubina bita.....	6
3. VIDEO KOMPRESIJA	7
3.1. Kompresija bez gubitaka i kompresija s gubiticima.....	8
4. OSNOVNA NAČELA KODIRANJA VIDEO	9
4.1. Pred-obrađa	9
4.2. Prostorna kompresija	9
4.3. Vremenska kompresija	11
4.4. Kontrola protoka.....	14
5. H.264 (AVC) STANDARD ZA KOMPRESIJU VIDEO	15
5.1. Značajke i alati norme H.264 (AVC)	15
5.1.2. Cjelobrojna transformacija, skaliranje i kvantizacija	17
5.1.3. Unutarokvirno predviđanje	18
5.1.4. Filtar za uklanjanje efekta bloka unutar petlje	21
5.1.5. Entropijsko kodiranje.....	23
5.1.6. H.264 profili	24
6. H.265 (HEVC) STANDARD ZA KOMPRESIJU VIDEO.....	25
6.1. Značajke i alati norme H.265 (HEVC).....	26
6.1.2. CTU struktura.....	26
6.1.3. Kompenzacija pokreta	27
6.1.4. Paralelna obrada	28
6.1.5. Cjelobrojna transformacija.....	29
6.1.6. Unutarokvirno predviđanje	30
6.1.7. Filtar za uklanjanje efekta bloka unutar petlje	32
6.1.8. Entropijsko kodiranje.....	32
6.1.9. Pomak prilagodljiv uzorku.....	33
7. USPOREDBA AVC i HEVC STANDARDA.....	34
8. PRIMJENA HEVC STANDARDA.....	44
8.1. Pregled najnovijih dostignuća HEVC kompresije	45
9. ZAKLJUČAK.....	49
10. LITERATURA.....	51

11. PRILOZI.....	55
11.1. Popis slika	55
11.2. Popis tablica	56

1. UVOD

Predmet ovog diplomskog rada je analiza i primjena HEVC (engl. *High Efficiency Video Coding*) norme za kompresiju video sadržaja. Multimedijски sadržaj postao je sastavni aspekt našeg svakodnevnog života koji zahtjeva distribuciju, reprodukciju i pohranu. Dijeljenje videozapisa visoke razlučivosti kao i pohrana različitih uspomena na raznim uređajima omogućuju različite tehnike kompresije videa koje direktno utječu na naša vizualna iskustva. U ljudskim zahtjevima za što boljim vizualnim iskustvom dolazi do unaprjeđenja tehnologija sa ciljem održavanja kvalitete između kompresije podataka i vizualnog prikaza. Posljedično tome dolazi do razvoja različitih standarda video kodiranja. Kako bi lakše spoznali složenost kompresije videa potrebno je znati temeljne mehanizme koji odgovaraju karakteristikama ljudskog oka te način na koji jedan video nastaje, koji će biti opisani na početku ovog rada.

Razumijevanje svjetline, boja i krominancije ključno je u stvaranju algoritama kompresije koji su usklađeni s ljudskim vizualnim sustavom. Osnova video kompresije je korištenje vremenskih i prostornih redundancija u uzastopnim okvirima video sekvence. Usporedbom trenutnih i prethodnih slika, algoritmi kompresije mogu smanjiti redundantnost podataka čime se postižu viši omjeri kompresije bez ugrožavanja kvalitete.

Rad je podijeljen na osam poglavlja gdje se nakon uvodnog dijela navode karakteristike videa odnosno stvaranje videa koji još nije ušao u proces kompresije. U trećem poglavlju definirati će se pojam video kompresije i objasniti dvije vrste video kompresije ključne za razumijevanje kvalitete video sadržaja. U četvrtom poglavlju slijedi objašnjenje osnovnih načela kodiranja videa kod modernih digitalnih video formata kroz četiri osnovne skupine obrade. U petom poglavlju, nadovezujući se na općenitiji opis kodiranja iz četvrtog poglavlja, iznose se teorijske značajke i alati koje koristi H.264 (AVC) (engl. *Advanced Video Coding*) norma. Također, opisani su važniji alati primjene H.264 (AVC) norme. Nadalje, u šestom poglavlju definiraju se značajke i alati nasljednika H.264 (AVC) norme te se navode unaprijeđene tehnike korištenja u odnosu na H.264 (AVC) standard. U sedmom poglavlju definiraju se parametri za ocjenu kvalitete videa kako bi se dvije prethodno opisane norme mogle teorijski i praktično usporediti. Na kraju u posljednjem poglavlju predstaviti će se izazovi i dostignuća HEVC standarda te dokazati da HEVC usavršava opisane unaprijeđene tehnike kako bi poboljšao učinkovitost kompresije.

2. KARAKTERISTIKE VIDEA

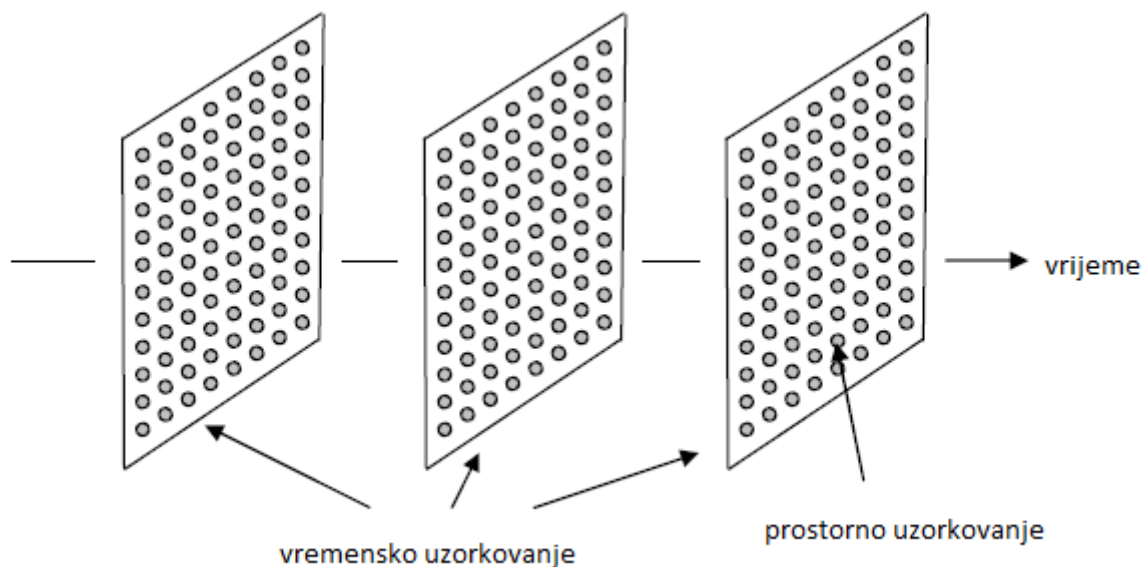
Svaki korak, od snimanja videa do uređivanja i poboljšanja, utječe na ukupnu kvalitetu. Međutim, ključno je uzeti u obzir brojne video karakteristike prije nego što video prođe kroz postupak kompresije, gdje se pretvara u kompaktni format poput H.264 ili H.265, jer su ti čimbenici ključni za cjelokupno iskustvo gledanja.

2.1. Prostorno i vremensko uzorkovanje

Vizualna scena koju gledamo digitalnim putem dio je digitalnog video signala za koju je bilo potrebno koristiti vremensko i prostorno uzorkovanje. Drugim riječima, iza niza pokretnih slika koje gledamo na ekranima leži složeni postupak predstavljanja vremena i prostora. Taj postupak uključuje vremensko i prostorno uzorkovanje, dva međusobno ovisna koncepta koji su važni u načinu na koji percipiramo i komuniciramo s video sadržajem. Dinamični prizori poput elegantnog pokreta plesača zahtjeva hvatanje pokreta u okvirima. Da bi se zabilježio takav pokret u okvirima potrebno je razbijanje vremena na diskretne jedinice. Svaka sekunda video scene koja je prikazivala pokret razbijena je na individualne okvire koji su zabilježili specifični moment. Brzina kojom se ovakvi okviri prikazuju gledateljima, odnosno brzina kadrova, mjeri se kao FPS (engl. *Frames per second*). Može se zaključiti da uzorkovanje vremena bitno utječe na fluidnost kretanja u scenama kao i očuvanje vremenskih informacija. Tako se kadrovi mogu snimati u 30 slika u sekundi ili više, kao što je 60 slika u sekundi.

Vizualna scena također može sadržavati veliki broj objekata različitih osvjetljenja, boja i oblika. Osim prethodno navedenih vremenskih karakteristika odnosno prenošenje pokreta, potrebno je i prenijeti prostorne karakteristike tj. boju, oblik, osvjetljenje i teksturu objekta. Snimanje scene koju smo prethodno opisali također zahtjeva uzimanje uzoraka u vremenskim intervalima. To bi značilo dodavanjem brojeva koji predstavljaju svjetlinu i boju uzorka svakoj točki u sceni kroz sve scene dobivene vremenskim uzorkovanjem. Svaki okvir je dakle sastavljen od elementarnih blokova odnosno piksela. Prostorno uzorkovanje će odrediti gustoću piksela u slici što rezultira razinom snimljenih detalja koje gledamo.

U krajnjem obliku točke na mreži okvira sadrže informacije o boji i osvjetljenju tijekom prostornog uzorkovanja. Na slici 1. prikazano je vremensko i prostorno uzorkovanje.



Slika 1. Vremensko i prostorno uzorkovanje [1]

2.2. RGB i YCbCr prostor boja

Prostor boja je osnovna ideja u svijetu digitalne slike i videozapisa. Ona pruža standardiziran način predstavljanja i definiranja boja koje omogućuje precizno prikazivanje i rad s vizualnim podacima. Prostor boja određuje kako se boje kodiraju, pohranjuju i prenose u videozapisima.

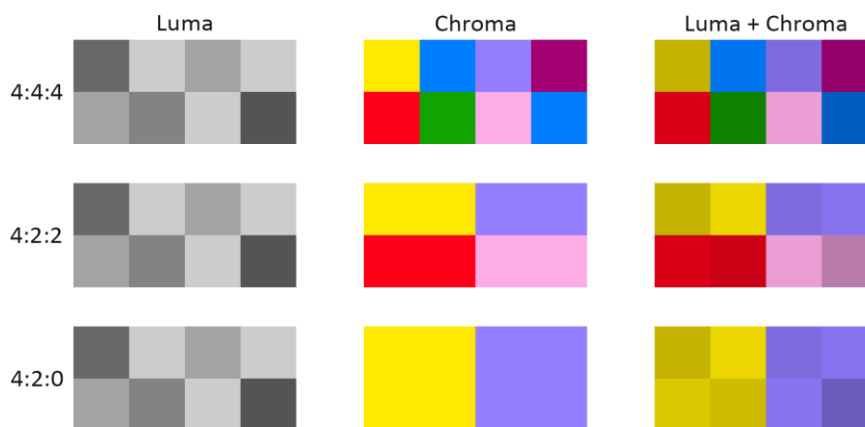
RGB (engl. *Red, Green, Blue*) se široko koristi u digitalnom snimanju te predstavlja crvenu, zelenu i plavu boju. RGB opisom, boje se definiraju prisustvom crvene, zelene i plave boje odnosno svaki okvir sastoji se od vrijednosti koje predstavljaju količinu crvene, zelene i plave boje potrebne za stvaranje određene boje. Vrijednosti ovih boja rasprostranjuju se od 0 do 255 te na taj način određuju koliko ima neke boje u određenoj točki. RGB prostor boja odličan je prikaz slika u boji, ali nije toliko efikasan u video kompresiji jer je svaka boja spremljena u istoj rezoluciji.

Tri komponente prostora boja YCbCr su osvjetljenje (Y), krominancija plave (CB) i krominancija crvene (CR). Cb i Cr stoje za razlike u boji u odnosu na svjetlinu, a Y označava svjetlinu slike. Zbog činjenice da je ljudski vizualni sustav osjetljiviji na promjene u svjetlini nego na promjene u boji, YCbCr je posebno koristan za kompresiju i prijenos videozapisa. Upravo zbog toga češće se koristi YCbCr prostor boja koji se izračunava iz RGB prostora boja. Spomenute tri komponente YCbCr prostora boja potrebne su za prijenos informacija. Prilikom

prijenosa, zbog osjetljivosti ljudskog vizualnog sustava, komponente krominancije plave (Cb) i crvene (Cr) će biti prenesene u manjoj rezoluciji od komponente svjetline (Y) što će rezultirati manjom količinom potrebnih podataka za prikaz.

2.2.1. Poduzorkovanje krominantnih komponenti

Ako je video signal podijeljen na dva dijela tj. informacija o osvjetljenju i informacija o boji, tada je informacija o osvjetljenju nositelj oblika i definicije slike na ekranu. Poduzorkovanje krominantnih komponenti smanjuje količinu informacije o boji kod video signala kako bi stvorio više prostora za prijenos informacije o osvjetljenju. Na ovakav način održava se jasnoća i kvaliteta slike i ujedno smanjuje veličina datoteke. Neki od najčešćih omjera poduzorkovanja krominantnih komponenti su 4:1:1, 4:2:0, 4:2:2, 4:4:4. Prvi broj kod navedenih omjera označava broj piksela u horizontalnom području koji će proći kroz proces uzorkovanja. Drugi broj navedenog omjera predstavlja broj piksela koji daju informaciju o boji za prvi red piksela. Naposljetku treći broj omjera predstavlja broj piksela koji će ponuditi informaciju o boji za drugi red piksela. Signal s omjerom uzorkovanja krominantnih komponenti 4:4:4 u cijelosti transportira podatke o bojama i osvjetljenju. Signal s omjerom uzorkovanja krominantnih komponenti 4:2:2 ima polovinu uzoraka boje u usporedbi s 4:4:4 dok 4:2:0 ima samo četvrtinu podataka o boji. Signal s omjerom uzorkovanja krominantnih komponenti 4: 2: 2 imat će poduzorkovanje boje u horizontalnom smjeru, ali će održavati okomito uzorkovanje. 4: 2: 0, s druge strane, samo će poduzorkovati boje od polovice piksela u prvom redu i u potpunosti zanemariti drugi red uzorka, što je i prikazano na slici 2.

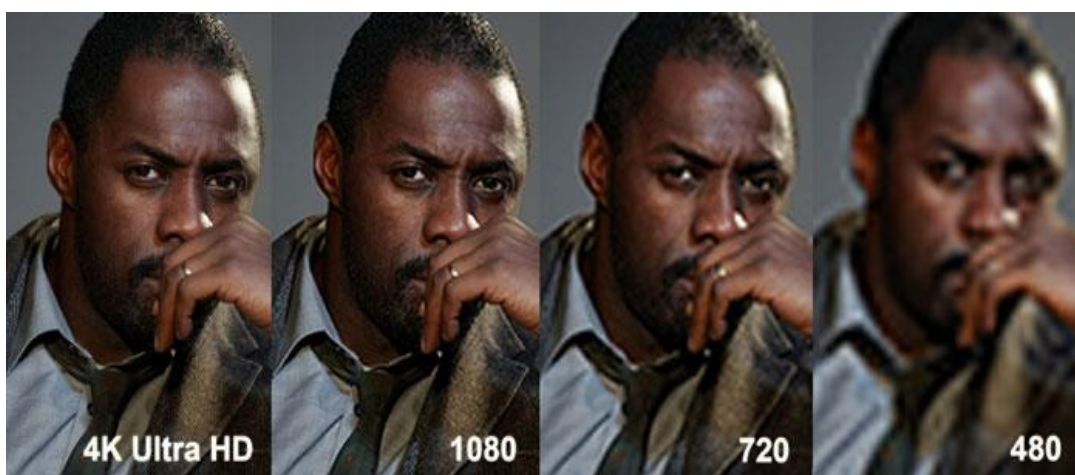


Slika 2. Poduzorkovanje krominantnih komponenti

2.3. Video rezolucija

Ključna komponenta vizualnog sadržaja je video rezolucija, koja utvrđuje stupanj jasnoće i detalja u okviru slike ili videa. Određuje koliko će se piksela koristiti za predstavljanje vizualnih informacija, što u konačnici utječe na vizualnu kvalitetu i točnost sadržaja. Broj piksela duž vodoravne i okomite dimenzije okvira slike ili videa koristi se za opisivanje razlučivosti videa. Na primjer, okvir rezolucije 1920x1080 ima 1920 piksela u širinu i 1080 piksela u visinu. Ovi parametri izravno utječu na stupanj oštine i detalja koji se mogu vidjeti unutar okvira. Više rezolucije s više piksela, poput 4K (3840x2160) ili 8K (7680x4320), mogu prikazati detaljne teksture, fine linije i suptilne nijanse. Za velike zaslone, impresivna iskustva i situacije u kojima je svaki detalj bitan, ove rezolucije su izuzetno korisne. U ranijim televizijskim sustavima bile su tipične standardne rezolucije (SD) kao što je 720x480.

Na slici 3. prikazana je ista scena u različitim rezolucijama. Ako promatramo istu scenu u različitim rezolucijama možemo zaključiti kako rezolucija utječe na percepciju detalja te jasnoću i kvalitetu slike. Ovakvom analizom moguće je bolje razumijevanje važnosti rezolucije kod vizualnih informacija.



Slika 3. Prikaz iste scene u različitim rezolucijama

2.4. Dubina bita

Pojam „bit depth“ opisuje koliko se bitova koristi za predstavljanje svake pojedinačne boje (kao što su crvena, zelena i plava) jednog piksela na slici ili videu. Količina različitih razina boja koje se mogu izraziti za svaku komponentu boje ovisi o dubini bita. Na primjer, iako dubina bita od 10 bita dopušta $2^{10} = 1024$ razine boje, dubina bita od 8 bita dopušta samo $2^8 = 256$ razina boje [2]. Vizualno ugodnija slika biti će s većom dubinom bita što bi značilo i veću dubinu boje kao i veću točnost boja, međutim to bi značilo veće potrebe za pohranu kao i procesorsku snagu za kodiranje i dekodiranje podataka. Profili nude različite dubine bitova. Odabir dubine bita određen je posebnim potrebama uređaja ili aplikacije, uzimajući u obzir kompromise između točnosti boja i procesorske snage te kapaciteta pohrane.



Slika 4. Razlika 8 i 10 bitne boje [15]

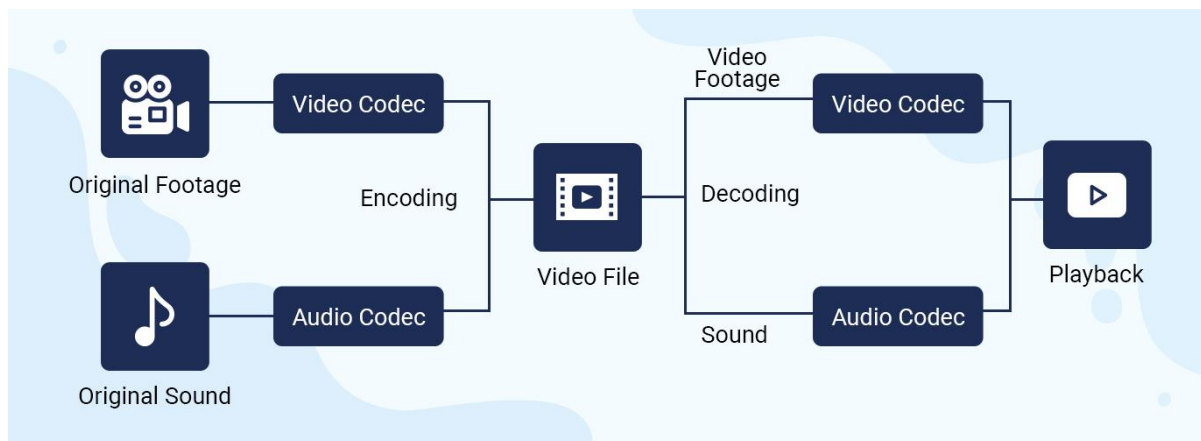
3. VIDEO KOMPRESIJA

Video se može opisati kao elektronički medij kojem je namjena snimanje, reprodukcija, emitiranje te prikaz pokretnih vizualnih i audio medija [3].

Video kompresija je tehnologija kojom se omogućuje da se video zapiše na takav način da zauzme što manje memorijskog prostora a da se taj video zapis pri puštanju (čitanju, reproduciranju) što manje razlikuje od originala [4].

Zbog česte ograničenosti u prostoru za pohranu podataka potrebno je video kodiranje. Video kodiranje se također koristi kada su kanali potrebni za prijenos podataka neadekvatni. Kanali koji služe za prijenos video sadržaja sadrže koder i dekodeer koji će kodirati i dekodirati video sadržaj. U današnje doba gdje je upotreba video sadržaja sve veća javlja se potreba za novim i učinkovitijim metodama kodiranja video podataka.

Pojam kodek zapravo je kombinacija riječi kodiranje i dekodiranje i opisuje proces komprimiranja i dekomprimiranja podataka kao datoteka ili toka u stvarnom vremenu. Za inženjere, kodek se obično odnosi na standard kompresije koji koristi video koder, dekodeer ili transkoder. Slika 5. prikazuje proces kodiranja i dekodiranja [5].

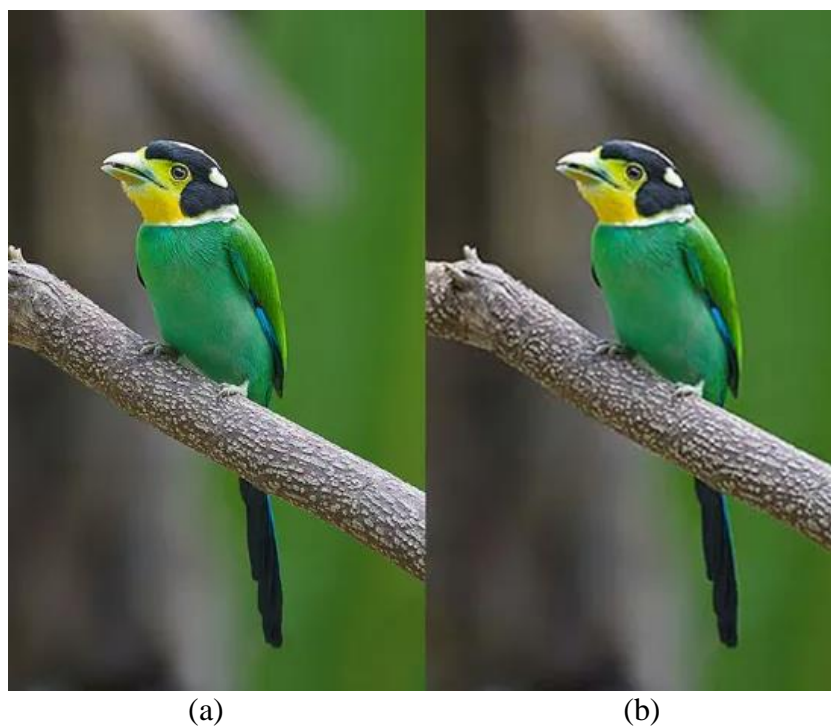


Slika 5. Proces kodiranja i dekodiranja [6]

Cilj svake video kompresije je postizanje što manjih datoteka što prati nemogućnost postizanja toliko malih datoteka bez gubitka kvalitete. Može se ukratko reći da je osnovni cilj svake kompresije smanjenje redundancije. S obzirom na mogućnost izbora odnosno prioriteta (postići manje datoteke ili sačuvati kvalitetu) nastale su dvije vrste kompresije, kompresija bez gubitaka i kompresija s gubitcima.

3.1. Kompresija bez gubitaka i kompresija s gubiticima

Kompresija bez gubitaka je vrsta video kompresije kod koje nema nikakvog gubitka kvalitete. Reproduciranjem takvog video zapisa postiže se prikaz videa identičan originalu. Ova metoda ima prednost očuvanja kvalitete, ali isto tako i svoje nedostatke. Glavni nedostatak je dobivanje ogromnih datoteka koji su nepraktični te ih je nemoguće koristiti za masovnu upotrebu. S druge strane kompresija s gubiticima je svaka kompresija kod koje se mora izgubiti određeni postotak kvalitete od originala. Drugim riječima uvijek će postojati barem mala razlika u odnosu na original. Neke suvremene tehnologije omogućuju da ta razlika (gubitak kvalitete) bude neprimjetna. Kompresija s gubiticima u videu postiže minimalnu razliku kod gledaoca kod uspoređivanja sa originalom, veliku prednost postiže dobivanjem manjih datoteka koji su pogodniji za snimanje, kopiranje, slanje na internet i sl. Na slici 6. prikazana je kompresija bez gubitaka i kompresije s gubiticima [7].



Slika 6. (a) Kompresija bez gubitaka (b) Kompresija s gubiticima

4. OSNOVNA NAČELA KODIRANJA VIDEA

Iako je H.265 norma novija od svog prethodnika, ona u svojoj bazi nasljeđuje osnove načela rada i alate. H.264 i H.265 standardi koriste slična načela kodiranja kao i većina modernih digitalnih video formata koje možemo podijeliti u četiri osnovne skupine obrade [8]:

- Pred-obrađ
- Prostorna kompresija
- Vremenska kompresija
- Kontrola protoka

4.1. Pred-obrađ

Pred-obrađ u video kodiranju odnosi se na skup operacija koje se primjenjuju na neobrađene video podatke prije nego što se kodiraju. Ove se operacije koriste za poboljšanje učinkovitosti procesa video kodiranja i mogu uključivati niz zadataka kao što su pretvorba prostora boja, promjena veličine i filtriranje. Neki primjeri tehnika prethodne obrade koje se koriste u video kodiranju uključuju:

- Pretvorba prostora boja: Ovaj postupak pretvara video podatke iz jednog prostora boja u drugi, primjerice iz RGB u YCbCr. To može poboljšati učinkovitost procesa video kodiranja smanjenjem količine vizualnih informacija koje je potrebno kodirati.
- Promjena veličine: Ovaj postupak mijenja razlučivost videozapisa, što može biti korisno za smanjenje brzine prijenosa podataka potrebne za prijenos ili pohranu videozapisa.
- Filtriranje: Ovaj proces primjenjuje različite filtre na video podatke, kao što su filtri za smanjenje šuma ili poboljšanje rubova. Ovi filtri mogu poboljšati vizualnu kvalitetu videozapisa i olakšati njegovo sažimanje.

4.2. Prostorna kompresija

Prostorna kompresija predstavlja oblik kompresije s gubitkom, što znači da se neke izvorne vizualne informacije odbacuju kako bi se postigla manja veličina podataka. Postoji nekoliko tehnika koje se koriste za prostornu kompresiju u video kodiranju, uključujući:

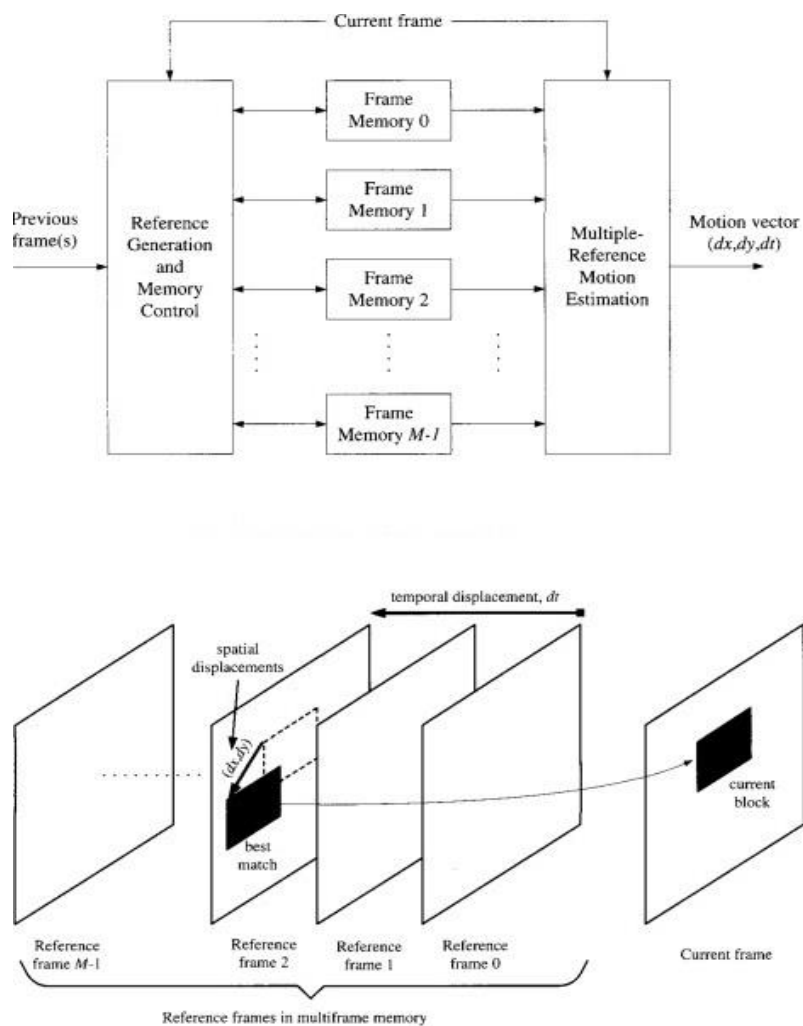
- Poduzorkovanje: Ova tehnika smanjuje razlučivost video podataka odbacivanjem nekih piksela. To se često radi u domeni prostora boja, kao što je poduzorkovanje kanala boje u YcbCr prostoru boja.
- Vektorska kvantizacija, skraćeno VQ (engl. *Vector Quantization*): Ova tehnika grupira slične blokove slika u klastera, a zatim predstavlja svaki blok prema indeksu njegovog klastera.
- Transformacijsko kodiranje: Ova tehnika primjenjuje matematičku transformaciju na video podatke, kao što je diskretna Fourierova transformacija tj. DFT (engl. *Discrete Fourier transform*) i diskretna kosinusna transformacija, odnosno DCT (engl. *Discrete Cosine Transform*). DCT transformacijom razdvajaju se vizualne informacije u različite frekvencijske pojaseve. Koeficijenti transformacije tada se mogu kvantizirati i kodirati, odbacujući visokofrekventne komponente koje su manje perceptualno važne.

Sve ove tehnike koriste se za uklanjanje prostorne redundancije na slici, uklanjanjem informacija koje nisu važne za ljudsko oko, ili smanjenjem razlučivosti slike, čime se smanjuje količina podataka potrebnih za predstavljanje slike, a time i smanjuje brzinu prijenosa podataka. U prostornom video kodiranju, I-okviri (ili intra-okviri) koriste se za predstavljanje kompletnog okvira video podataka. Pojam „intra“ odnosi se na činjenicu da su informacije u I-okviru samostalne i ne ovise o drugim okvirima za svoju reprezentaciju. Ključni okviri (engl. *keyframes*) je naziv za I okvire iako svi I okviri nisu ključni. U postupku međuokvirnog kodiranja oni se često koriste kao referentni okviri. Međuokvirno kodiranje je proces koji slijedi nakon prostorne kompresije. I okviri se tad koriste kao referentni okviri te predstavljaju mjesto u video sekvenci gdje moguće započeti dekodiranje kao npr. promjena televizijskog kanala. Dakle I-okviri se obično koriste u pravilnim intervalima kroz video stream kako bi se osigurala referentna točka za ostale okvire. Svaki okvir može biti podijeljen na određeni broj blokova različitih dimenzija. Ako npr. postoji blok 8x8 koji se prebacuje iz domene prostornog inteziteta u domenu prostornih frekvencija pomoću DCT, sljedećim korakom nastali frekvencijski koeficijenti prolaze proces kvantizacije i entropijskog kodiranja. Spremnik na izlazu takvog sustava može biti dodatak s kojim se ostvaraju povratna veza koja u konačnici uspostavlja kontrolu brzine protoka bitova. Razlog tome je jer I okviri sadrže sve informacije za prikaz jednog okvira pa tako imaju najveću količinu podataka među svim okvirima u video streamu, što može povećati brzinu prijenosa podataka. U standardima video kompresije kao što su H.264 i H.265, I-okviri su također poznati kao ključni okviri i obično se koriste kao početna

točka za predviđanje između okvira, gdje su informacije između I-okvira predstavljene razlika između njih i prethodnog I-okvira, koji je poznat kao P-okvir (predviđeni okvir). Također važno je naglasiti da su I okviri neizostavni dio pravilno kodiranog videa, ali i da imaju najniži stupanj kompresije.

4.3. Vremenska kompresija

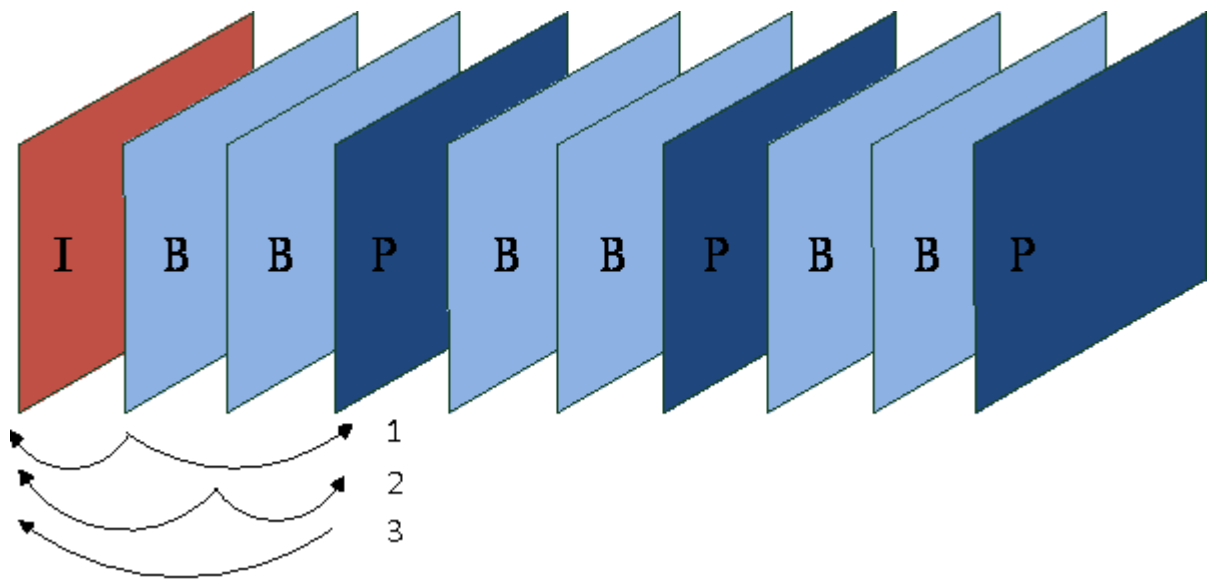
Odnosi se na proces smanjenja količine podataka potrebnih za predstavljanje uzastopnih okvira videa. To je oblik kompresije između okvira, koji iskorištava vremensku redundanciju. Kompenzacija kretanja (pokreta) je jedna od tehnika koja se koristi za vremensku kompresiju. Koristi informacije o kretanju objekata u videu za predviđanje sadržaja budućih okvira. Na slici 7. prikazana je blok shema procjene pokreta za dobivanje vektora pokreta kao i prikaz kompenzacije pokreta.



Slika 7. Kompenzacija pokreta [9]

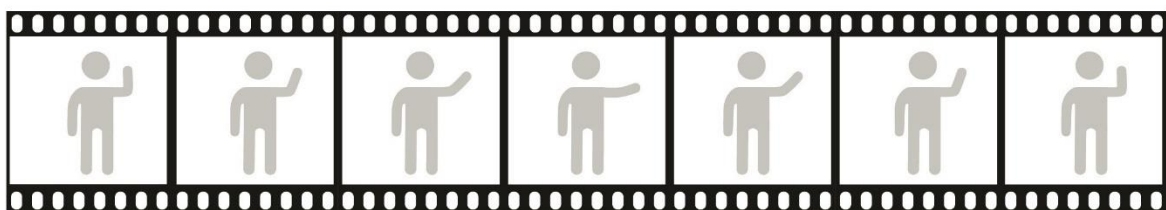
Rezultat vremenske kompresije biti će dobivanje P i B okvira. B okviri su skraćenica za „dvosmjerno predviđene okvire“ koji su predviđeni korištenjem informacija iz P (prethodnih okvira) i I/P (sljedećih okvira) okvira u video sekvenci. Dvosmjerno predviđeni okvir značajno doprinosi stupnju kompresije jer učinkovito bilježi razlike između predviđenog i stvarnog okvira. Spomenutom tehnikom kompenzacije pokreta moguće je doći do sličnosti između susjednih okvira te na taj način osigurati smanjenje informacija u vremenu. P i B okviri su kodirani okviri koji ovise o prethodnim ili sljedećim okvirima za izračun svojih elemenata tj. predviđeni su iz prethodnih ili sljedećih okvira jer nemaju potpuno znanje o svim svojim elementima. I ili P okviri iz prošlosti koriste se za predviđanje P okvira, a I ili P okviri iz prošlosti i budućnosti koriste se za predviđanje B okvira. Izračunavanje vektora pokreta i izrada okvira razlike dva su primarna zadatka koderu pri izradi P i B okvira. Nakon što se takvi okviri kodiraju i dođu do dekodera koriste se za prikaz cijele slike tih okvira. Budući da postoji sličnosti između makroblokova odnosno između trenutnog i sljedećeg/prethodnog makrobloka može se izračunati vektor pokreta. Vektor pokreta pronalazi sličnost između makroblokova te posjeduje informaciju o udaljenosti između njih. Kod procesa kompenzacije pokreta u koderu koristiti će se prikupljene informacije vektora pokreta za kodirani makroblok te će se postaviti najbliži makroblok referentnog okvira na mjesto kodiranog makrobloka. Ovakav način korištenja vektor pokreta u koderu omogućuje dobivanje okvira prediktora ako se postupak primjeni na sve makroblokove. Okvir razlike dobije se oduzimanjem okvira prediktora od okvira koji se kodira. Originalni okvir naravno sadrži više informacija od okvira razlike tako da se okvir razlike dalje kodira kodira i to kao I okvir. U slučaju s B okvirima, postupak je malo kompleksniji. Razlog tome je korištenje prethodnog i sljedećeg okvira kao reference. Iako imaju bolji stupanj kompresije složeniji je izračun vektora pomaka. Na sljedećoj slici prikazani su ključni okviri u AVC sekvenci.

Fraze „intra predviđanje“ i „inter predviđanje“ zajedno s I, P i B okvirima igraju značajnu ulogu u video kompresiji za smanjenje količine podataka koje su od velikog značaja za opisivanje video sekvenci. Zaključno možemo raščlaniti svaku ideju. Dakle, intra predviđanje je tehnika koja se koristi unutar jednog okvira za smanjenje prostorne redundantnosti koja se u većini slučajeva primjenjuje na I (intra-kodirane) okvire. S druge strane „inter predviđanje“ koristimo za iskorištavanje vremenske redundancije odnosno kod prediktivno kodiranih ili dvosmjerno prediktivnih okvira.

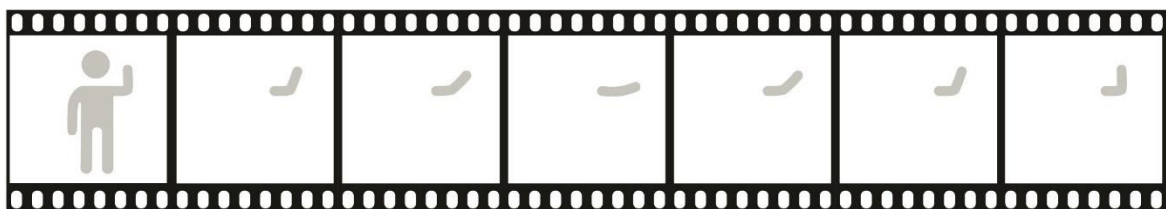


Slika 8. Ključni okviri u AVC sekvenci [15]

Temelj standarda video kompresije kao što su H.264, H.265 (HEVC) i drugih je kombinacija određenih formata okvira i algoritama predviđanja. Video kodeci mogu postići učinkovitu kompresiju uz očuvanje kvalitete videa pažljivom upotrebom intra i inter predviđanja. Na sljedećoj slici prikazana je razlika „intra“ i „inter“ predviđanja.



„intra predviđanje“ - svaki okvir je kodiran pojedinačno



„inter predviđanje“ - samo su razlike između okvira kodirane za svaku grupu okvira

Slika 9. „intra“ i „inter“ predviđanje

4.4. Kontrola protoka

Postupci koji se koriste za upravljanje protokom podataka između koderu i dekoderu u sustavu video kompresije nazivaju se kontrolom protoka. Kada govorimo o video kodiranju, pojam "bitrate" odnosi se na količinu bitova koji se koriste za predstavljanje svake jedinice vremena (često sekunde) u videu. To je mjera koliko je informacija korišteno za stvaranje videa, a često se navodi u bitovima po sekundi (bps). Kvaliteta videozapisa poboljšat će se s povećanjem brzine prijenosa jer će se za prikaz videozapisa koristiti više podataka. Međutim, veća brzina prijenosa također znači da je za slanje videa potrebna veća propusnost. Kontrola protoka će uspostaviti ravnotežu između učinkovitosti i kvalitete.

Postoje dvije vrste brzine prijenosa, to su konstantna CBR (engl. *Constant Bit Rate*) i varijabilna VBR (engl. *Variable Bit Rate*). Konstantna brzina prijenosa, u slučaju kompleksnih scena, ograničava kvalitetu slike jer kroz video zadržava konstantantnu brzinu prijenosa. S druge strane, varijabilna brzina prijenosa (VBR) dodjeljuje veći broj podataka kompleksnim scenama a jednostavnijim dodjeljuje manji što ne ograničava kvalitetu.

5. H.264 (AVC) STANDARD ZA KOMPRESIJU VIDEA

Učinkovite tehnike kompresije videa bitne su u svijetu digitalnih medija koji se stalno mijenja kako bi se omogućio nesmetan prijenos, pohranjivanje i reprodukcija visokokvalitetnog vizualnog sadržaja. Standard H.264 (AVC) istaknuo se kao revolucionaran i značajan napredak među brojnim standardima video kodiranja koji su utjecali na modernu industriju digitalnog videa. Ključni razvoj tehnologije video kompresije, H.264, koji se ponekad naziva MPEG-4 Part 10 ili AVC, potpuno je promijenio način na koji se video podacima rukuje, kodira, prenosi i dekodira. Želja za većom kvalitetom video materijala putem višestrukih komunikacijskih kanala, kao što su internet, emitiranje i multimedijske aplikacije, potaknula je razvoj H.264. Tradicionalne tehnologije kompresije kao što su MPEG-2 i prethodne iteracije MPEG-4 teško su mogle podnijeti sve veću potražnju za učinkovitom kompresijom uz očuvanje prihvatljive perceptivne kvalitete. Uvođenjem nove generacije tehnika kompresije, koje su dramatično povećale učinkovitost kompresije i kvalitetu videa, H.264 je stvoren za rješavanje ovih problema.

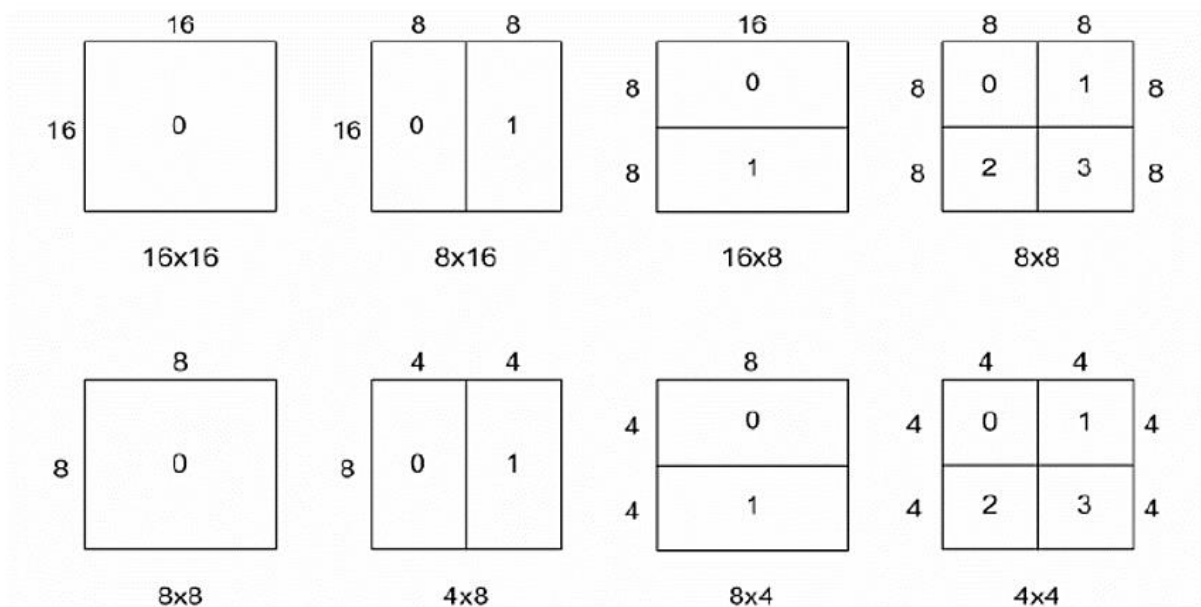
Pod službenim nazivima ITU-T H.264 i ISO/IEC 14496-10 AVC, standard H.264 zajednički su razvili International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) i International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC) Joint Technical Committee 1 (JTC 1). Koordinirani naponi osigurali su široku primjenu standarda u različitim primjenama i sektorima [10].

H.264 (AVC) je standardiziran već davne 2003. godine te je od tog razdoblja osigurao nekoliko noviteta smislu podrške za video na mobitelima, računalima, internetu i televizijama visoke definicije. Također, prvi standard iz H.26x obitelji zvao se H.261 te je bio standardiziran 1988. godine. H.262 je postao njegov nasljednik i standardiziran je 1996. godine. Nakon spomenutih standarda uslijedili su njihovi nasljednici: H.263 (standardiziran 1996. godine) te njegova inačica H.263+ (standardiziran 1998. godine). H.264 postao je jedan od najpopularnijih kodeka na tržištu te je predstavio poboljšanja u odnosu na H.263 standard.

5.1. Značajke i alati norme H.264 (AVC)

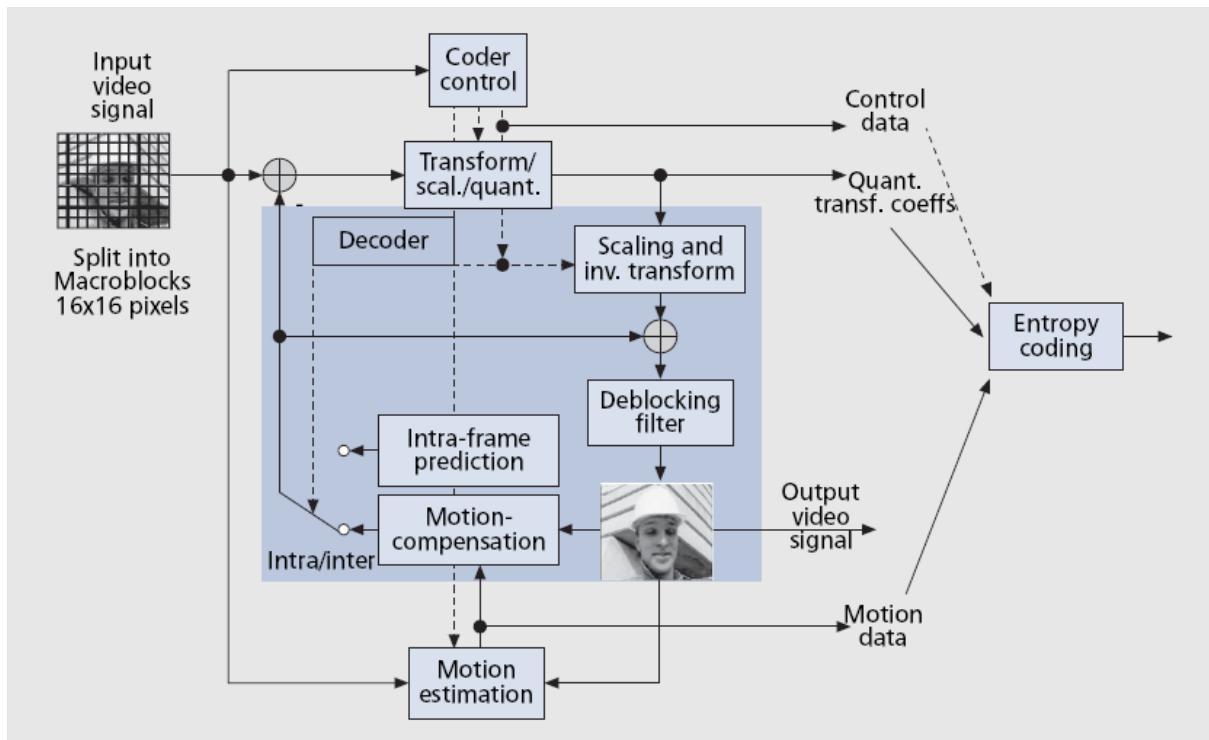
H.264 postiže od 30% do 50% bolju kompresiju od svog prethodnika za istu kvalitetu slike uz poboljšanu otpornost na pogreške u prijenosu. H.264 kodiranje temelji se na podjeli

slike na makroblokove koji su obično veličine 16x16. Makroblokovi su djelovi odsječka (engl. *slice*) gdje se slice definiran kao dio slike. Makroblokovi imaju dva bloka za krominantne signale i jedan blok za luminantni signal, a varijacije veličine blokova prikazane su na slici 10. Korištenjem raznih profila koji nudi H.264 standard omogućuje se prilagođeno kodiranje za mnoge aplikacije poput mobilnih uređaja i televizija visoke definicije. H.264 podržava sljedeće formate boje 4:2:0, 4:2:2, 4:4:4 s 8 ili više bitova po kanalu kao i monokromatsku sliku. AVC standard koristi nekoliko alata za kodiranje. Neki od alata su cjelobrojna transformacija, predviđanje za unutarokvirno kodiranje, filter za uklanjanje efekta bloka unutar petlje za predviđanje, entropijsko kodiranje CAVLC (engl. *Context Adaptive Variable Length Coding*) i CABAC (engl. *Context Adaptive Binary Arithmetic Coding*). Uz navedene alate za kodiranje, a koje ujedno nasljeđuje i HEVC norma, postoji još nekoliko alata za proračun predikcije i pokreta.



Slika 10. Veličine blokova u H.264 normi [11]

CAVLC je metoda entropijskog kodiranja koja koristi kodove promjenjive duljine. Nije računalno zahtjevan u usporedbi s CABAC-om. S druge strane, CABAC je naprednija tehnika entropijskog kodiranja koja koristi fiksne duljine koda. CABAC je uglavnom uspješniji u smislu kompresije u usporedbi s CAVLC-om, međutim računalno je zahtjevniji u procesima kodiranja i dekodiranja. Shema AVC koda prikazana je sljedećoj slici.



Slika 11. H.264/AVC koder [12]

Na slici 11. prikazani su neki od najvažnijih blokova, to su: unutarokvira predikcija, procjena i kompenzacija pokreta, skaliranje i kvantizacija, cjelobrojna transformacija i entropijsko kodiranje. Inverzna transformacija i kvantizacija kao i deblokirajući filter koriste se u svrhu međuokvirnog kodiranja. Prema prikazanoj shemi, tok podataka koji nastupa s lijeva na desno predstavlja tok kodiranja dok obrnuti redoslijed procesa predstavlja tok rekonstrukcije. Na ulazu kodera vrši se usporedba dovedene trenutne slike i prethodne (referentne) slike, tj. predikcija. Na izlazu kodera se dobije makroblok predikcije koji se uspoređuje s trenutnim makroblokom i na taj način se vrši usporedba za cijelu sliku. Rezultati koji su nastali usporedbom dalje idu blok za transformaciju i frekvencijsku transformaciju. Da bi se na izlazu kodera dobio tok podataka koji odgovara slici, koeficijenti transformacije koji su nastali u prethodnom koraku moraju se proslijediti sustavu za entropijsko kodiranje.

5.1.2. Cjelobrojna transformacija, skaliranje i kvantizacija

S obzirom da DCT (engl. *Discrete Cosine Transformation*) ima nekoliko nedostataka koji umanjuju unaprjeđenja H.264 norme zamjenjuje se s cjelobrojnom transformacijom. H.264 dakle koristi cjelobrojnu transformaciju koja je ključni korak u procesu video kompresije

AVC standarda. Primarni nedostatak DCT-a u prethodnim normama stvarao je nekoliko pogreški koje je dovelo do pomaka predikcije. Razlog tome je bio zaokruživanje decimalnih brojeva kod operacija množenja. Također jedan od nedostataka je bila potreba za što većom procesorskom snagom kako bi se uspješno izvršile mnogobrojne operacije množenja decimalnih brojeva. U procesima kodiranja blokova kod H.264 norme uporaba cjelobrojne transformacije eliminira pogreške koje bi nastale upotrebom DCT od kojih su najveće uzastopno zaokruživanje decimalnih brojeva koje se nakupljaju te se u konačnici pretvaraju u još veće pogreške. Cjelobrojnom transformacijom ostvaruje se pretvaranje vrijednosti piksela rezidualnih blokova u koeficijente frekvencijska područja (domene). Rezidualni blok definiran je kao razlika između stvarnih vrijednosti piksela i predviđenih vrijednosti piksela. Tako dobiveni koeficijenti mogu se uspješnije sažimati. H.264 standard koristi cjelobrojnu transformaciju na blokove veličine 4x4 i 8x8 sa sličnim svojstvima kao DCT. Blok piksela 4x4 biti će podijeljen na manje podblokove 4x4 gdje svaki podblok prolazi zasebnu transformaciju. To znači da će se primjenom matematičkih operacija na vrijednosti piksela podbloka dobiti skup koeficijenata koji će imati frekvencijsku komponentu. Uglavnom koeficijenti niže frekvencije imaju više vrijednosti od koeficijenata više frekvencije. Cjelobrojna transformacija radi identičan proces i na blokovima veličine 8x8.

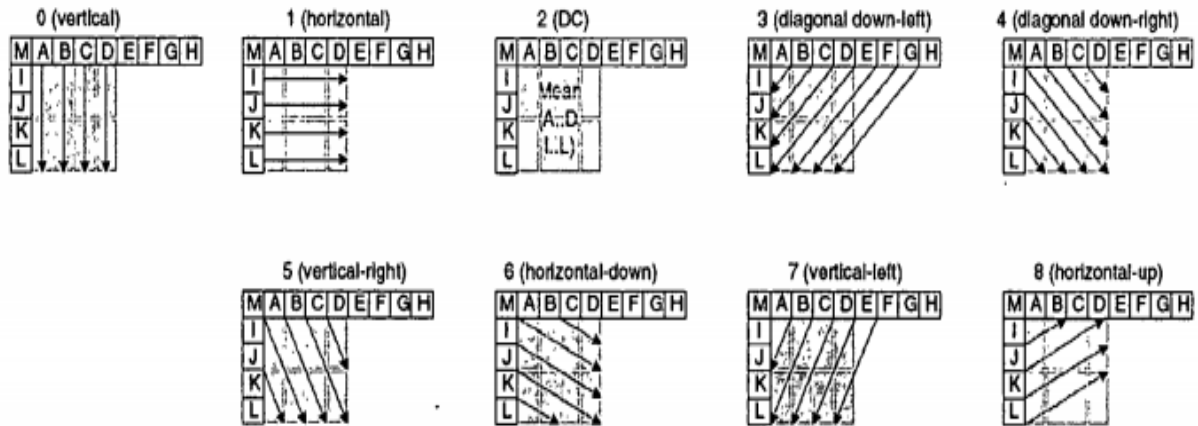
Nakon izvršene cjelobrojne transformacije slijedi priprema za proces kvantizacije kojeg zovemo skaliranje. Transformirani koeficijenti mogu poprimiti velike vrijednosti nakon postupka cjelobrojne transformacije pa ih je potrebno skalirati. Skaliranjem se smanjuje njihov dinamički raspon što ih čini prikladnijim za kvantizaciju. Svaki koeficijent skaliran je (podijeljen) s faktorom skaliranja koji se dobiva iz matrice transformacije. Ovim postupkom osiguran je prihvatljiv raspon koeficijenata kao i smanjene dubine bita za njihov prikaz.

Proces kvantizacije uključuje dijeljenje skaliranih koeficijenata s parametrima kvantizacije. Parametri kvantizacije su zapravo veličine koraka kvantizacije. Što je korak kvantizacije veći to je kvantizacija agresivnija što dovodi do veće kompresije.

5.1.3. Unutarokvirno predviđanje

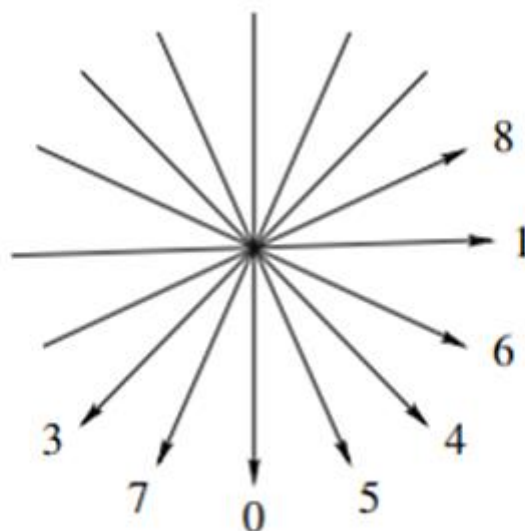
H.264 iskorištava činjenicu da uzorci u obližnjim makroblokovima obično imaju iste vrijednosti za izvođenje intra predviđanja. Postoje dvije vrste procesa intra predviđanja: intra 4x4 i intra 16x16. U intra 4x4 tipu, 16x16 makroblok je podijeljen u 16 4x4 blokova. Zatim, svaki 4x4 blok u trenutnom makrobloku podvrgava se svim dostupnim 9-intra načinima

predviđanja. Na slici 12. može se vidjeti devet načina unutarnjeg predviđanja za AVC proces unutarnjeg predviđanja.



Slika 12. intra 4x4 tip - 9 načina predviđanja (luma) [13]

Također u tablici 1. objašnjeni su smjerovi 9 načina predviđanja za H.264 proces, dok su na slici 13. prikazani smjerovi predikcije u intra 4x4 gdje svaki broj smjera označava pripadni mod.



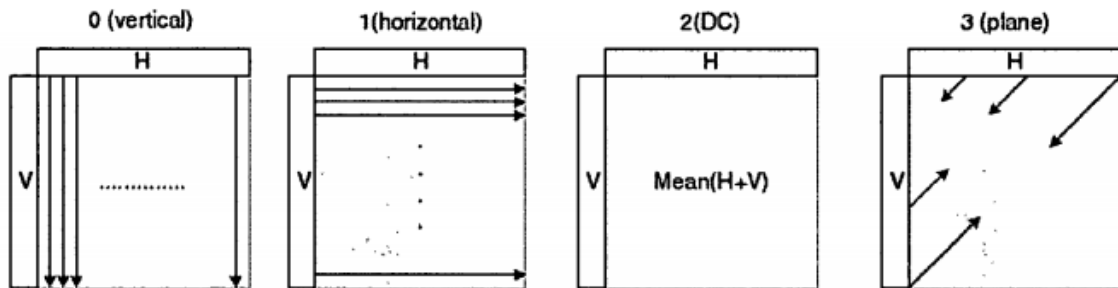
Slika 13. Smjerovi predikcije intra 4x4 s pripadajućim modovima [8]

Tablica 1. Modovi predikcije intra 4x4 [13]

Modovi predikcije	Ime moda	Opis moda
Mod 0	Vertikalni	Gornji uzorci se ekstrapoliraju okomito
Mod 1	Horizontalni	Lijevi uzorci su ekstrapolirani vodoravno
Mod 2	DC	Svi uzorci su predviđeni pomoću gornjih i lijevih uzoraka
Mod 3	Dijagonalni dolje-lijevo	Uzorci su interpolirani pod kutom od 45 stupnjeva između donjeg lijevog i gornjeg desnog dijela
Mod 4	Dijagonalni dolje-desno	Uzorci se ekstrapoliraju pod kutom od 45 stupnjeva prema dolje i udesno
Mod 5	Vertikalni-desni	Ekstrapolacija pod kutom od približno 26,6 stupnjeva desno od vertikale (širina/visina=1/2)
Mod 6	Horizontalni-dolje	Ekstrapolacija pod kutom od približno 26,6 stupnjeva ispod horizontale
Mod7	Vertikalni-lijevi	Ekstrapolacija (ili interpolacija) pod kutom od približno 26,6 stupnjeva lijevo od okomice
Mod 8	Horizontalni-gore	Interpolacija pod kutom od približno 26,6 stupnjeva iznad horizontale

U intra 16x16 tipu, četiri moda navedena u tablici 2. se izravno primjenjuju na 16x16 piksela. Kroma komponenta makrobloka uvijek se predviđa koristeći isti način predviđanja kao luma

komponenta. Intra predviđanje preko granice odsječka nije dopušteno kako bi svi odsječci ostali neovisni jedan o drugom. Intra 16x16 koristi se za ujednačenije područje slike, dok se intra 4x4 koristi za gušće područje slike. Na slici 14. prikazani su intra 16x16 modovi predikcije.



Slika 14. Modovi predikcije 16x16 [13]

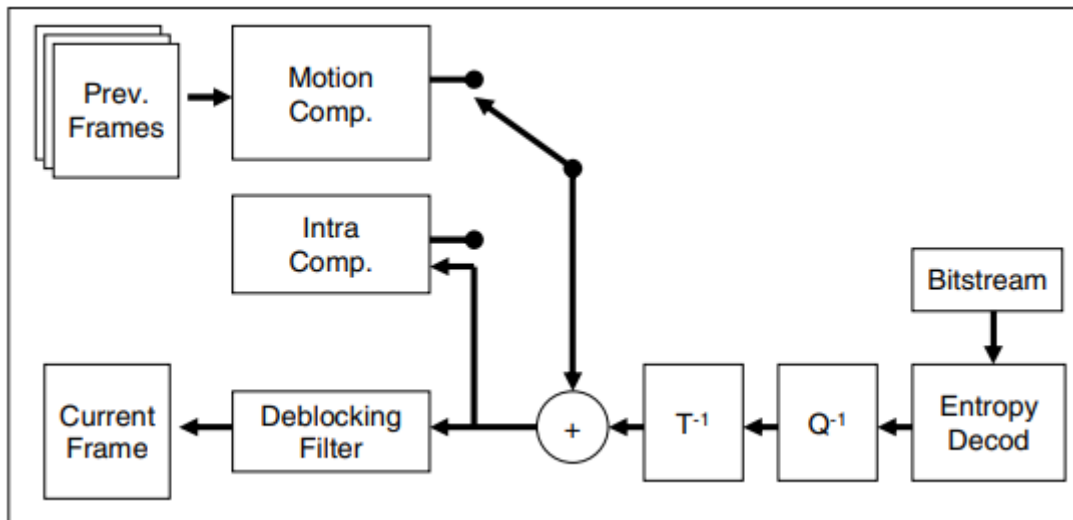
Tablica 2. Modovi predikcije intra 16x16 [13]

Modovi predikcije	Ime moda	Opis moda
Mod 0	Vertikalni	Gornji uzorci se ekstrapoliraju okomito
Mod 1	Horizontalni	Lijevi uzorci su ekstrapolirani vodoravno
Mod 2	DC	Svi uzorci su predviđeni pomoću gornjeg i lijevog uzorka
Mod 3	Planarni	Funkcija linearne ravnine primjenjuje se na gornje i lijeve uzorke H i V. Ovo dobro funkcionira u područjima glatko promjenjivog osvjetljenja

5.1.4. Filtar za uklanjanje efekta bloka unutar petlje

Standard H.264 uključuje prilagodljivi filtar za deblokiranje kako bi se minimalizirali artefakti vidljivosti bloka, koji su vrlo česti u iznimno komprimiranim video tokovima. Zapravo, većina video kodeka koristi filtriranje kao korak prije i naknadne obrade. Primarni

razlog za uključivanje ove vrste filtra u standard bio je njegovo uključivanje u povratnu petlju tijekom procesa kodiranja. Kao rezultat toga, bilo je moguće stvoriti filtar unutar petlje kodiranja koji je standardiziran, fino podešen i proizvodio poboljšanu objektivnu i subjektivnu kvalitetu slike pri istoj brzini prijenosa. Prema slici 15. za dekodirer, H.264 filtar za deblokiranje nalazi se unutar DPCM petlje; zbog toga je također poznat kao Loop Filter.



Slika 15. H.264 dekodirer [35]

Filtar za deblokiranje standarda H.264 sastoji se od kompliciranog algoritma odlučivanja i procesa filtriranja s pet različitih snaga filtera, umjesto samo jednog niskopropusnog filtera. Cilj mu je očuvati jasnoću izvornih slika uz uklanjanje artefakata unutar okvira i između okvira koje stvaraju pri niskim brzinama prijenosa i smanjenjem prepoznatljivog utjecaja "zamućenja" filtra pri visokim brzinama prijenosa. H.264 filtar za deblokiranje odgovoran je za otprilike jednu trećinu procesorske snage potrebne u procesu dekodiranja.

Slike se dijele na manje dijelove za kodiranje tijekom video kompresije. Margina između dva susjedna bloka na slici naziva se granica bloka. Slika je npr. podijeljena u blokove 8x8 piksela, u slučaju kompresije 8x8 temeljene na blokovima. Granicama blokova možemo nazvati mjesta se takvi manji blokovi susreću. Kad je riječ o predikvitno kodiranim okvirima (P okviri), p granica (često nazivana i primarna granica) odnosi se na granicu između dva makrobloka koji imaju različite vektore pomaka. Poznato je da u P okvirima susjedni

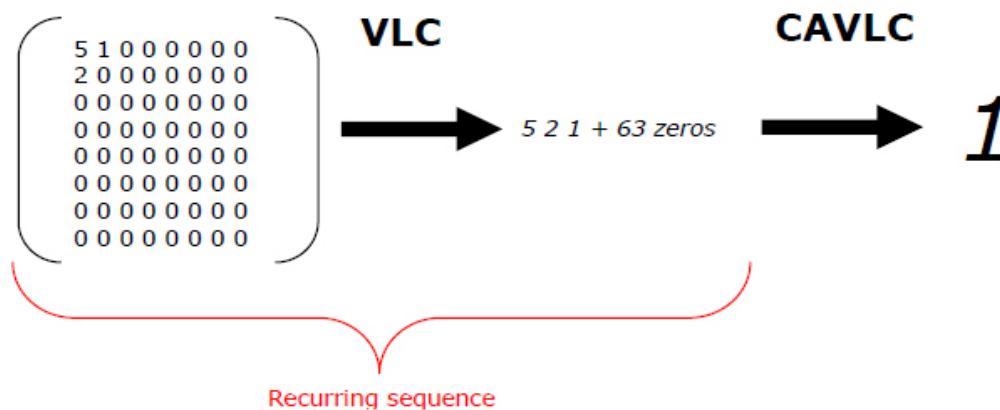
makroblokovi mogu imati različite vektore pokreta pa je detektiranje p granica ključno za ispravnu kompenzaciju pokreta. Također postoje i q granice koje se nazivaju i sekundarne granice. One su značajne unutar makroblokova i označavaju mjesto gdje se susreću dva bloka (8x8). Unutar deblokirajućeg filtra q granice su od velikog značaja jer filter za cilj ima ublažiti artefakte koji nastaju zbog naglih promjena na tim granicama.

5.1.5. Entropijsko kodiranje

Entropijsko kodiranje je sljedeća faza u blokovskom kodiranju. Podaci su sada spremni za prijenos na način koji omogućuje dekoderu da ih rekonstruira u cijelosti. Također se naziva i kodiranje bez gubitaka. Koder promjenjive duljine (VLC), koji se koristi za entropijsko kodiranje, smanjuje brzinu prijenosa podataka identificirajući uzorke podataka koji se često pojavljuju i zamjenjujući ih za kraće upute ili kodne riječi.

Svaku vrijednost u kvantiziranoj transformacijskoj matrici VLC šalje dekoderu. CAVLC i CABAC dva su oblika VLC-a koje H.264 nudi kao alternativu, a koji su složenije i naprednije alternative entropijskog koda. Dok CABAC samo sažima podatke u kodne riječi za dekoder, CAVLC to radi samo za kvantizirane koeficijente transformacije.

Unatoč činjenici da podižu potrebnu procesorsku snagu, H.264 VLC u konačnici poboljšavaju učinkovitost protoka redundantnih podataka. CAVLC i CABAC snižavaju brzinu prijenosa tako što se navikavaju na opetovano primljene nizove podataka. Stoga je odluka kako i kada koristiti određeni VLC jednostavno još jedan problem s kojim se H.264 inženjeri suočavaju. Primjer tome je ako entropijski koder primi uzorke podataka koji se ponavljaju, zamjenjuje ih kodnom riječi, poput 1. Međutim, druge sekvence tada treba opisati bez upotrebe 1. To ponekad može dovesti do dužih kodnih riječi u jedinstvenim tokovima podataka.



Slika 16. Pretvaranje podataka koji se ponavljaju u kodne riječi u enkoderu [14]

5.1.6. H.264 profili

H.264 je vrlo prilagodljiv standard kompresije videa koji se može primijeniti u različitim situacijama. Standard navodi niz različitih profila kako bi se zajamčila kompatibilnost u različitim aplikacijama. Svaki H.264 profil zbirka je jedinstvenih ograničenja i značajki koje se primjenjuju prilikom kodiranja videa. Profili su izrađeni tako da ciljaju različite uređaje, poput mobilnih telefona ili vrhunskih televizora, kao i različite slučajeve upotrebe, poput videa niske propusnosti ili visoke razlučivosti. Glavni profili definirani u H.264 su [15]:

- Osnovni profil ili BP (engl. *Base profile*): Ovaj je profil namijenjen jednostavnim aplikacijama kao što su video konferencije i prijenosna elektronika. Ne podržava kompresiju između okvira ili B-okvire; koristi samo kompresiju unutar okvira.
- Glavni profil ili MP (engl. *Main Profile*): Ovaj profil podržava kompresiju između okvira i B-okvira i namijenjen je video aplikacijama standardne razlučivosti. Dodatno, ima sustav kompenzacije pokreta koji je sofisticiraniji od profila BP.
- Visoki profil ili HiP (engl. *High Profile*): Ovaj profil podržava sve karakteristike glavnog profila uz dodatne značajke uključujući 8x8 intra predviđanje i 4x4 transformacijske blokove. Stvoren je za video aplikacije visoke razlučivosti.
- High 10 Profile (Hi10P): Ovaj je profil sličan High profilu, ali podržava 10-bitnu dubinu boje.
- Visoki 4:2:2 profil (Hi422P): Profil koji je vrlo sličan High profilu, ali podržava 4:2:2 kromatsko uzorkovanje.

- Visoki 4:4:4 prediktivni profil (Hi444PP): profil koji je vrlo sličan visokom profilu, ali podržava 4:4:4 uzorkovanje boje i koristi naprednije metode predviđanja za informacije o boji.

Odabir profila koji ćete koristiti temelji se na posebnim zahtjevima aplikacije ili uređaja jer svaki profil ima vlastiti skup značajki i ograničenja.

6. H.265 (HEVC) STANDARD ZA KOMPRESIJU VIDEOA

H.265/HEVC (engl. *High Efficiency Video Coding*) nasljednik je H.264 standarda odnosno najnoviji je standard video kompresije. Standardiziran je početkom 2013. godine te je razvijen od već spomenutih JCT-VC (engl. *Joint Collaborative Team on Video Coding*). Kao nasljednik standarda H.264 sastoji se od bazične strukture s pripadajućim alatima kao svoj prethodnik, ali uz nekoliko poboljšanja. Neka od njih su podrška za ultra HD (engl. *High Definition*) video sadržaje pa čak i 8k rezolucije s maksimumom od 120 FPS (engl. *Frames per second*). Predikcija koju je koristio H.264 standard s makroblokovima unaprijeđena je s jedinicom stabla za kodiranje (engl. *CTU – Coding Tree Unit*) koje su veće od makroblokova. U procesima s videima visoke rezolucije nastojala se omogućiti veća kompresija pa tako veličina CTU seže do 64x64 piksela.

Da se zaključiti da je CTU ključna ideja u H.265 standardu. U svrhu kodiranja i dekodiranja, odnosi se na pravokutni dio video okvira koji je podijeljen u manje blokove poznate kao jedinice kodiranja (engl. *CU – Coding Unit*). Složenost video sadržaja i željeni kompromis između učinkovitosti kompresije i poteškoća dekodiranja uzimaju se u obzir pri određivanju CTU veličine. Može se reći da HEVC standard u prosjeku nudi 25% do 50% bolju učinkovitost kompresije od svog prethodnika. Za potrebe kodiranja i dekodiranja videa, H.265 CTU-ovi pružaju hijerarhijsku strukturu, pri čemu se veći CTU-ovi dijele na manje CU-ove prema potrebi. Kako bi se povećala brzina dekodiranja, CTU-ovi se također koriste za paralelnu obradu, gdje se nekoliko CTU-ova obrađuje odjednom.

6.1. Značajke i alati norme H.265 (HEVC)

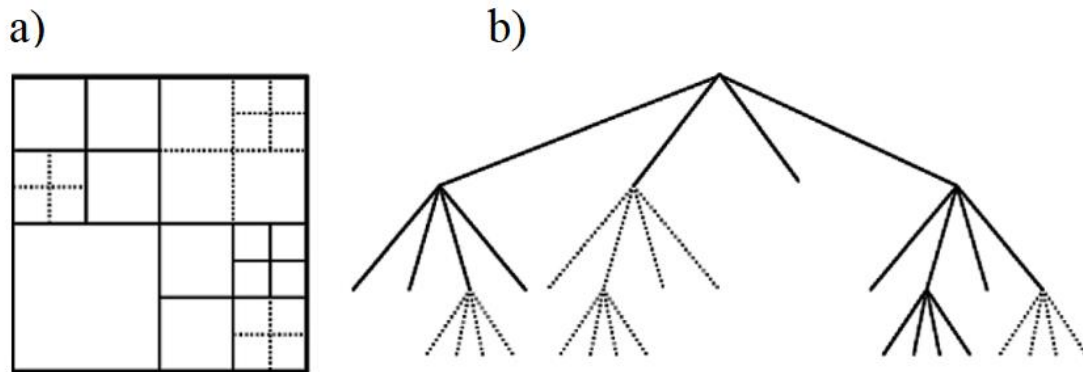
H.265 norma nasljeđuje alate norme H.264 uz nekoliko poboljšanja. Alati za poboljšanje kodiranja norme su sljedeći: kompenzacija pokreta, paralelna obrada, cjelobrojna transformacija, unutarokvirno predviđanje, diskretna sinusna transformacija, deblokirajući filter, pomak prilagodljiv uzorku, entropijsko kodiranje, četverostablasta hijerarhija blokova itd. Navedeni alati biti će opisani u ovom poglavlju.

6.1.2. CTU struktura

Prije nego li se opišu alati norme kao i njezina poboljšanja potrebno je raščlaniti svaku hijerarhijsku jedinicu HEVC norme:

- CTU (engl. *Coding Tree Unit*): Najveća kodna jedinica u HEVC-u zove se CTU. Koristi se za odvajanje okvira u dijelove koji se ne preklapaju i može sadržavati nekoliko jedinica kodiranja (CU).
- CTB (engl. *Coding Tree Block*): CTB je manja jedinica koja se koristi u nekoliko HEVC standardnih alata kao što je struktura paralelne obrade. Predstavlja blok stabla za kodiranje.
- CU (engl. *Coding Unit*): Koristi se za pristupe predviđanja kao što je kompenzacija pokreta. CU je kvadratni ili pravokutni blok te predstavlja jedinicu za kodiranje.
- CB (engl. *Chroma Block*): Podjedinica CU-a koja sadrži informacije o boji.
- PU (engl. *Prediction Unit*): Particija unutar CU-a s informacijama za korištenje predviđanja
- PB (engl. *Prediction Block*): Particija unutar PU koja predstavlja vrijednosti piksela
- TU (engl. *Transform Unit*): CU ili PU podjedinica, nositelj koeficijenata transformacije.

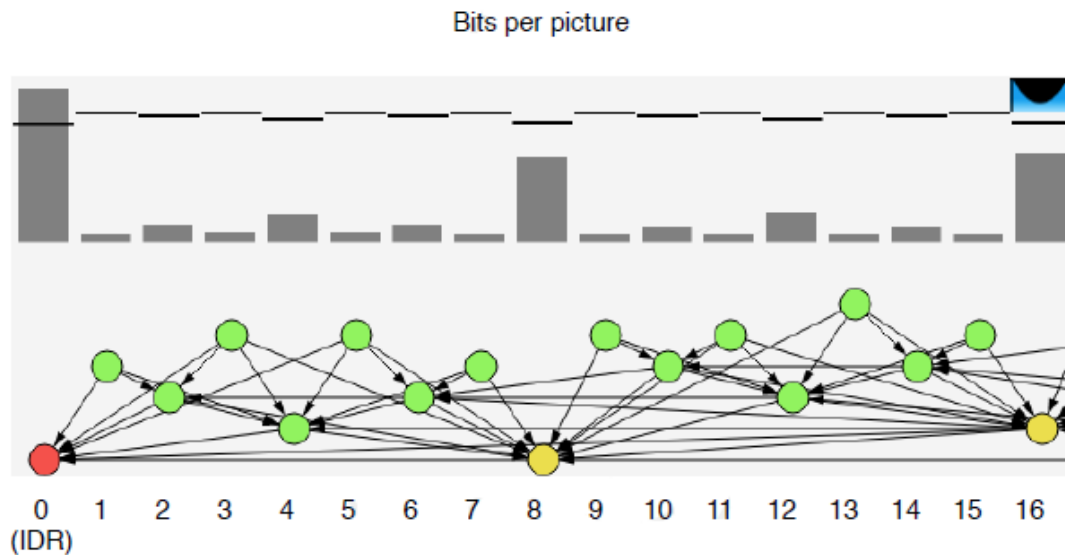
Na slici 17.a) prikazana je podjela CTB-a na CB-ove kao i transformacijski blok (TB-ovi). Pune linije predstavljaju granice CB, a isprekidane linije granice TB. Nadalje, slika 17.b) prikazuje pripadajuće četverostablo [16].



Slika 17. Strukturalna podjela u H.265 [16]

6.1.3. Kompenzacija pokreta

CTU kao bazna osnova strukturalne hijerarhije sastoji se od 1 CTB luminantne i 2 CTB krominantne komponente. Luminantna komponenta CTB-a poprima jednu od dimenzija 16x16, 32x32 ili 64x64 dok krominantni CTB-ovi imaju četvrtinu spomenutih dimenzija. CTB se dalje može dijeliti na manje jedinice, CU-ove, koji imaju 1 luma CB dimenzije 8x8 i 2 kroma CB-a dimenzije 4x4. Kako je već hijerarhijski navedeno, CB-ovi se dalje dijele na PU-ove koji su bitni u procesu unutarokvirnog ili međuokvirnog predviđanja. PU također sadrži pripadajuće luma i kroma PB-ove te ih koristi kod jednog od dva predviđanja. Da bi se osiguralo da svaka jedinica PB-ova radi u različitom modu predikcije, kod dimenzija CB-ova 8x8 moguće je dijeljenje u 4 PB-a, ako je riječ o unutarokvirnom predviđanju. Inače dimenzije kod PB-ova je ista kao i kod CB-ova. S druge strane, kod međuokvirnog predviđanja CB-ovi se dijele na jedan, dva ili četiri PB-a. Razlog tome je što PB-ovi moraju biti pravokutni a ne kvadratni. Na kraju TU-ovi služe za obavljanje transformacijskog kodiranja okvira razlike gdje jedan TU sadrži kroma i luma TB-ove. TB-ovi mogu ići preko granica PB-ova u međuokvirnom predviđanju. CB je obično dimenzija od 4x4 do 32x32.



Slika 18. Sekvenca kodiranih video okvira [17]

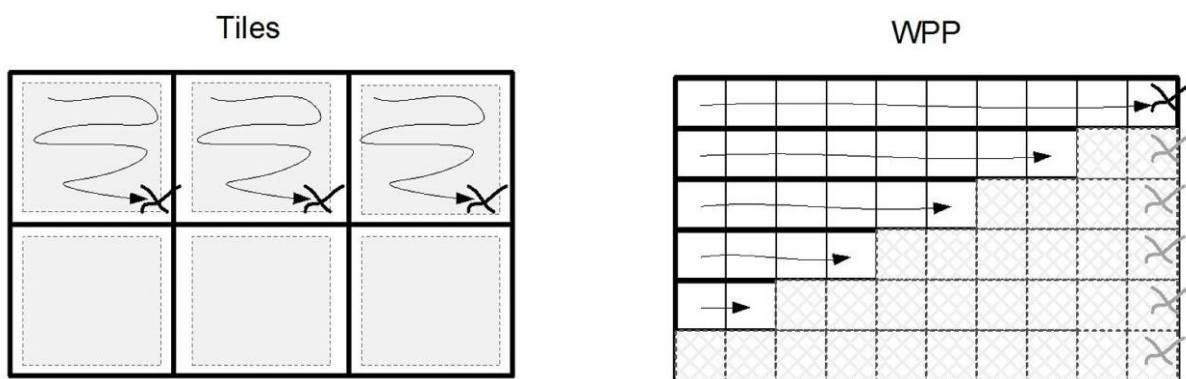
Na slici 18. prikazan je niz kodiranih video okvira ili slika. Intra predviđanjem kodirana je prva slika(0) korištenjem prostornog predviđanja iz drugih područja iste slike. U nastavku, sljedeće slike predviđene su jedne ili više referentnih slika koristeći inter ili intra predviđanje za svaku jedinicu predviđanja odnosno PU. Na slici su također strelicama označeni izvori predviđanja za svaku sliku [17].

6.1.4. Paralelna obrada

HEVC koristi paralelnu obradu, što podrazumijeva rastavljanje postupka kompresije i dekodiranja videa na manje, neovisne jedinice kojima istovremeno može upravljati nekoliko procesorskih jedinica. Ova metoda koristi suvremene višejezgrene procesore i paralelne arhitekture za povećanje učinkovitosti i brzine. Dvije metode s kojima se postiže paralelna obrada su paralelna obrada valnog fronta (engl. *Wavefront Parallel Processing -WPP*) i pločice (engl. *Tiles*). Ove metode omogućuju učinkovitu podjelu opterećenja kodiranja i dekodiranja između nekoliko procesorskih jezgri.

Paralelna obrada valne fronte razdvaja sliku u vodoravno poravnate trake poznate kao valne fronte. Jedan ili više blokova stabla kodiranja (CTB) mogu se pronaći u svakoj valnoj fronti. Slično načinu na koji se slike skeniraju u televizijskim sustavima, valne fronte se obrađuju u rasterskom redosljedu skeniranja. Jezgra za obradu pojedinačno kodira i dekodira svaku valnu frontu. Ova metoda eliminira potrebu za složenom sinkronizacijom obrade jer se svaka valna fronta tretira zasebno.

Metoda pločica radi na principu da je slika podijeljena na pravokutne "pločice" od kojih se svaka može zasebno kodirati ili dekodirati. Za razliku od WPP-a, pločice se mogu obrađivati bilo kojim redosljedom, pružajući veću fleksibilnost u korištenju resursa za obradu. Budući da pogreške u jednoj pločici ne utječu uvijek na dekodiranje drugih pločica, pločice također omogućuju učinkovitiji oporavak od pogreške. Na slici 19. prikazani su valni frontovi kao i pločice.



Slika 19. Pločice i valni frontovi [34]

6.1.5. Cjelobrojna transformacija

HEVC koristi transformirano kodiranje ostatka pogreške predviđanja na sličan način kao u prethodnim standardima. Preostali blok je podijeljen na više kvadratnih TB-ova. Podržane veličine transformacijskih blokova su 4×4 , 8×8 , 16×16 i 32×32 . Osnovne funkcije transformacije izvedene su iz DCT-a. Transformacija je definirana kao 32×32 matrica osnovnih funkcija, a manje veličine transformacije dobivene su poduzorkovanjem ove veće matrice. Na primjer, matrica 16×16 izvedena je iz matrice 32×32 uzimanjem prvih 16 vrijednosti iz redaka

0, 2, 4 itd. Slično poduzorkovanje koristi se za izradu matrica 8x8 i 4x4. Ponekad je potrebna uporaba 7-bitnog desnog pomaka kako bi se umanjio dinamički raspon rezultata u slučajevima kad magnitude koeficijenata pređu 16-bitnu memoriju.

6.1.6. Unutarokvirno predviđanje

Kako bi se predvidio novi blok predviđanja PB, unutarokvirno predviđanje slike koristi prethodno dekodirane granične uzorke iz prostorno susjednih blokova. Stoga se samo predviđanje unutar slike koristi za kodiranje početnog okvira video sekvence i prve slike na svakoj čistoj nasumičnoj pristupnoj točki u video sekvenci. Modul međuokvirnog predviđanja HEVC-a ima je brojna poboljšanja:

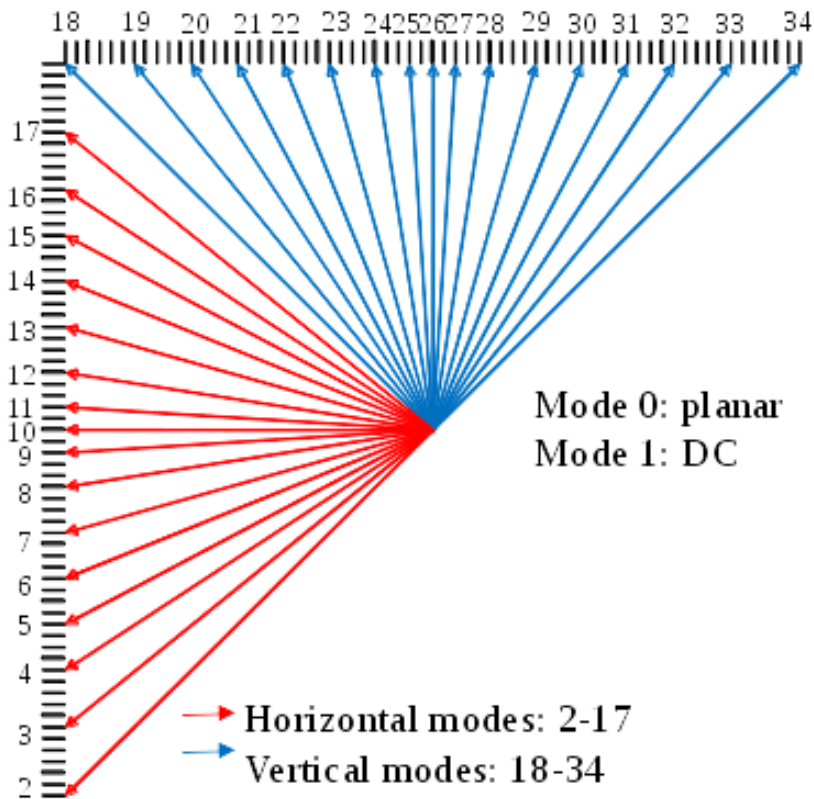
- 1) Raspon podržanih veličina blokova kodiranja je proširen.
- 2) Poželjno je imati planarni mod koji osigurava kontinuitet na granicama blokova.
- 3) Sada je dostupno više smjerova predikcije (35)

HEVC koristi 35 različitih intra modova za predviđanje PB: 33 kutna moda, planarni mod i DC mod. Tablica 3. prikazuje nazive modova s odgovarajućim indeksom modova unutarnjeg predviđanja.

3. Intra predikcijski modovi

Ime intra predikcijskog moda	Indeks moda
Planarni mod	Mod 0
DC mod	Mod 1
Angular mod	Mod 2 do 34

Sljedeća slika 20. prikazuje 33 načina predviđanja smjera HEVC-a, mod 2 do 34. Svaki od 1/8 kvadranta sadrži 8 smjerova predviđanja, a njihovi odgovarajući parametri pomaka su 2, 5, 9, 13, 17, 21, 26, 32. Fizičko značenje ovih parametara pomaka je tangens predviđenog kuta, tj. $2/32$, $5/32$, $9/32$, $13/32$, $17/32$, $21/32$, $26/32$, $32/32$. Na primjer, $32/32$ predstavlja smjer predviđanja od 45° (vrijednost tangensa je 1). Prema tangensu kuta, može se vidjeti da HEVC koristi točnost predviđanja od 1/32 piksela preciznosti.



Slika 20. Smjerovi predikcije HEVC [33]

Na primjer, V+2 označava smjer predviđanja s parametrom pomaka +2 u okomitom smjeru. Iz ovih parametara pomaka može se vidjeti da je kutna raspodjela u blizini vodoravnog i okomitog smjera gušća, a raspodjela kutova u blizini dijagonalnog smjera relativno rijetka. Razlog ovog kriterija dizajna je taj što je u konvencionalnom videu i slikama vjerojatnost pojavljivanja uzoraka blizu vodoravnog i okomitog smjera relativno visoka, a vjerojatnost pojavljivanja uzoraka blizu dijagonale je relativno niska.

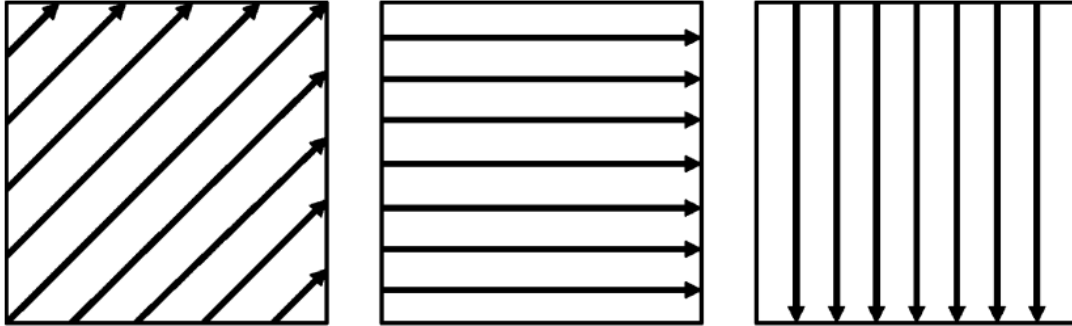
6.1.7. Filtar za uklanjanje efekta bloka unutar petlje

Osim kada je granica ujedno i granica slike ili kada je deblokiranje onemogućeno preko granica isječaka ili pločica (što je opcija koju može signalizirati koder), filtar za deblokiranje primjenjuje se na sve uzorke uz granice PU ili TU. Treba naglasiti da se u obzir trebaju uzeti i granice PU i TU jer u nekim slučajevima CB-ova predviđenih među slikom, granice PU nisu uvijek usklađene s granicama TU.

Filtar za deblokiranje primjenjuje se samo na rubove koji su poravnati na mreži od 8x8 uzoraka, i za luma i za chroma uzorke, za razliku od H.264 koji filtar za deblokiranje primjenjuje na uzorak od 4x4. Bez vidljivog gubitka vizualne kvalitete, ovo ograničenje smanjuje složenost računanja. Izbjegavanjem kaskadnih interakcija između susjednih operacija filtriranja poboljšava se performansa paralelne obrade. Snaga filtra za deblokiranje je kontrolirana te se koristi samo tri snage (od 0 do 2) umjesto pet. S obzirom da su P i Q dva susjedna bloka sa zajedničkom granicom mreže 8x8, snaga filtra 2 dodjeljuje se kada je jedan od blokova predviđen unutar slike.

6.1.8. Entropijsko kodiranje

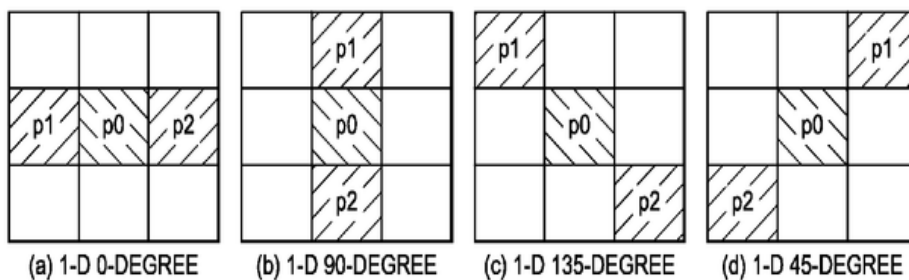
HEVC specificira samo jednu metodu entropijskog kodiranja a to je CABAC, umjesto dvije kao u H.264. Pravilan odabir kontekstnog modeliranja ključno je unaprjeđenje kao i prilagođavanje CABAC-a HEVC-ovoj stablastoj strukturi kodiranja. Na temelju konteksta, koji je kombinacija prethodno kodiranih simbola i drugih kontekstualnih informacija, vjerojatnosti simbola se modificiraju. Kao rezultat toga, simboli su kodirani učinkovitije i dobivaju kraće kodove kada se često pojavljuju. Također koriste se tri metode skeniranja koeficijenata. Skeniranje koeficijenata izvodi se u podblokovima 4x4 za sve veličine TB. Tri spomenute metode skeniranja koeficijenata su: dijagonalno gore-desno, vodoravno i okomito skeniranje kao što je prikazano na slici 21.



Slika 21. Tri metode skeniranja koeficijenata u HEVC-u [16]

6.1.9. Pomak prilagodljiv uzorku

Pomak prilagodljiv uzorku (SAO) je filtar u petlji koji se koristi u HEVC standardu za poboljšanje ukupne kvalitete rekonstruiranih slika. Posebno korišteno za poboljšanje oštrote rubova, SAO (engl. *Sample Adaptive Offset*) filtriranje je nelinearna tehnika koja dodatno smanjuje pogrešku rekonstrukcije koju mnogi linearni filtri ne postižu. Nakon deblokirajućeg filtra koristi se SAO. SAO odvaja sliku u odjeljke usklađene s CTU-om kako bi dobio lokalne statističke podatke jer značajke slike mogu varirati ovisno o tome gdje se nalazi. Tako će postojati jedinstveni SAO parametri u svakom CTU-u. SAO klasa CTU-a može biti pomicanje pojasa (engl. *Band Offset*), pomicanje ruba (engl. *Edge Offset*) ili isključen (što ukazuje da se SAO ne primjenjuje na trenutni CTU). Intenziteti piksela za BO podijeljeni su na 32 fiksna pojasa. Kod BO klase uspoređuje se trenutni uzorak s dva susjedna uzorka. To se obavlja pomoću četiri smjera prijelaza (vertikalni, horizontalni i dva dijagonalna smjera) koji su prikazani na slici 22. Nakon rezultata usporedbe primjenjuju se pozitivan/negativan pomak ili se pomak uopće ne primjenjuje ovisno o rezultatu usporedbe.



Slika 22. Usporedba uzoraka SAO tehnike

7. USPOREDBA AVC i HEVC STANDARDA

H.264 se smatra zrelim standardom i naširoko se koristi za razne aplikacije u stvarnom vremenu i izvan njega. H.265, evolucija svog prethodnika, razvijena je s ciljem uštede brzine prijenosa od 50%, ali prema mnogim istraživanjima ima slične rezultate kvalitete kodiranja. Iako su mnoge studije usredotočene na objektivnu procjenu kvalitete, samo nekoliko njih provelo je analizu kvalitete definirane CRF (engl. *Constant rate factor*) vrijednostima i unaprijed postavljenim postavkama koda. S brojem podezivih parametara koji se mogu konfigurirati, implementacije H.264 i H.265 imaju izbor u određivanju CRF vrijednosti i unaprijed postavljenih postavki kodiranja [18]. Prije nego li se provede ispitivanje na nekom koderu kao što su HEVC ili AVC, moguće je prilagoditi različite parametre testiranja kako bi se omogućio proces kodiranja. Na taj način se procjenjuje kako unaprijed postavljene postavke utječu na performanse koda kao i na krajnju kvalitetu videa. U većini slučajeva dostupno je prilagođavati parametre poput brzine prijenosa, rezolucije, brzine slika u sekundi, brzine kodiranja, kvantizacijske parametre, različite profile i levele, prostor boja, dubinu bita itd. Prilagođavanjem parametara u postavkama kodiranja osiguravaju se uvjeti usklađeni sa zahtjevima i potrebama ispitivanja koji mogu varirati ovisno o sadržaju koji se kodira. AVC i HEVC video koderi mogu se testirati pomoću različitih softverskih alata i programa. Najčešće korišteni softverski programi za testiranje su FFmpeg, x264, HM (HEVC Test Model), Alat za mjerenje kvalitete videa – VQMT (engl. *Video Quality Measurement Tool*), HandBrake, YUVTOOLKIT. Izbor softvera ovisi o poznavanju korištenja ponuđenih alata za upravljanje i specifičnim pokazateljima koji se žele prikazati. Za osnovnu analizu obično se koriste alati naredbenog retka poput FFmpeg. Za sveukupnu procjenu kvalitete koriste se kombinacije softvera gdje se VQMT pokazao korisnim.

Prilikom testiranja koda, postavljanje različitih ciljnih brzina prijenosa učestala je praksa u kompresiji videozapisa i procjeni kvalitete. Ciljne brzine prijenosa omogućuju pronalaženje ravnoteže između kvalitete i veličine datoteke. CRF predstavlja vrstu ili varijaciju parametara kompresije, koji određuju razinu kvalitete videa. Najbolja perceptualna kvaliteta videa može se postići kontrolom ili podešavanjem razina kvantizacije neizravno pomoću CRF-a. Međutim, CRF nema izravnu kontrolu nad stvarnom brzinom prijenosa koja se koristi za transkodiranje video segmenata. To uzrokuje da će konfiguracija istih CRF parametara generirati različite brzine prijenosa kada se primijeni na različite videozapise ili čak različite segmente u jednom videozapisu. Odabir određenih unaprijed postavljenih postavki koda

zapravo je prilagodba nekih internih parametara, kao što je broj B-okvira, rekurzija, veličina jedinice stabla kodiranja (CTU), itd. Iako odabir sporijih unaprijed postavljenih postavki pomoću fiksne brzine prijenosa daje bolju kvalitetu videa u usporedbi s upotrebom bržih unaprijed postavljenih postavki, ovaj uvjet nije uvijek ispunjen [18]. U ovom poglavlju će se opisati usporedba H.264 i H.265 standarda pomoću kombinacije CRF vrijednosti, različitih unaprijed postavljenih postavki kao i videa različite rezolucije. Kako bi se usporedile obje tehnike upotrebljavaju se razni parametri testiranja kao što su trajanje kodiranja, omjer kompresije, brzina prijenosa, MSE (engl. *Mean-square error*), PSNR (engl. *Peak signal to noise ratio*), SSIM (engl. *Structural similarity index measure*). HandBrake softver omogućuje postavljanje željenog CRF-a kao i ostalih postavki kodiranja. Manja CRF vrijednost rezultirat će značajnim povećanjem veličine izlaznog videa i obrnuto. Ako je CRF vrijednost postavljena na nulu, rezultirajući video bit će bez gubitaka te će imati veću veličinu izvornog videa. Općenito razumna praktična CRF vrijednost seže od 18 do 28 a inače se mogu birati vrijednosti između 0 i 51. Specifično za standard H.264 i H.265 vrijednosti su oko 23 i 28. Također u HandBrake program odabrati će se razina brzine kodiranja. Padajući izbornik predlaže deset razina brzine, silaznim redoslijedom od najbrže do najsporije razine (engl. *Ultrafast, Superfast, Very fast, Faster, Fast, Medium, Slow, Slower, Very slow i Placebo*). *Ultrafast, Medium i Slow* mogu biti odabrane razine kodiranja. Metode subjektivne procjene kvalitete videa temelje se na percepciji videa od strane mnogih promatrača. Najčešći postupak subjektivne procjene je srednja ocjena mišljenja (MOS). Objektivne metode procjene kvalitete videa temelje se na matematičkim modelima. Koristeći različite algoritme, cijeli proces ocjenjivanja provodi računalni program. Vrijeme trajanja kodiranja predstavlja vrijeme potrebno za proces kodiranja na temelju postavljenih parametara. Omjer kompresije je postotni omjer između veličine ulaznog i izlaznog videa. Brzina prijenosa se povezuje s kvalitetom slike, što je više bitova vezano za jedan piksel to će kvaliteta slike biti bolja. MSE je srednja kvadratna pogreška. Ona predstavlja kumulativnu kvadratnu pogrešku između komprimirane i izvorne slike. Što je niža vrijednost MSE, manja je pogreška. MSE opisana je formulom:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I_{(x,y)} - I'_{(x,y)}]^2 \quad (1)$$

gdje su M i N broj redaka i stupaca u ulaznim slikama. Dakle MSE prikazuje apsolutnu pogrešku. S druge strane PSNR koristi video signale kao objektivne parametre te predstavlja mjeru vršne pogreške. Omjer u PSNR-u između dva videa ili slike prikazuje se u decibelima. PSNR se izražava sljedećom formulom:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left[\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right] \quad (2)$$

Razvojem SSIM mjere, na bolji se način modelira kako ljudi percipiraju kvalitetu slike u usporedbi s prethodnim algoritmima. SSIM uspoređuje tri karakteristike koje bi trebale odražavati ljudsku percepciju kvalitete: promjena osvjetljenja, promjene u kontrastu, korelacija između slika. Više vrijednosti SSIM rezultata ukazuju na bolju kvalitetu. Iako su i PSNR i SSIM korisna mjerenja za procjenu kvalitete slika i videozapisa, SSIM se često odabire jer može predstavljati perceptivnu kvalitetu točnije od PSNR-a. SSIM indeks se računa prema formuli:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3)$$

gdje je:

- $SSIM(x, y)$ – specifični SSIM indeks između prostornih vektora slika x i y ,
- $\mu_x\mu_y$ – srednja vrijednost intenziteta vektora x i y ,
- σ_x, σ_y - standardna devijacija intenziteta vektora x i y ,
- σ_{xy} – standardna devijacija između vektora x i y ,
- C_1, C_2 – konstante za stabilnost

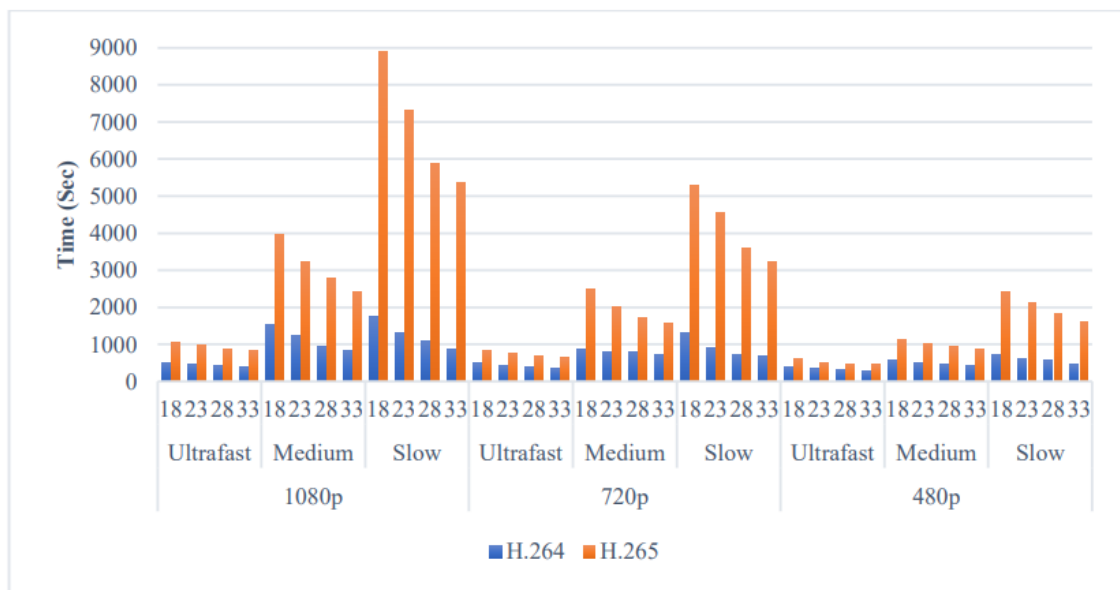
Prema [18] za dobivanje rezultata analize u postupku ispitivanja koriste se tri različita neobrađena videozapisa rezolucije 1080p u svrhu uspoređivanja tehnika H.264 i H.265. HandBrake je softver otvorenog koda koji se koristio za izvođenje procesa kodiranja na temelju obje tehnike kodiranja. Specifikacije računala su bile sljedeće: operativni sustav Windows 7 Home Premium 64-bitni, procesor Intel Core 2 Duo T6400 @ 2,00 GHz i grafička kartica Mobile Intel 4 Series Express Chipset Family. U tablici 4. mogu se vidjeti ključne usporedbe značajki AVC i HEVC standarda.

Tablica 4. Usporedba značajki H.264 i H.265 standarda

	AVC	HEVC
Predviđanje kretanja	Prostorno	Napredno predviđanje vektora pokreta. Prostorno + vremensko
Rezolucija	Do 4K	Do 8K

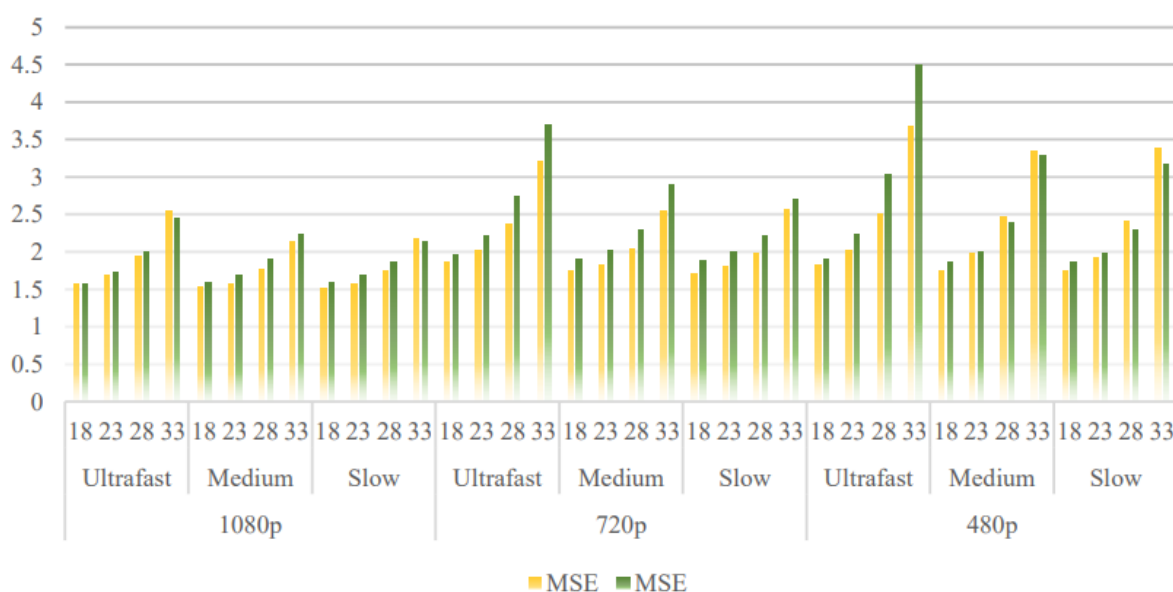
Intra modovi	9	35
Inter modovi	7	24
Predikcijska jedinica	16x16 do 4x4	64x64 do 4x4
Kompatibilnost	Široko kompatibilan	Ograničeno kompatibilan
Uporaba	Strujanje, DVD, Blu-ray	Ultra HD Blu-ray, internetsko strujanje, TV emitiranje
Veličina blokova	16x16	64x64
Dubina boje	8-bit	10-bit
Transformacijska jedinica	8x8 do 4x4	32x32 do 4x4

Prema [18] na temelju slike 23. može se vidjeti da najsporije vrijeme trajanja procesa kodiranja (oko 2 sata i 46 minuta) ima H.265/HEVC proces kodiranja s 1080p rezolucijom, sporim unaprijed postavljenim postavkama i 18 vrijednosti CRF-a. Dok trajanje najbržeg procesa kodiranja (oko gotovo 5 minuta) je H.264/AVC proces kodiranja s 480p rezolucijom, ultrabrzom unaprijed postavljenim kodiranjem i 33 vrijednosti CRF-a. To je uzrokovalo da ukupna tehnika H.264 ima kraće trajanje kodiranja u usporedbi s H.265 s dovoljno velikom razlikom koja iznosi gotovo oko 27,5 minuta. Na vrijeme potrebno za izvođenje procesa kodiranja utječe nekoliko uvjeta/konfiguracija. Što je niža razlučivost, ali s najbržim unaprijed postavljenim postavkama i što je veća CRF vrijednost, brži je proces kodiranja. Na temelju toga, ako želimo brže vrijeme procesa kodiranja, može se razmisliti o odabiru izlaznog video izlaza s niskom rezolucijom, ali s najbržim unaprijed postavljenim postavkama i najvišom CRF vrijednošću.

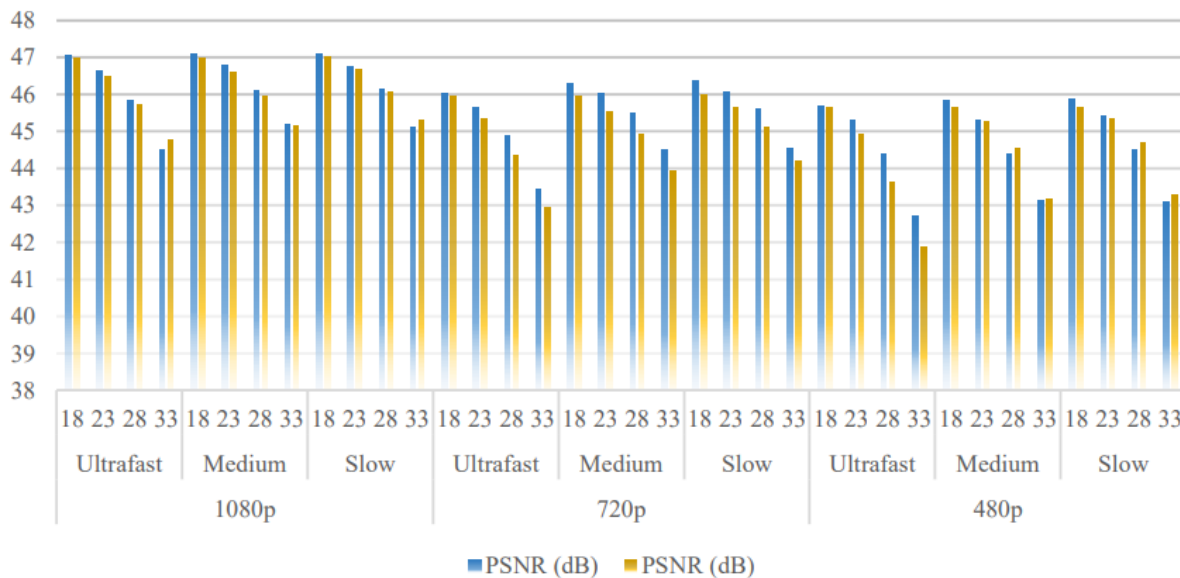


Slika 23. Vrijeme kodiranja H.264 i H.265 [18]

Prema slici 24. i 25., video izlaz koji proizvodi H.264 ima najbolju kvalitetu (MSE = 1,52 i PSNR = 47,1) s razlučivošću 1080p, sporim unaprijed postavljenim postavkama i CRF vrijednošću od 18. Dok video izlaz koji proizvodi H.265 ima najnižu kvalitetu (MSE = 4,5 i PSNR = 41,88), s razlučivošću od 480p, ultrabrzom unaprijed postavljenom postavkom i CRF vrijednošću od 33. Stoga je ukupna kvaliteta najboljeg video izlaza rezultat H.264. Unatoč tome, prosječna kvaliteta izlaznog videa koju proizvodi H.264 je samo 0,5% veća od H.265, što znači da nema prevelike razlike između njih.

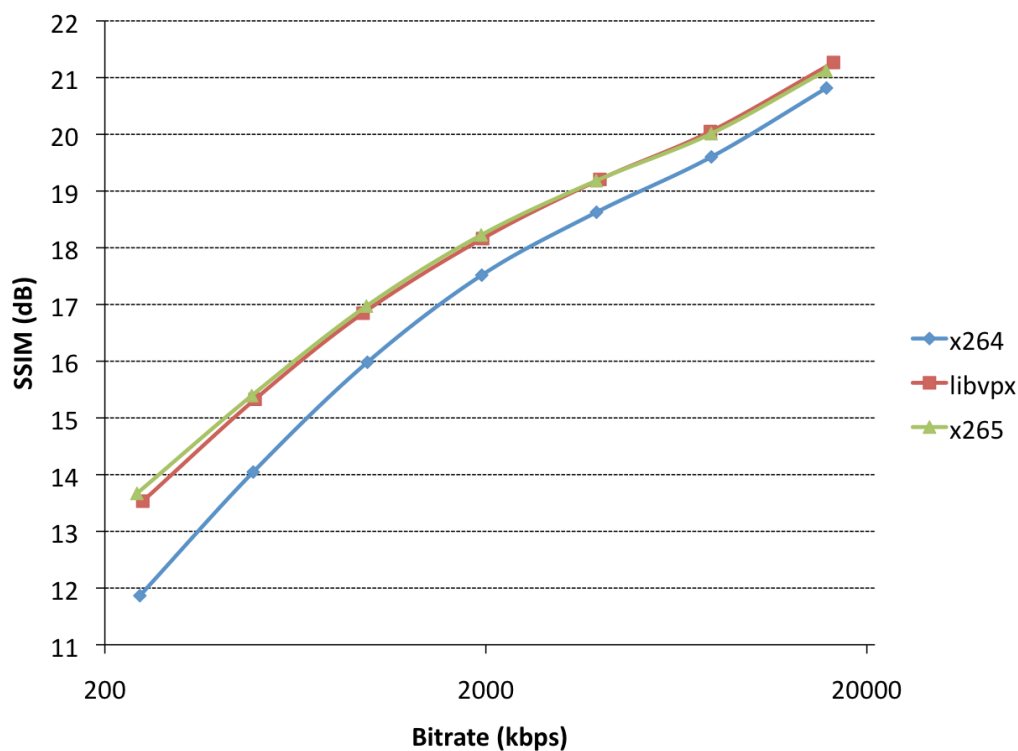


Slika 24. MSE H.264 i H.265 [18]



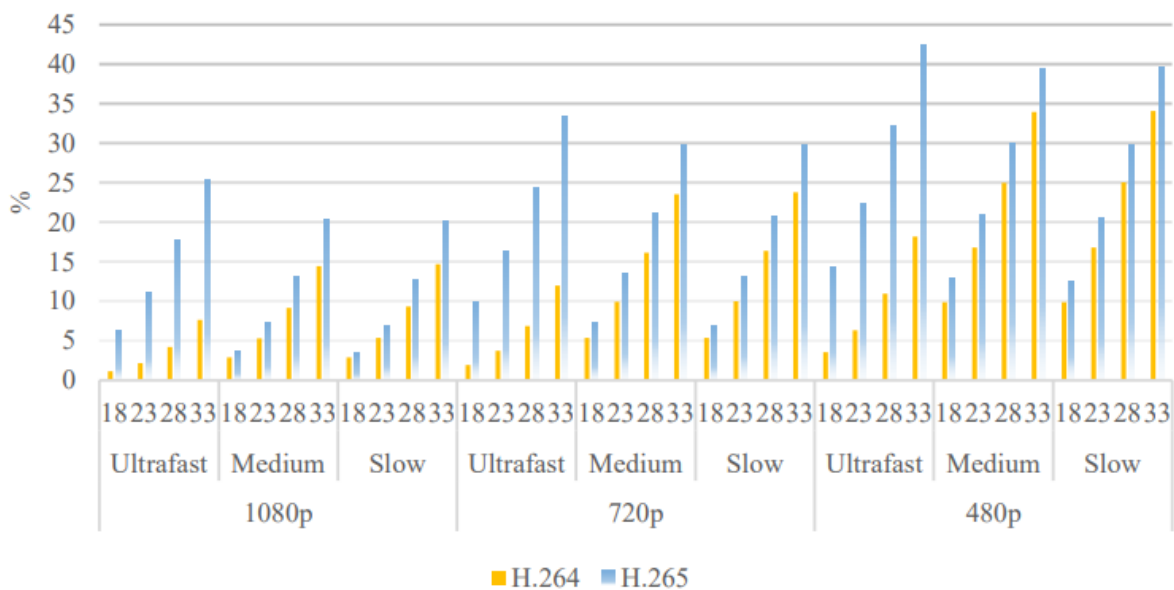
Slika 25. PSNR H.264 i H.265 [18]

Kvaliteta video kodeka je jedna od najvažnijih karakteristika. Kako bi se testiralo objektivnu kvalitetu nekog izlaznog video isječka, obično se kodira jedan ili više video isječaka koristeći standardne postavke kodeka na različitim ciljnim brzinama prijenosa u open source aplikacijama. SSIM je jedna od objektivnih metoda ocjene kvalitete slike koja se koristi u usporedbi između H.264 i H.265 kodera. Video kodere možemo usporediti iscrtavanjem parova brzine prijenosa/kvalitete u grafu. Video, rezolucije 1920x800p u trajanju od dvije minute koristio se kao testni isječak [19]. U svrhu usporedbe kodeka postavljene su ciljne brzine prijenosa (brzina prijenosa = 250 – 16000) sa SSIM postavkama na najvećoj kvaliteti. Zelenom bojom označeni H.265 kodek iz prikazanog grafa na slici 26. pokazuje puno bolje karakteristike u omjeru kvalitete i bitratea od H.264 kodeka. To bi drugim riječima značilo da ima manju veličinu datoteke za istu kvalitetu videa. Dakle, da bi H.264 postigao isti SSIM rezultat (kvalitetu), treba 49% veću brzinu prijenosa od H.265. H.265 kodek ima veće poboljšanje brzine prijenosa pri niskim brzinama prijenosa. Kako brzine prijenosa rastu, poboljšanja se smanjuju.



Slika 26. SSIM H.264 i H.265 [20]

Slika 27. prikazuje da najveći omjer kompresije (42,36%) ima H.265/HEVC s rezolucijom od 480p, ultrabrzom unaprijed postavljenom postavkom i CRF vrijednošću od 33. Dok je najniži omjer kompresije (1, 15%) ima H.264/AVC s 1080p rezolucijom, ultrabrzom unaprijed postavljenom vrijednosti kodiranja i CRF vrijednošću 18. U ovom slučaju, što je niža ciljna razlučivost video izlaza, ali s najbržom unaprijed postavljenom postavkom kodiranja i najvišom CRF vrijednošću, tada će omjer kompresije biti veći. Na temelju toga, ukupni omjer kompresije H.265 veći je za 38,5% u usporedbi s prethodnikom.



Slika 27. Omjer kompresije H.264 i H.265 [18]

U praktičnim primjenama prema osobnim potrebama i zahtjevima ispitivanja kodeka, obično se potvrđuje teorijska činjenica da HEVC ostvaruje dvostruko veću učinkovitost, ali pri većim rezolucijama. Učinkovitost kompresije je veća kod HEVC norme što je i očekivano budući da je standard orijentiran na UltraHD rezoluciju. Svakako treba spomenuti da sam proces kodiranja odnosno stvaranja HEVC formata traje poprilično dugo. Također može se vidjeti da svaka tehnika posjeduje svoje prednosti i nedostatke. Ipak, nema značajne razlike u kvaliteti slike između dva standarda. Ako korisnik želi imati malu veličinu video datoteke i da pri tome ne žrtvuje značajnu količinu vremena kompresije, preporučuje se korištenje H.265 kompresije odabirom HD rezolucije (720p).

Na slici 28. prikazana je vizualna razlika izvornog isječka videa u usporedbi s AVC i HEVC kodiranim rezultatom ispitivanja kvalitete koda odozgo prema dolje. Što je veća brzina prijenosa koja se koristi prilikom testiranja koda to je bolja kvaliteta videa pa je nemoguće uočiti razlike između videozapisa koji se uspoređuju. Iz tog razloga u svrhu usporedbe AVC i HEVC norme, brzina kodiranja za HEVC sekvencu može se smanjiti za pola vrijednosti brzine kodiranja u usporedbi s AVC ispitnom sekvencom. Zasiurno je da bi pri istim brzinama prijenosa i unaprijed sporim postavljenim postavkama kodiranja HEVC bio značajno bolji izbor.



Slika 28. Usporedba AVC i HEVC okvira s izvornim okvirom [19]

Izvorna rezolucija videa prikazana na slici 28. je 1280 x 720p, formata YUV, brzine prijenosa 256 Mbit/s, 24 sličice po sekundi. Slika 28. također predstavlja idealnu priliku za provođenje subjektivnih mjera za ocjenu kvalitete. Ako se izvorni video 4K rezolucije kodira pomoću AVC i HEVC norme, teorijskim pristupom bile bi očekivane vizualne razlike između dobivenih rezultata za istu vrijednost brzine prijenosa. Na slici 29. mogu se vidjeti uvećani dijelovi kodiranih slika, gdje se primjećuje bitna razlika u razini detalja. Lijeva strana slike 29. rezultat je HEVC kodiranja izvornog videa koji je prikazivao iskrenje u 4K rezoluciji. Na desnoj strani slike 29. jednako je prikazan rezultat AVC kodiranja. Očigledan je gubitak detalja kod AVC testiranja, posebno u gradijentu guste iskre za istu vrijednost brzine prijenosa.



Slika 29. HEVC i AVC usporedba u 4K [21]

Slika 30. prikazuje izvorni video isječak iskrenja koji je dobar primjer kompleksnosti pokreta za testno kodiranje spomenutim normama. Izvorna brzina prijenosa videa smanjena je na 7 Mbit/s za potrebe usporednog testa kodiranja.



Slika 30. Isječak izvornog 4K videozapisa [21]

8. PRIMJENA HEVC STANDARDA

Kako svijet postaje sve više digitaliziran, tako i video sadržaj postaje alat za povezivanje među ljudima. To primjerice može biti interakcija s kupcima, obuka zaposlenika, podjela informacija na društvenim mrežama i sl. Porastom upotrebe videa visoke i ultra visoke razlučivosti, potreba za njegovom isporukom mora se razvijati. Iz tog razloga razvija se HEVC standard za kompresiju videa čije će se potrebe za korištenjem predstaviti u ovom poglavlju.

Kad god netko gleda TV emisiju, upućuje videopoziv, dijeli video sadržaj na internetskoj mreži, on zapravo emitira video. Cijeli proces strujanja videa koristi mnogo podataka. Učinkovitost HEVC kodeka omogućuje gledati glatke, visoko kvalitetne videozapise bez kašnjenja. Tvrtke koje žele implementirati najkvalitetniji video sadržaj koriste HEVC format. Kao nasljednik AVC formata kompresija videa je brža i učinkovitija, a kvaliteta proizvedenog videa je viša. Također, računalna snaga se neprestano razvija. Snaga radnih stanica, tableta, mobilnih uređaja raste iz godinu u godinu. Pojavom većih podatkovnih komunikacijskih brzina kao što je 5G potvrđuju da računalni zahtjevi i dalje rastu. Sve to samo je dokaz da su očekivanja gledatelja za slike i videa visoke kvalitete od velikog značaja. HEVC kodek je bolji od prethodnih standarda te šalje video sekvencu puno učinkovitije. Omogućuje strujanje videozapisa i emitiranje uz maksimalnu učinkovitost i kvalitetu. Nadalje, kako se tehnologija stalno unaprjeđuje, HEVC standard osigurava budućnost upotrebe. Najveća prednost HEVC standarda u odnosu na AVC je što proizvodi istu kvalitetu slike ili čak i bolju za upola manju brzinu prijenosa. Na primjer, strujanje videa u 1080p zahtijeva samo 2-3 Mbit/s. Za isto strujanje videa AVC bi zahtijevao 4-5 Mbit/s. Korištenje HEVC standarda smanjuje zahtjevnost propusnosti za emitiranje, isporučuje podatke putem mreže brže i učinkovitije te ima veliki potencijal za široku uporabu. HEVC je također prikladan za kompresiju video sadržaja kod virtualne i proširene stvarnosti koja također postaje sve popularnija. Nadalje, igraće konzole su prihvatile HEVC za multimedijски sadržaj. Pametni televizori novije generacije već dolaze s ugrađenim HEVC dekoderima. HEVC je posebno važan i za mobilne uređaje i tablete gdje vrhunsko kodiranje i dekodiranje sadržaja smanjuje opterećenje na procesorskim jedinicama te na taj način produžuje vijek baterije uređaja.

Ukratko, HEVC postaje standard video kompresije s obzirom da 4K razlučivost postaje standard u ostatku svijeta. U Hrvatskoj također je HEVC postao dio standarda za emitiranje televizijskih zemaljskih kanala. Novi DVB-T2 (engl. *Digital Video Broadcasting - Second*

Generation Terrestrial) signal omogućuje sliku u HD kvaliteti te pokriva više od 97% stanovništva. Neke od popularnih aplikacija koje su široko rasprostranjene poput Netflix-a i Amazon TV-a već koriste HEVC za strujanje svojih sadržaja u 4K formatu. Nadalje, istraživanja kažu da više od 40% američkih kućanstava tijekom 2021. godine posjeduje televizor koji je kompatibilan s 4K formatom. Takva informacija opravdava činjenicu postavljanja HEVC norme kodiranja videa kao novi i unaprijeđeni standard.

8.1. Pregled najnovijih dostignuća HEVC kompresije

Pojavom HEVC norme kao tehnologije podložne transformaciji dostiže se optimizirana kompresija i isporuka videa u sve širem spektru aplikacija. Prethodno u ovom poglavlju je navedena najučestalija primjena HEVC standarda tj. ona koju prosječan čovjek najviše konzumira, ali to naravno nije sve što HEVC nudi u modernom digitalnom dobu. Navedeni oblici primjene HEVC standarda i njegove učinkovitosti ne primjenjuje se samo u području komunikacije i zabave već u raznim industrijama i domenama, medicini, nadzoru, sigurnosti i sl.

Važnost kompresije medicinskog videa nije samo u smanjenju veličine datoteke za pohranu. Veći omjer kompresije postiže se tehnikom kompresije s gubitkom koje dovode do gubitka informacija i posljedično do potencijalnih dijagnostičkih pogrešaka. Stoga postoji potreba za pohranjivanje medicinskog videa u formatu bez gubitaka. HEVC kodiranje može učinkovito iskoristiti prostornu i vremensku redundanciju u video sekvencama. Umjesto 8 bita za predstavljanje piksela, u medicini se za postizanje slike visoke razlučivosti koristi 16 bita [22]. U načinu kodiranja bez gubitaka, normalna predviđanja su i dalje dopuštena, tako da će koder pronaći optimalno inter ili intra predviđanje i kodirati video sekvencu. Tipična 16-bitna rendgenska slika UHD rezolucije iznosi 3840 x 2160 piksela. To bi otprilike iznosilo oko 16 MB veličine datoteke. Posljedično tome vrši se povećana pohrana na disku i vremenu prijenosa slike. Iako se pohrana na disku stalno povećava, količina digitalnih video slika koje proizvode bolnice rastu još brže. Čak i ako postoji beskonačna pohrana, još uvijek postoji problem prijenosa medicinske video sekvence preko mreže. Podaci koji se odnose na pogreške u medicinskim slikama sugeriraju da je incidencija slikovnih izvješća koja daju krive ili pogrešne informacije u rasponu od 2% do 4%. Stoga je trenutni fokus na smanjenju dijagnostičke pogreške u kojoj HEVC kompresija igra značajnu ulogu [23]. Što se tiče subjektivne procjene kvalitete medicinskog videa, preporuča se nekoliko pristupa. Jedan od pristupa subjektivne

ocjene kvalitete medicinskog videa je da u njemu sudjeluju medicinski stručnjaci i ljudi koji se ne razumiju u medicinu [24]. Na taj način se očekuje da ljudi izvan medicinske struke ocjenjuju video u smislu perceptivne kvalitete dok stručnjaci ocjenjuju dijagnostičku kvalitetu sačuvanu u video sekvencama.

Prema istraživanju, oko 336 milijuna domova imalo je pametne sigurnosne kamere u 2021. godini [25]. Predviđa se da će taj iznos dosegnuti preko 1 bilijun do 2027. Tržište sigurnosnih kamera radi na poboljšanju kvalitete i performansi svojih proizvoda. Jedan od najnovijih standarda koje su prihvatile sigurnosne tvrtke je H.265 sigurnosna kamera. S brzim širenjem tehnologije IP (engl. *Internet Protocol*) videonadzora, H.264 (MPEG-4/AVC) standard više ne zadovoljava zahtjeve video kodiranja za veću rezoluciju slike. Sljedeća generacija 4K UHD i 8K UHD video uređaja neizbježno će postati standard. Poboljšana CTU segmentacija, kao i bolja kompenzacija pokreta i prostorno predviđanje, zahtijevaju mnogo više mogućnosti obrade signala za video kompresiju, ali imaju znatno manji utjecaj na količinu računanja potrebnog za dekompresiju. Predviđanje s kompenzacijom pokreta, još jedan veliki napredak u HEVC/H.265, upućuje blokove piksela na drugo područje u istom okviru (intra predviđanje) ili u drugom okviru (inter predviđanje). Veći blokovi H.265 IP kamera mogu značiti točnije informacije prilikom komprimiranja 4K videozapisa. Zahvaljujući njihovom učinkovitom kodiranju video kompresije, dobit će se glatko strujanje snimke bez zamrznutih ili odgođenih slika. H.265 sigurnosna kamera može omogućiti dulje vrijeme snimanja prije nego što se stari videozapisi prebrišu i uštedjeti dodatne troškove za pohranu podataka, kao što je plaćanje oblaka ili vanjskog tvrdog diska. CCTV (engl. *Closed-Circuit Television*) je nadzorno-sigurnosni sustav koji koristi video kamere i monitore. CCTV sustavi napravljeni su za snimanje i slanje videa s kamere na mali broj zaslona ili snimača, tvoreći zatvorenu komunikacijsku petlju. Ova se tehnologija često koristi za promatranje i dokumentiranje radnji u različitim okruženjima, uključujući otvorena područja, privatne posjede, komercijalna okruženja i državne zgrade. Masovna digitalizacija CCTV sustava zajedno s poboljšanjima kvalitete videa omogućuje primjenu različitih tehnologija inteligentnog videonadzora, koje mogu prepoznati ili pratiti objekte, kao i identificirati ljudska lica i obrasce ponašanja [26]. Prema [27] trenutne metode kompresije temeljene na diskretnoj kosinusnoj transformaciji (DCT) i blokovskom analizom mogu uvelike utjecati na prepoznavanje osobe. Odabir metode kompresije vrlo je važan jer sigurnosne kamere uglavnom snimaju vrlo dugo, što znači da se pohranjuje ogromna količina podataka. Iz tog razloga CCTV snimke su često jako komprimirane na nisku bitnu brzinu što donosi nižu cijenu sustava, ali i ogromnu degradaciju

kvalitete. HEVC standard u ovoj vrsti primjene prikazuje svoju superiornost u različitim aspektima kao što su softversko kodiranje i dekodiranje. Međutim, HEVC dizajn kompresije također zahtijeva više obrade nego u prethodnim standardima. Kod nadzornih video sustava najveća pažnja predaje se uvjetima osvjetljenja mjesta, kameri, video kompresiji i kutu gledanja.

Nedavni trendovi u multimedijским tehnologijama i razvoju virtualne stvarnosti (VR) uzrokovali su da potražnja za slikama i video zapisima s vidnim poljem (engl. *Field of View*) od $180^\circ/360^\circ$ u raznim područjima primjene brzo raste. Uređaji montirani na glavu (engl. *Head Mounted Devices*) koji omogućuju prikaz videa u takvom formatu također su dostupniji, što pomaže da se više pažnje posveti VR-u iz područja multimedijских usluga [28]. Masovno pružanje multimedijских usluga temeljenih na VR-u zahtijeva opsežna istraživanja u pružanju imerzivne scene uključujući metode za procjenu njihove kvalitete. Kako bi se stvorila imerzivna iskustva, VR tehnologija je potrebna za korištenje stereoskopskog višesmjernog videa u visokoj razlučivosti, kvaliteti i broju sličica u sekundi. Takvi zahtjevi predstavljaju značajne izazove u fazama kodiranja i strujanja ove tehnologije. Najčešći način komprimiranja višesmjernog videa je pomoću postojećih 2D kodeka za slike/video kao što su standardi HEVC/H.265 i *Versatile Video Coding* (VVC/H.266). Međutim, proces projekcije uvodi različite karakteristike uzorkovanja u sadržaj u usporedbi sa sfernom verzijom. Ove karakteristike se mogu predstaviti kao prekomjerno uzorkovanje sadržaja u različitim dijelovima projicirane slike. Takvo preduzorkovanje rezultira istezanjem sadržaja, deformacijama i ponašanjem nelinearnog kretanja. S druge strane, postojeći kodeci nisu optimizirani za takva ponašanja u sadržaju, posljedično, rezultirajuća izvedba kompresije je ispod optimalne za projicirani video [29]. HEVC se prilagođava u kompresiji kod panoramskog videa na način da ispravno pakira i mapira snimljene okvire. Korištenjem jednakokutne projekcije preslikava se sadržaj od 360 stupnjeva na 2D površinu. Također, HEVC podržava kodiranje temeljeno na pločicama gdje se panoramski video može podijeliti na manje pločice i zasebno kodirati. Strujanje promjenjive brzine prijenosa još je jedna od bitnih karakteristika HEVC podrške kako bi se VR sadržaj prilagodio vidnom polju gledatelja [30]. Sličan slučaj primjene HEVC kompresije događa se i kod korištenja dronova. Dronovi se mogu koristiti za snimanje videa iz zraka koji se može prenositi na FPV (engl. *First Person View*) naočale u stvarnom vremenu [31]. Osim kvalitete videa, koji teži biti u što većoj rezoluciji kao što je 4K, pomoću superračunala može se izmjeriti vrijeme kodiranja te potrošnja energije ovako zahtjevnog procesa. Eksperimentalni rezultati pokazuju da u HEVC-u predložena RC shema temeljena na ROI (engl. *Defining Regions of Interest*) može značajno poboljšati izvedbu u

usporedbi s najsuvremenijim metodama [32]. RC (engl. *Rate Control*) shema predstavlja kontrolu brzine i igra bitnu ulogu u video kodiranju. Dizajniranjem prikladne RC sheme za kodiranje videa visoke razlučivosti i brzim promjenama kadrova kod snimanja bespilotnim letjelicama osigurava učinkovitu kompresiju. RC shema koristi mapu ROI gdje dodjeljuje više bitova okvirima s većim vrijednostima ROI-a.

Prema opisivanju i važnosti primjene, što se navodi u ovom poglavlju, HEVC ima značajan utjecaj koji nadilazi konvencionalno video strujanje i emitiranje, pronalazeći kreativne aplikacije koje neprestano redefinišu mnoga tržišta i iskustva. HEVC standard nije samo poboljšao video kompresiju već je preoblikovao određene industrije te otvorio mogućnosti koje su se nekad smatrale nedostižnim.

9. ZAKLJUČAK

Izbor između AVC i HEVC standarda dugo je bila teška odluka u kompresiji digitalnog videa. Teorijskom usporedbom dolazi se do jasnog zaključka da HEVC predstavlja veliki korak unaprijed u tehnologiji video kompresije. Djelovanje AVC standarda je bilo impresivno za svoje vrijeme te je svakako postavio temelje HEVC standarda kao svog nasljednika sukladno razvoju internetskih video platformi, digitalnog video strujanja i raznih usluga dijeljenja videozapisa. Razvojem tehnologije očekivanja od strane potrošača dosegle su nove razine. Zahtjevi za većim razlučivostima, impresivnim iskustvima te učinkovitim prijenosom dovode u pitanje daljnju uporabu AVC standarda. HEVC se pokazao kao vrhunsko rješenje novopostavljenih izazova. Zadržava ili često nadmašuje vizualnu kvalitetu AVC kodiranog videa uz smanjene brzine prijenosa. Nadalje, HEVC standard proteže se u razne industrije i nije samo namijenjen za potrebe ugođaja i zabave. Visokokvalitetnim slikama se omogućuje bolja preciznost dijagnoze u medicini. Kod sigurnosnog aspekta, nadzor u stvarnom vremenu postaje mnogo učinkovitiji. Obrazovanje, posebno zadnjih godina, postaje sve više učenje na daljinu gdje HEVC kompresija omogućuje bolje sažimanje sadržaja, zadržavanje kvalitete istog te pospješuje video komunikaciju. Njegova sposobnost da očuva kvalitetu videa visoke razlučivosti pri smanjenim brzinama prijenosa omogućuje mu da bude vitalni alat digitalnog doba.

Korištenje subjektivnih i objektivnih mjera za ocjenu kvalitete videa temelj su napretka u tehnologiji kompresije. SSIM je više usklađena s načinom na koji ljudi percipiraju kvalitetu videa za razliku od PSNR i MSE metrike. Važno je zaključiti da korištenje objektivnih mjera za ocjenu kvalitete videa nisu uvijek ispravan prikaz ljudske percepcije. Posljedično, subjektivna procjena kvalitete videa ostaje neizostavan faktor u pogledu napretka kompresije.

H.265 može isporučiti sličnu kvalitetu videozapisa pri otprilike upola manjoj brzini prijenosa ili znatno bolju kvalitetu pri istoj brzini prijenosa u usporedbi s H.264. Međutim, zahtijeva više procesorske snage za kodiranje i dekodiranje, što znači da ga stariji uređaji ne podržavaju zbog kompjutorskih i energetske kompromisa. Problem s licenciranjem patenata također je jedna od stavki otežanog implementiranja H.265. Osim izazova povezanih sa složenim licenciranjem, računalnim zahtjevima, problema s kompatibilnošću, HEVC se suočava s direktnom konkurencijom alternativnih standarda poput AV1 (engl. *AOMedia Video 1*) i VP9 koji su besplatni. Budućnost standarda kompresije videa po svemu sudeći biti će neizvjesna. Glavni čimbenici koji će utjecati na izbor sljedećeg standarda su količina potražnje

za višim razlučivostima npr. 8K i više te virtualnoj stvarnosti. Osim toga, licenciranje i alternative otvorenog koda utjecat će na usvajanje budućih standarda.

10. LITERATURA

- [1] David Juran, "Kodiranje videa i H.264 format", Odjel za informacijsko-komunikacijske tehnologije, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, 2017., dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unipu:2345/preview> pristupljeno: 01.09.2023.
- [2] "Što je Bit depth?", dostupno na: <https://api.video/what-is/bit-depth>, pristupljeno 01.09.2023
- [3] "Videotehnika", dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Video>, pristupljeno 01.09.2023
- [4] "Lossy i Lossless kompresija", dostupno na: <https://unze.ba/am/pzi/2011/Damir%20Pivic/stranice/Video%20kompresija.html>, pristupljeno 01.09.2023.
- [5] "Kodek", dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kodek> , pristupljeno 01.09.2023
- [6] Slika procesa kodiranja i dekodiranja, dostupno na: <https://www.muvi.com/blogs/video-streaming-codecs-container> pristupljeno: 01.09.2023.
- [7] "Upotreba „Lossy“ i „Lossless“ kompresije", dostupno na: <https://www.adobe.com/uk/creativecloud/photography/discover/lossy-vs-lossless.html>, pristupljeno 01.09.2023
- [8] Luka Mekić-Delić, "Kodiranje videa prema H.265/HEVC normi", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku 2020., dostupno na: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2963/datastream/PDF/view>, pristupljeno: 01.09.2023.
- [9] "Motion compensation prediction", dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/motion-compensated-prediction> , pristupljeno 10.02.2023.
- [10] "Advanced Video Coding (AVC)", dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Video_Coding , pristupljeno 01.09.2023
- [11] Različite veličine blokova u H.264/AVC, dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/The-various-block-sizes-in-H264-AVC_fig1_220845531, pristupljeno 01.09.2023.

- [12] Struktura H.264/AVC kodeka, dostupno na:
<http://mrutyunjayahiremath.blogspot.com/2010/09/h264-video-codec.html> , pristupljeno 01.09.2023.
- [13] Shaileshkumar Kumbhani B.E., H.264 intra frame prediction design, South Gujarat University, India, 2005., dostupno na:
<https://scholars.csus.edu/esploro/outputs/graduate/H264-intra-frame-prediction-design/99257934861201671/filesAndLinks?index=0> , pristupljeno 01.09.2023.
- [14] Razumijevanje transformacije, kvatizacije i entropijskog kodiranja u H.264 video kompresiji, dostupno na: <https://www.sourcesecurity.com/insights/co-1260-ga.5356.html> , pristupljeno: 01.09.2023.
- [15] Petar Mojaš, "Usporedba kvalitete kompresije H.264 i H.265", Seminarski rad iz kolegija Kompresija podataka i zaštitno kodiranje, Odjel za elektrotehniku Sveučilište u Dubrovniku, 2023.
- [16] Garry J. Sullivan, Jens – Rainer Ohm, Woo – Jin Han, Thomas Wiegand, "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard", IEE Transactions on Circuits and System for Video Technology, 2012., dostupno na:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6316136> , pristupljeno: 01.09.2023.
- [17] Uvod u HEVC, dostupno na: <https://www.vcodex.com/hevc-an-introduction-to-high-efficiency-coding/>, pristupljeno: 01.09.2023.
- [18] Adhi Rizal, Aries Suharso, Panji Abujabbar, Munir, "Objective Quality Assesment of Multi-Resolution Video based on H.264/AVC and H.265/HEVC Encoding", Faculty of Computer Science, Universitas Singaperbangsa Karawang, Indonesia, 2019.
- [19] Berim Karamehić, "Primerjava standardov video kodiranja H.264 AVC in H.265 HEVC", Univerza v Ljubljani fakulteta za elektrotehniko, 2015., dostupno na
:<https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=81786&lang=slv> , pristupljeno: 16.09.2023.
- [20] Ronald S. Bultje, "Performanse kodiranja i dekodiranja", 2015.,dostupno na:
<https://blogs.gnome.org/rbultje/2015/09/28/vp9-encodingdecoding-performance-vs-hevch-264/> , pristupljeno: 16.09.2023.
- [21] Pregled razlike AVC i HEVC kodeka, dostupno na:
<https://teradek.com/blogs/articles/see-the-difference-hevc-vs-avc> , pristupljeno: 16.09.2023.

- [22] Kompresija medicinskog videa korištenjem HEVC norme, dostupno na: <https://www.design-reuse.com/articles/39968/lossless-medical-video-compression-using-hevc.html#:~:text=Using%20HEVC%2C%20medical%20video%20sequence,and%20encode%20the%20video%20sequence> , pristupljeno: 16.09.2023.
- [23] Saurin Parikh, Damian Ruiz, Hari Kalva, Gerardo Fernandez-Escribano, Velibor Adzic, "High Bit – Depth Medical Image Compression with HEVC", dostupno na: <http://www.kresttechnology.com/krest-academic-projects/krest-mtech-projects/ECE/M-TECH%20DSPDIP%202019-20/M-TECH%20DSP%20-BP-2019-2020/22%20basepaper.pdf>, pristupljeno: 16.09.2023.
- [24] Manzoor Razaak, Maria G Martini , Rate-Distortion and Rate-Quality Performance "Analysis of HEVC Compression of Medical Ultrasound Videos", Wireless and Multimedia Networking Research Group, Kingston University, London, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914016032>, pristupljeno: 16.09.2023.
- [25] Sigurnosna H.265 kamera, dostupno na: <https://praetector.com/h-265-security-camera-all-you-need-to-know/>, pristupljeno: 16.09.2023.
- [26] S. Vitek, M. Klíma and L. Krasula, "Video compression technique impact on efficiency of person identification in CCTV systems", 2014 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), Rome, Italy, 2014.
- [27] Matthias S.Keil, Agata Lapedriza, David Masip, Jordi Vitria, Preferred Spatial "Frequencies for Human Face Processing Are Associated with Optimal Class Discrimination in the Machine", dostupno na: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0002590>, pristupljeno: 16.09.2023. [Online]
- [28] L. Polak, J. Kufa and T. Kratochvil, "On the Compression Performance of HEVC, VP9 and AV1 Encoders for Virtual Reality Videos", 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Paris, France, 2020, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9379878> , pristupljeno: 16.09.2023.
- [29] Ramin Ghaznavi Youvalari, "Encoding and Streaming Solutions for Immersive Virtual Reality Video", Tampere university , Finland, 2021., dostupno na:

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/124573/978-952-03-1852-9.pdf?sequence=2> ,
pristupljeno: 16.09.2023.

[30] R. Ghaznavi-Youvalari, A. Zare, A. Aminlou, M. M. Hannuksela and M. Gabbouj, "Shared Coded Picture Technique for Tile-Based Viewport-Adaptive Streaming of Omnidirectional Video", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019., dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8482496> , pristupljeno: 16.09.2023.

[31] Jakov Benjak, Daniel Hofman, Josip Knezović, Martin Žagar, "Performance Comparasion of H.264 and H.265 Encoders in a 4K FPV Drone Piloting System", dostupno na: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/13/6386> , pristupljeno: 16.09.2023.

[32] Zhiyuan Li, Chao Wang, Xiaoduo Zhang Zhengzhou, "Transmission of UAV videos based On HEVC", Electromechanical Engineering Research Institute, China, 2017.

[33] Brza kompresija bez gubitaka koristeći HEVC, dostupno na:
https://www.researchgate.net/figure/a-Current-HEVC-intra-prediction-modes-b-Prediction-principle-for-all-angular-modes_fig1_299431184 , pristupljeno: 16.09.2023.

[34] Karakteristike strukture HEVC blokova, dostupno na: <http://what-when-how.com/Tutorial/topic-397pct9eq3/High-Efficiency-Video-Coding-HEVC-98.html> ,
pristupljeno: 16.09.2023.

[35] Deblokirajući filter visokih performansi, dostupno na:
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-92957-4_83.pdf , pristupljeno:
16.09.2023.

11. PRILOZI

11.1. Popis slika

Slika 1. Vremensko i prostorno uzorkovanje [1]	3
Slika 2. Poduzorkovanje krominantnih komponenti	4
Slika 3. Prikaz iste scene u različitim rezolucijama	5
Slika 4. Razlika 8 i 10 bitne boje [15].....	6
Slika 5. Proces kodiranja i dekodiranja [6]	7
Slika 6. (a) Kompresija bez gubitaka (b) Kompresija s gubicima	8
Slika 7. Kompenzacija pokreta [9].....	11
Slika 8. Ključni okviri u AVC sekvenci [15]	13
Slika 9. „intra“ i „inter“ predviđanje.....	13
Slika 10. Veličine blokova u H.264 normi [11].....	16
Slika 11. H.264/AVC koder [12]	17
Slika 12. intra 4x4 tip - 9 načina predviđanja (luma) [13]	19
Slika 13. Smjerovi predikcije intra 4x4 s pripadajućim modovima [8]	19
Slika 14. Modovi predikcije 16x16 [13]	21
Slika 15. H.264 dekode [35].....	22
Slika 16. Pretvaranje podataka koji se ponavljaju u kodne riječi u enkoderu [14].....	24
Slika 17. Strukturna podjela u H.265 [16].....	27
Slika 18. Sekvenca kodiranih video okvira [17].....	28
Slika 19. Pločice i valni frontovi [34]	29
Slika 20. Smjerovi predikcije HEVC [33].....	31
Slika 21. Tri metode skeniranja koeficijenata u HEVC-u [16]	33
Slika 22. Usporedba uzoraka SAO tehnike	33
Slika 23. Vrijeme kodiranja H.264 i H.265 [18]	38
Slika 24. MSE H.264 i H.265 [18].....	38
Slika 25. PSNR H.264 i H.265 [18].....	39
Slika 26. SSIM H.264 i H.265 [20].....	40
Slika 27. Omjer kompresije H.264 i H.265 [18].....	41
Slika 28. Usporedba AVC i HEVC okvira s izvornim okvirom [19]	42
Slika 29. HEVC i AVC usporedba u 4K [21].....	43
Slika 30. Isječak izvornog 4K videozapisa [21]	43

11.2. Popis tablica

Tablica 1. Modovi predikcije intra 4x4 [13].....	20
Tablica 2. Modovi predikcije intra 16x16 [13].....	21
Tablica 3. Intra predikcijski modovi	30
Tablica 4. Usporedba značajki H.264 i H.265 standarda	36

IZJAVA

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na studijima Sveučilišta u Dubrovniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentorice doc. dr. sc. Anamarije Bjelopera kojoj se još jednom srdačno zahvaljujem.

Petar Mojaš

