

**Математички факултет
Универзитет у Београду**

**Анализа отпорности различитих видео формата на грешке у
преносу видео садржаја путем транспортног тока**

- мастер рад -

Студент:
Милан Лакетић

Ментор:
проф. др Мирослав Марић

Београд, септембар 2017. год.

Садржај

Увод	3
Дигитална телевизија	4
Транспортни ток података MPEG	5
Пакети транспортног тока MPEG–2	9
Оцјена шума на сигналу	13
Индекс структурне сличности.....	14
Практичан рад: Мјерење квалитета приказа сигнала услед оштећења	15
Видео формат MPEG-1	16
Видео формат MPEG-4.....	20
Видео формат H.264	24
Видео формат H.265	25
Резултати истраживања	27
Закључак	29
Литература.....	30

Увод

Иако је у данашње вријеме изузетно појачан утицај интернета, телевизија је била и остала међу омиљеним средствима репродукције мултимедијалних садржаја. Због великих брзина интернета корисник не би требало да брине колика је комплексност и величина података које жели да репродукује. Ова чињеница много значи у дигиталној ери, зато покушавају да је искористе сви који су у својој дјелатности имали ограничења у вези комплексности података које треба пренијети до крајњег корисника.

Појавом дигиталне телевизије понуда и квалитет приказа садржаја су се драстично побољшали. Почетком 2018. године на тржишту ће се појавити 8K UHD TV (ultra high definition television) телевизори који ће бити у стању да репродукују слику димензија 7680x4320 пиксела (познатија као 4320p). Ипак, колико год да је мрежна инфраструктура савремена, а интернет брз, пренос дигиталног сигнала се обавља уз одређене сметње и губитке. Циљ је да губитака буде што мање, а да се на одређене сметње адекватно реагује како би се ефекти штете свели на могући минимум.

У домену дигиталне телевизије, најчешћи проблем је губитак пакета дигиталног сигнала приликом његовог преноса. Рад ће бити посвећен испитивању отпорности различитих видео формата у случају губитка пакета дигиталног сигнала који се преноси путем транспортног тока (transport stream). Биће објашњен начин функционисања транспортног тока, његова структура и особине, као и основне ствари о видео форматима и видео контејнерима.

Приликом израде стандарда за видео формате, програмери воде рачуна о њиховој отпорности на разне грешке, као и о реакцији видео декодера када до тих грешака дође. Кроз овај рад би требало да буде јасније да ли се приликом израде нове верзије видео формата мора обезбиједити и квалитетнија одбрана од грешака, нарочито у погледу отпорности на грешке у преносу.

У овом раду биће коришћени стандарди и видео формати дигиталне телевизије који су у употреби у Србији. Биће коришћени и јавно доступни алати за рад са видео форматима чија је употреба дозвољена у научно-истраживачке сврхе.

Дигитална телевизија

Дигитална телевизија (енг. Digital Television, DTV) је назив за пренос дигитално обрађених аудио и видео сигнала. За разлику од аналогне телевизије, код које су сигнали раздвојени по каналима (једна фреквенција за један канал), дигитална телевизија омогућује пренос више програма у оквиру једног канала (једна фреквенција носи у себи дигиталне сигнале за више канала). Постоји више начина примјене дигиталног преноса, па су у складу са тим и настали различити стандарди:

- DTV (Digital Video Broadcasting) – користи се у Европи, као и на подручју Сингапура, Аустралије и Новог Зеланда;
- ATSC (Advanced Television System Comitee) – у употреби на подручју Сјеверне Америке, у неким дијеловима средње Америке и у Јужној Кореји;
- ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) – стандард који важи на подручју Јапана и Филипина. Модификација овог стандарда (ISDB-T) је у употреби у већини земаља Јужне Америке, као и у афричким земљама португалског говорног подручја;
- DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) – стандард у Кини;
- DMB (Digital Multimedia Broadcasting) – стандард настао у Јужној Кореји (у питању је дигитална радио технологија преноса).

DVB је скуп јавно доступних стандарда у домену дигиталне телевизије. Стандард одржава међународни конзорцијум са више од 300 земаља чланица, а објављен је од стране Заједничког техничког комитета (JTC), Института за европске телекомуникационе стандарде (ETSI, детаљније на сајту [2]), Европског комитета за стандардизацију у области електротехнике (CENELEC) и Европске радиодифузне уније (EBU). Пренос података је могуће вршити на више начина:

- сателитски: DVB-S, DVB-S2 и DVB-SH;
- „земаљском телевизијом“: DVB-T, DVB-T2, DVB-H и DVB-SH;
- кабловски: DVB-C, DVB-C2;
- таласима: DVB-MT, DVB-MC, DVB-MS.

Ови стандарди дефинишу физички слој и слој везе дистрибутивног система. Сви подаци се преносе путем транспортног тока (енг. Transport Stream, TS) са неким додатним ограничењима (нпр. DVB-MPEG). У Србији је у употреби DVB-T2 стандард.

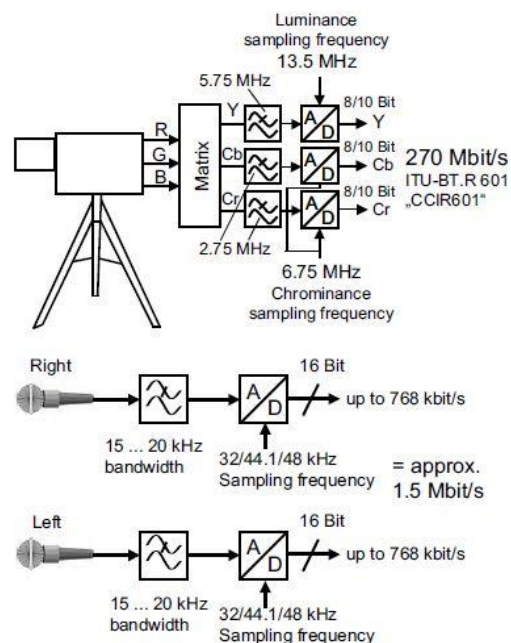
Више информација о дигиталној телевизији може се видјети у [1].

Транспортни ток података MPEG

MPEG транспортни ток (енг. MPEG Transport Stream, MPEG-TS или само TS) је уобичајена врста контејнера за пренос података на пољу дигиталне телевизије. Контејнер је врста носача података. Може носити видео и аудио, телетекст, титлове и друге додатне податке. Примера ради, једном контејнер може имати више аудио записа и титлова, уколико је подржано вишејезично приказивање садржаја. Популарнији контејнери су: MPEG-2, WAV (углавном се користи на Windows платформама), AVI (развијен од стране Мајкрософта), 3GP (користи се на већини мобилних телефона), Matroska (специфичан јер не постоји ограничење који видео формат може садржати, теоретски може преносити било шта).

Видео формат је стандард записа видео садржаја на основу којег се конструише видео кодек (енг. Video Codec). Видео кодек је електронски уређај (хардверски формат) или програм (софтверски формат) који служи за компресију и декомпресију дигиталних видео података. Само име је настало као скраћеница кодер – декодер. Кодер (encoder) служи за припрему података (енковање, компресија) за слање, док декодер (decoder) те исте податке распакује (декодује, декомпресује) приликом пријема и чини их видљивим за уређаје који треба да их прикажу. Популарнији видео формати су: Mpeg1, Mpeg2, Mpeg4, H.264, H.265, FFmpeg, Xvid, DivX, Cinepak.

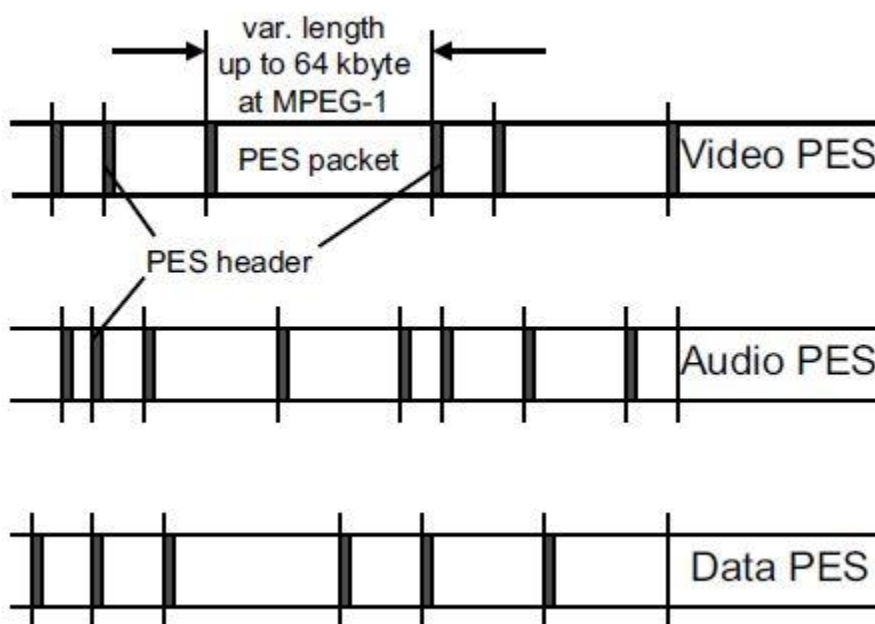
Ознака MPEG (Moving Pictures Experts Group, више информација се може пронаћи у [3]) би се могла превести и као „дигитални пренос покретних слика“. Међутим, мора се опет нагласити да пренос података овом врстом дигиталног сигнала не гарантује пренос видео и аудио записа (могуће је на овакав начин слати само „обичне“ интернет податке). Због ове чињенице се структура MPEG сигнала мора посматрати независно од аудио и видео података.



Слика 1: Брзина преноса података SDTV сигнала

SDTV (Standard Definition Television) сигнал без компримовања података има брзину преноса података од око 270 Mbit/s, док дигитални стерео аудио сигнал има брзину преноса око 1,5 Mbit/s (Слика 1). Овакви видео сигнали у MPEG-1 формату се компримују чак на 1 Mbit/s, док брзина преноса података у формату MPEG-2 износи 2 – 7 Mbit/s. Брзина преноса видео сигнала може бити константна или варијабилна. Брзина преноса аудио података је у распону 100 – 400 Kbit/s након компримовања (најчешће је 192 Kbit/s), с тим што је ова брзина увијек константна и умножак је 8 Kbit/s.

Овако компресовани сигнали у MPEG транспортном току се називају основни токови (енг. Elementary Streams, скраћено ES). На овакав начин се може формирати видео основни ток, аудио основни ток или, уопштено, основни ток података (било ког типа). Одмах након компримовања, основни токови бивају подијељени на пакете различитих дужина (Слика 2).



Слика 2: Пакети основних токова

Пошто је могуће да се некад садржај компресује више, а некад мање, у зависности од тренутне количине видео и аудио садржаја, потребни су и контејнери промјенљиве дужине који ће бити носиоци оваквих сигнала. Један такав контејнер може носити више аудио и видео пакета истовремено. Овакви основни токови се називају „пакетни основни токови“ (енг. Packetized Elementary Streams, PES). PES пакети су, обично, величине до 64 килобајта. Састоје се од релативно кратког заглавља и тијела пакета у којем су подаци који се преносе. Заглавље садржи индикатор (величина индикатора је 16 бита) дужине за максималну дужину пакета од 64 килобајта. Тијело пакета садржи у себи или компримовани видео и аудио стреам или чисти ток података. Према овом стандарду, међутим, видео пакети могу бити и дужи од 64 килобајта у неким случајевима. Тада се индикатор дужине у заглављу подешава на нулу па MPEG декодер мора користити друге механизме да би пронашао крај пакета.

Сви основни токови се прво пакују у пакете промјенљиве дужине, тј. PES пакете. Ти пакети имају заглавље минималне дужине 6 бајтова. Првих 3 бајта овог заглавља је тзв. „почетни префикс“, на овом мјесту је увијек уписана вриједност 00 00 01 која нам идентификује почетак PES пакета. Наредни бајт носи информације о идентификацији тока, те се у њему читава какве податке тај пакет носи (нпр. видео или аудио запис). Последња 2 бајта заглавља су резервисана за информацију колико је дугачак овај пакет. Уколико су оба бајта постављена на нулу, пакет је дужи од предвиђених 64 килобајта.

Иза заглавља пакета се налази „опционо проширење заглавља“, а прилагођено је захтјевима и потреби података који се преносе у основном току. У овом заглављу се, између осталог, налазе и контролни индикатори (flags) и има их 11 (заузимају 12 битова). Ови индикатори нам указују шта је све укључено у овом додатном заглављу. Неке од битнијих информација које можемо овде пронаћи су вриједности „вријеме приказивања“ (Presentation Time Stamps, PTS) и „вријеме декодовања“ (Decoding Time Stamps, DTS) које су важне приликом синхронизације аудио и видео садржаја.



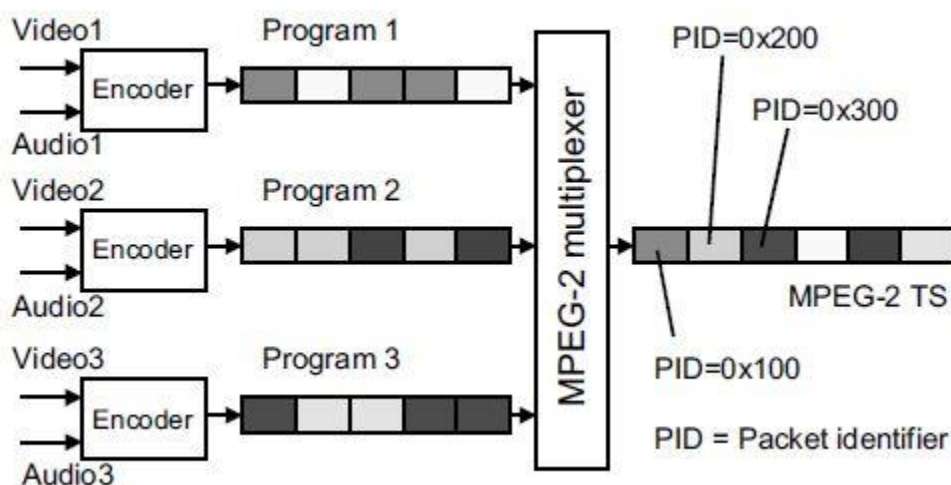
Слика 3: Комбиновање пакета у MPEG-1 току

У MPEG-1 току, видео пакети се једноставно комбинују са другим пакетима и складиште на медију (Слика 3). Овакво комбиновање пакета се назива мултиплексирање. Максимална брзина преноса података је око 1,5 Mbit/s за видео и аудио сигнале, али ток података укључује само видео и аудио токове. Оваква структура паковања сигнала са својим релативно дугим пакетима није погодана за пренос, а нарочито не за емитовање већег броја програма у једном вишеструком сигналу података.

У MPEG-2 транспортном току циљ је комбиновати 6, 10 или чак 20 независних ТВ или радио програма у један заједнички мултиплексирани сигнал. Овакав сигнал се затим преноси путем сателита, кабловски или копненом везом преноса. У том циљу, PES пакети су додатно подијељени у пакете мање дужине која је константна. Да би се то постигло, од постојећих PES пакета се узимају дијелови дужине 184 бајта испред којих се додају заглавља дужине 4 бајта. На такав начин добијамо „пакете транспортног тока“ (енг. Transport Stream Packets) који се затим мултиплексирају.

Прво се мултиплексирају пакети транспортног тока једног програма. Сам програм може да се састоји од једног или више аудио и видео сигнала. Најбољи пример за то је спортски догађај који може бити испраћен великим бројем камера, а све то да се подржи и пропрати на више различитих језика. Након овог поступка се врши мултиплексирање различитих података и тако се добија комплетан ток

података који се назива MPEG-2 транспортни ток (енг. MPEG-2 Transport Stream, скраћено TS).



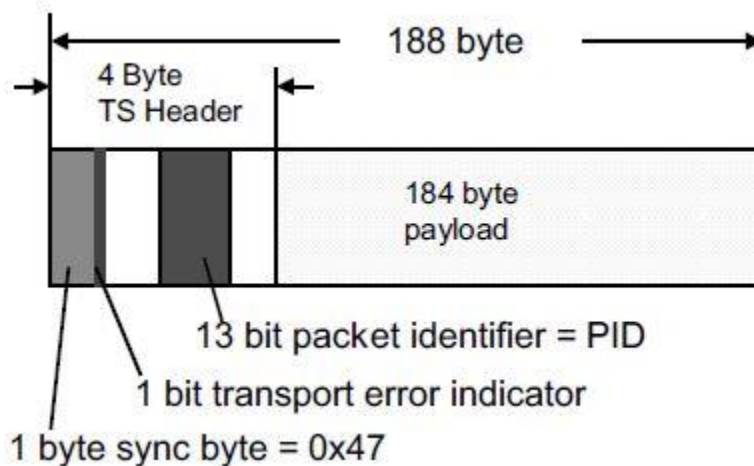
Слика 4: Мултиплексирање сигнала различитих програма

MPEG-2 транспортни ток састоји се од пакета, дужине 188 бајтова, свих програма који носе своје аудио, видео и сигнале осталих врста података. У зависности од брзине преноса података, пакети основног тока неког програма ће се појављивати ређе или чешће у MPEG-2 транспортном току. За сваки од ових програма постоји по један енкодер који пакује основне токове и генерише PES структуру, да би се онда овакви пакети мултиплексирали у пакете транспортног тока (Слика 4).

Брзина преноса података за сваки програм је, просјечно, 2 – 7 Mbit/s али укупна брзина преноса аудио или видео (или неких других) података може варирати због количине тих података у датом тренутку. Оваква појава се назива „статистички мултиплекс“. Када се уради мултиплексирање више програма у један транспортни ток, добијамо структуру која може имати брзину преноса података до 40 Mbit/s. На овај начин може се истовремено преносити 6, 8, 10 или чак и 20 програма у једном транспортном току. Брзина преноса података за одређени програм може да варира али укупна брзина преноса података мора бити константна. Програм може садржати видео и аудио, само аудио (емитовање радио станице) или само податке, али се транспортни ток, добијен на претходно описан начин, због своје флексибилности лако прилагођава и мијења приликом преноса. Да би се одредило пакети којег програма (и која врста пакета датог програма) ће ући у тренутни транспортни ток, сами пакети носе и описе структура који се налазе у њима. Такви описи се називају тебеле.

Пакети транспортног тока MPEG-2

MPEG-2 транспортни ток се састоји од пакета константне дужине (слика 5). Ова дужина је увијек 188 бајтова, са 4 бајта заглавља и 184 бајта података. Пакет може да преноси видео, аудио или неке опште податке. У заглављу су записани подаци који су значајни за сам пренос података.



Слика 5: Структура пакета транспортног тока

Први бајт заглавља је „бајт синхронизације“ и увијек има вриједност 47 у хексадецималном бројном систему (0x47, ако говоримо језиком C/C++). Наредни бајт синхронизације је на растојању тачно 188 бајтова од претходног, па се тако избегава забуна ако се међу самим подацима које пакет носи нађе неки бајт у којем је записана вриједност 0x47. По MPEG стандарду, синхронизација на декодеру се остварује након примљених 5 пакета.

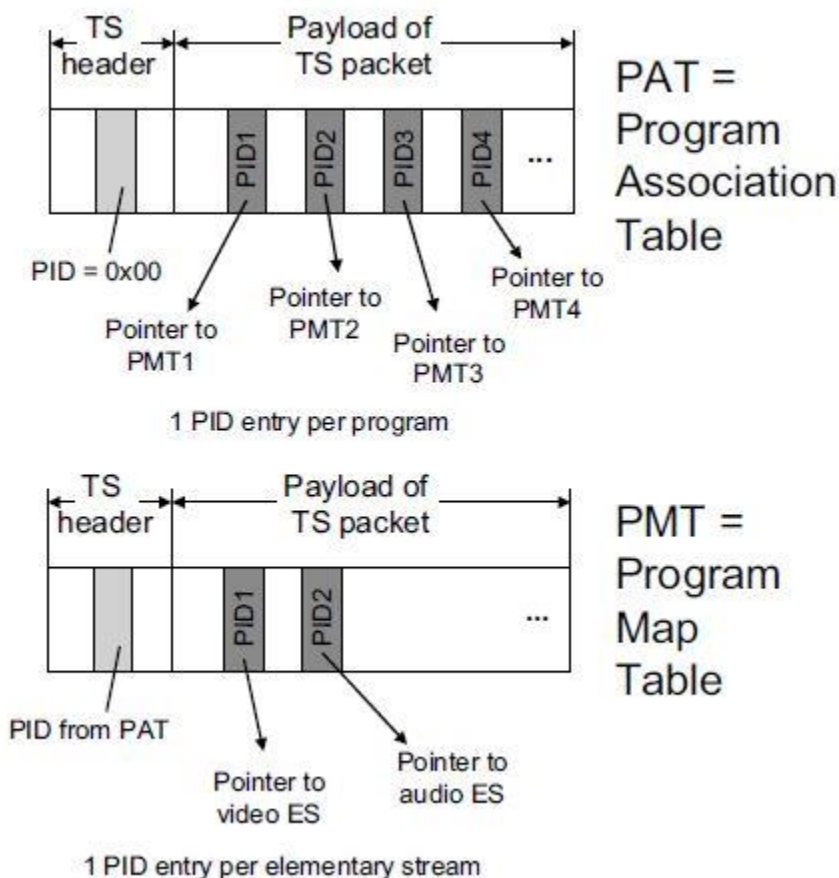
Такође, у заглављу пакета добијају се и још неке битне информације о њему самом. Једна од њих је и 13-битни идентификатор пакета (енг. Packet Identifier, скраћено PID). Овај хексадецимални број у комбинацији са табелама које се налазе у транспортном току означава коју врсту основног тока овај пакет преноси.

Пријемник, тј. MPEG декодер мора бити у стању да из великог броја пакета транспортног тока који носе најразличитије садржаје издвоји само оне које су потребни за декодирање одређеног програма. Поред тога, декодер мора бити у стању и да коректно синхронизује дати програм. Посматрајући сигнале које преноси, MPEG-2 транспортни ток је потпуно асинхрон и садржај његових пакета је насумичан (осим у појединим тренуцима, када ток преноси пакете по захтјеву пријемника). Не постоји никакво правило које се може примијенити за одређивање које информације ће бити садржане у наредном пакету транспортног тока. Декодер и сваки елемент који учествује у преносу пакета мора тачно знати која структура пакета му је потребна. PID (идентификатор пакета) се у овом случају користити за испитивање шта се тренутно преноси у пакету. У овом тренутку се јавља проблем

штедње енергије. Наиме, сваки пакет транспортног тока података се мора прво анализирати у пријемнику.

Када је MPEG-2 декодер повезан на MPEG-2 транспортни ток мора се закључати (енг. lock) на одређене пакете из долазног сигнала. Декодер у том случају тражи бајтове синхронизације. Они увијек имају вриједност 0x47 и увијек се појављују на почетку пакета транспортног тока, што значи да ће их декодер пронаћи у сталним интервалима од 188 бајтова. Ове двије чињенице, вриједност 0x47 у бајту, при константном размаку од 188 бајтова, се користе за синхронизацију. Уколико пронађе бајт са вриједношћу од 0x47, декодер ће испитати каква је ситуација у бајтовима на размаку од n пута 188 бајтова прије и после тренутног бајта. Уколико нађе исте вриједности на тим размацима, онда је декодер сигуран да је пронашао почетке пакета, а не неку вриједност коју неки од пакета носи у себи. Синхронизација ће се остварити након пет успјешно пронађених пакета, док ће декодер да откључа везу са тим транспортним током уколико дође до губитка од 3 пакета (према MPEG-2 стандарду).

Број и структура програма које преноси транспортни ток су потпуно флексибилни. Може бити преношен само један програм са једним видео и једним аудио основним током, а може бити 20 или више програма, неки само са звуком, неки са видео и аудио сигнаlima, а неки са једним видеом и великим бројем аудио сигнала који се емитују. Да би се знало какво је стање у транспортном току, морају постојати и неке унапријед дефинисане листе које говоре о структури тока. Ове листе дају „специфичне информације“ (енг. Program Specific Information, PSI). То су табеле које се повремено преносе пакетима (у дијелу за пренос података, не у заглављу). Прва је "Program Association Table" (PAT) табела. Ова табела (Слика 6) је увијек иста у једном транспортном току, а њено појављивање се понавља на сваких пола секунде. Показује колико програма постоји у датом транспортном току. Пакети који носе ову табелу имају нулу као вриједност идентификатора (PID) па се тако веома лако проналазе. У дијелу пакета за пренос података се носи листа специјалних PID вриједности. За сваки програм који се преноси постоји тачно једна PID вриједност у табели.



Слика 6: PAT и PMT табеле

Те PID вриједности су показивачи на друге, детаљније, информације којима се описује сваки програм појединачно. Они показују на друге табеле, тзв. „Program Map Tables“ (PMT). Ове табеле су специјални пакети транспортног тока са посебним дијелом за пренос података и специјалним PID вриједностима. PID вриједности PMT табела се преносе у PAT табелама. Примјера ради, ако се захтјева емитовање канала број 3, тада је одабран PID 3 из листе PID вриједности које постоје у PAT табели. Ако је ова вриједност, рецимо, 0x1F22, декодер тражи пакете који имају PID вриједност 0x1F22 у својим заглављима. Ови пакети представљају садржај програма број 3 у транспортном току. Тада се анализира садржина PMT табеле за овај програм јер се у њој налазе PID вриједности основних токова који су саставни дио овог програма (видео и аудио подаци, нпр).

С обзиром да може бити велики број видео и аудио сигнала (на пример, пренос спортског догађаја који се емитује на различитим језицима), гледалац мора да изабере елементарне токове који ће бити декодовани. То значи да ће бити одабране тачно 2 PID вриједности - једна за видео сигнал, друга за аудио. Од тог тренутка MPEG-2 декодер ће занимати само пакети са овим вриједностима, прикупљаће их, демултиплексирати и поново их комбиновати тако да формирају

PES пакете. То су управо пакети којима се снабдјевају видео и аудио декодер како би се створио још један видео-аудио сигнал.

Састав транспортног тока се може промијенити током преноса, нпр. локални програми могу да се преносе само под одређеним условима. Због тога сет-топ бокс (енг. Set-top box) декодер мора непрестано у позадини да надгледа тренутну структуру параметара који су битни за транспортни ток, нарочито PAT и PMT табеле и прилагођавају се новим ситуацијама. Заглавља табеле садрже неке индикаторе за ту сврху који сигнализирају пријемнику да ли се нешто променило у структурама. Проблем је што ово још увијек не важи за све DVB пријемнике. Пријемник често препознаје промјену у програмској структури тек након што се покрене претрага новог програма.

Оцјена шума на сигналу

Оцјена шума на сигналу (енг. Peak signal-to-noise ratio, скраћено PSNR) је назив за однос између максималне могуће снаге сигнала и снаге сигнала који је ометан шумом који утиче на квалитет његовог емитовања. Многи сигнали имају веома широк динамички опсег па се због тога PSNR обично изражава у облику логаритамске скале за јачину сигнала.

PSNR се најчешће користи за мјерење квалитета реконструкције компресије коју одради кодек. Сигнал у овом случају представљају оригинални подаци, а бука је грешка настала компресијом. Говорећи о компресији, PSNR је апроксимација људске перцепције квалитета реконструкције поквареног сигнала. Иако већи PSNR указује да је реконструкција квалитетнија, у неким случајевима то не важи. Мора се бити изузетно пажљив са опсегом важења овог показатеља јер са сигурношћу важи само када се користи за поређење резултата истог кодека (или истог типа кодека) и истог садржаја. PSNR је најлакше дефинисати преко средње квадратне грешке (Mean Squared Error, MSE). Ако се узме монохроматска слика I , величине $m \times n$, без оштећења, и њена оштећена апроксимација K , MSE се дефинише као:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2.$$

На основу претходног се добија да је PSNR (у децибелима) дефинисана као:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right).$$

MAX_I^2 је максимална могућа вриједност пиксела слике. Ако су пиксели представљени коришћењем 8 битова, ова вриједност је 255. За слике у боји са три RGB вриједности по пикселу дефиниција PSNR је иста, осим што је MSE сума над свим разликама квадрата подијељена са три пута величином слике. Са друге стране, за слике у боји може се користити метода која претвара у другачији простор боја и PSNR се рачуна за сваки канал појединачно.

Типичне вриједности за PSNR у губицима слике и видео компресије су између 30 и 50 dB, гдје је већа вриједност боља. Ово важи за 8-битне податке. За 16-битне податке типичне вредности за PSNR су између 60 и 80 dB. У одсуству шума, двије слике I и K су идентичне, а тиме је и MSE је нула. У овом случају PSNR је бесконачна (или недефинисана због дијељења нулом).

Индекс структурне сличности

Индекс структурне сличности (The Structural Similarity, SSIM) је метода за предвиђање перцепције квалитета филмске и слике дигиталне телевизије, као и друге врсте дигиталних слика и видеа. SSIM се користи за мјерење сличности између двије слике. Овај индекс је заснован на мјерењу разлике између почетне (некомпресоване) и изобличене слике. SSIM је дизајниран да побољша и помогне традиционалним методама, као што су PSNR и MSE, за које је доказано да нису у складу са људском визуелном перцепцијом.

Разлика у односу на друге технике је у томе што су MSE или PSNR засноване на процјени апсолутних грешака. С друге стране, SSIM је модел заснован на перцепцији која деградацију слике види као уочене промјене у структурним информацијама, а такође укључује значајне перцептуалне појаве, укључујући и освијетљеност и контраст. Главна идеја је да пиксели имају јаке међусобне зависности, посебно када су просторно близу.

Рачунање индекса структурне сличности двије слике x и y се заснива на израчунавању три фактора: освијетљења (l), контраста (c) и структуре (s). Укупни индекс се добија по следећој формули:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma,$$

гдје су:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1},$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}.$$

μ_x и μ_y су стандардна девијација, а σ_x , σ_y и $\sigma_x\sigma_y$ су коваријансе слика x и y . Промјенљиве $C_1 = (k_1L)^2$ и $C_2 = (k_2L)^2$ су уведене да би дијељење разломака са малим имениоцем било стабилније. L представља динамички распон вриједности пиксела (уобичајена вриједност ове промјенљиве је $2^{\text{број битова по пикселу}} - 1$). Вриједности $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0,03$ су дефинисане.

Уколико се узме да је $\alpha = \beta = \gamma = 1$ (што су подразумијеване вриједности експонената) и $C_3 = C_2/2$, добија се коначна формула:

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

SSIM индекс задовољава услов симетрије, тј. $SSIM(x, y) = SSIM(y, x)$.

Практичан рад: Мјерење квалитета приказа сигнала услед оштећења

Мјерење ће се вршити помоћу алата који је развијен у оквиру openCV пројекта (више о овом пројекту се може наћи у [4]). Улазни параметри овог алата су два видео сигнала који се пореде, граница PSNR испод које ће бити приказане SSIM вриједности и временски размак приказивања два сусједна видео фрејма (фрејм је једна слика која се исцртава преко читавог екрана). За резултат се добија индекс сличности за сваки приказ слике. Вриједност је између нула и један, гдје један одговара савршеном уклапању. PSNR ће се рачунати за сваки фрејм видео сигнала, а SSIM само за фрејмове у којима PSNR падне испод одређене вриједности (дефинише се као улазни параметар).

Ометање сигнала преноса ће се вршити на три начина:

- губитак пакета транспортног тока у групама: на одређеном интервалу ће се губити већа група пакета;
- губитак пакета транспортног тока у тачно дефинисаном интервалу: губиће се исти број пакета, интервал губитка ће бити мањи у сваком наредном кораку;
- губитак пакета транспортног тока потпуно случајно.

У сваком наредном кораку ће се повећавати степен оштећења сигнала, док се не достигне степен оштећења при којем гледање постаје непријатно за гледаоца.

Видео материјал у сировом формату (RAW) је помоћу ffmpeg (више о овој библиотеци погледати у [5]) библиотеке запакован у транспортни ток у одређеном формату (референтни фајлови за ово испитивање). Такви фајлови су се читавали на нивоу бајтова, пакет по пакет, па су се пакети (након оштећивања неких, дјелимично или у потпуности) паковали у нови транспортни ток. Видео сигнал из тих транспортних токова је емитован помоћу mediacaster алата, а читаван помоћу DVB-T2 сет-топ бокса. Сигнал са сет-топ бокса је емитован гледаоцима и био је употребљен за софтверско упоређивање квалитета слике у односу на полазни (референтни) сигнал.

У овом тренутку треба уочити разлику између видео контејнера и видео формата. Контејнер који ће преносити сигнале је MPEG транспортни ток (MPEG Transport Stream, скраћено TS), док су видео формати коришћени за потребе овог рада: MPEG-1, MPEG-4 верзија 2, H.264 (MPEG-4 верзија 10 или AVC) и H.265 (HEVC или MPEG-H верзија 2).

Видео формат MPEG-1

MPEG-1 је стандард за компресију видео и аудио материјала. Намијењен је за компресију VHS квалитета сировог дигиталног видео записа и CD квалитета аудио записа до 1,5 Mbit/s (26:1 коефицијент компресије за видео, а 6:1 за аудио) без претјераног губитка квалитета, чиме је омогућено емитовање видео CD-ова, дигиталне кабловске и сателитске ТВ и дигитално аудио емитовање. Овај стандард је један од најраспрострањенијих (говорећи о компресији аудио/видео материјала) у свијету, а користи се у великом броју производа и технологија. Можда и најпознатији дио стандарда је mp3 аудио формат.

Први пут се појавио 1993. године, док је последња корекција рађена 2007. године. Постоји 5 верзија овог видео формата (у складу са периодом развоја).

Стандардни се састоји од следећих пет дијелова:

- системи (складиштење и синхронизација видео, аудио, и других података заједно);
- видео (компримовани видео садржај);
- аудио (компримовани аудио садржај);
- тестови усклађености (тестирање исправности имплементације стандарда);
- референтни софтвер (пример софтвера којим се показује како се кодира и декодира према стандарду).

На слици 7 је приказан квалитет видео сигнала када се пакети транспортног тока губе у групама. Степен оштећења је 1%, резолуција видеа 1920 x 1080.



Слика 7: Губитак пакета у групама (степен оштећења: 1%)

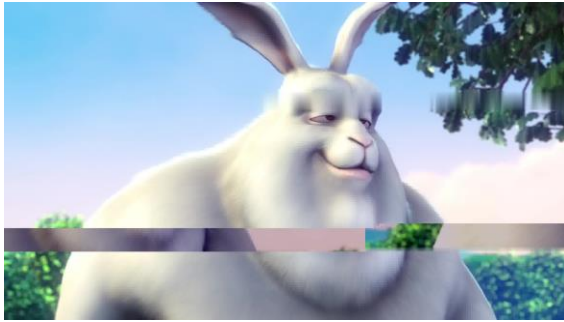
Уколико се пакети губе у групама, гледаоцима је напорно да прате репродукцију видео сигнала када је оштећење 35% (Слика 8).



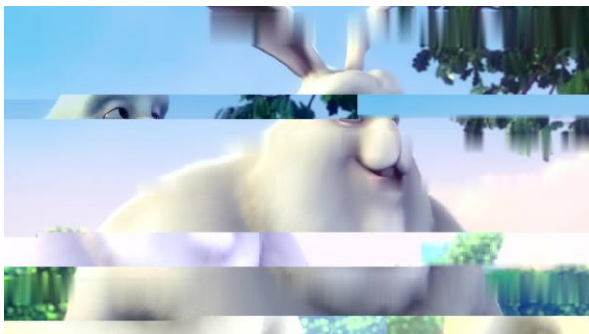
Слика 8: Губитак пакета у групама (степен оштећења: 35%)

Примјетно је да је овај видео формат прилично отпоран на губитак пакета овакве врсте. При губитку пакета у малом проценту оштећење репродукованог материјала се види на дијеловима фрејма. На фрејмовима са много детаља је тешко уочити оштећење па гледалац и не примјети да се нешто дешава. Тек када се оштети читава ширина фрејма, услед губитка пакета у већем обиму, гледање видео материјала постаје прилично отежано.

На слици 9 је приказан квалитет видео сигнала када се губе тачно одређени пакети. Степен оштећења је 1%, резолуција видеа 1920 x 1080.



Слика 9: Губитак одређених пакета (степен оштећења: 1%)



Слика 10: Губитак одређених пакета (степен оштећења: 3%)

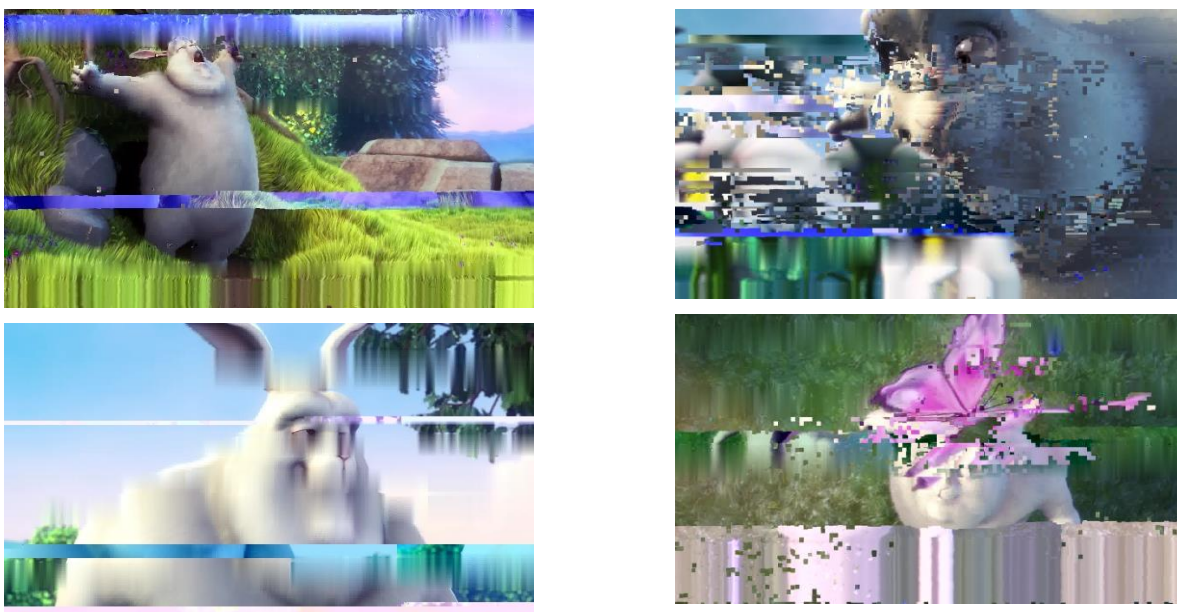
Слика 10 приказује квалитет видео сигнала када је приликом преноса изгубљено 3% тачно одређених пакета. То је граница до које су гледаоци могли да прате овако оштећен сигнал. Код овакве врсте оштећења (губе се тачно одређени пакети, на истом растојању) већ приликом малог оштећења се види деформитет фрејма у читавој својој ширини. Како оштећење расте, тако се оштећене траке на фрејму шире. Губитак пакета сигнала од 3 посто, при оваквом начину оштећења, чини сигнал тешким за посматрање.

На слици 11 се види квалитет видео сигнала у случају насумичног губитка пакета. Степен оштећења је 1%, резолуција видеа 1920 x 1080.



Слика 11: Насумичан губитак пакета (степен оштећења: 1%)

Такав сигнал се може гледати док се не изгуби 5% пакета транспортног тока (Слика 12). Губитак пакета на овај начин оштећује фрејмове само у одређеним дијеловима. Могуће је без проблема гледати репродукцију оваквог сигнала све док оштећење не погоди централни дио слике. Тада погођени дијелови фрејма постају деформисани (развучени или испреметани дијелови слике) па је људском оку тешко да „дешифрује“ такву слику.



Слика 12: Насумичан губитак пакета (степен оштећења: 5%)

Видео формат MPEG-4

MPEG-4 верзија 2 је видео формат компресије развијен од стране MPEG-а. Спада у MPEG-4 ISO/IEC стандард. За компресију користи дискретну косинусну трансформацију, слично претходним стандардима као што су MPEG-1 верзија 2 и H.262/MPEG-2 верзија 2. Неколико популарних видео формата, укључујући DivX, Xvid и Nero Digital користе овај стандард. Треба имати на уму да MPEG-4 верзија 10 дефинише другачији формат у односу на MPEG-4 верзију 2 и не треба га мијешати са њим. MPEG-4 верзија 10 се обично назива H.264 или AVC, заједнички је развијен од стране ITU-T и MPEG-а.

MPEG-4 верзија 2 је H.263 компатибилан, у смислу да се основни H.263 ток података правилно декодира од стране MPEG-4 видео декодера. MPEG-4 видео декодер у изворном стању декодирања основни облик H.263. Постоје 3 верзије овог видео формата. Појавио се 1999. године, а последње корекције верзије 3 су рађене 2009. године.

Слика 13 приказује квалитет сигнала приликом губитка тачно одређених пакета. Степен оштећења је 1%, резолуција видеа 1920 x 1080.

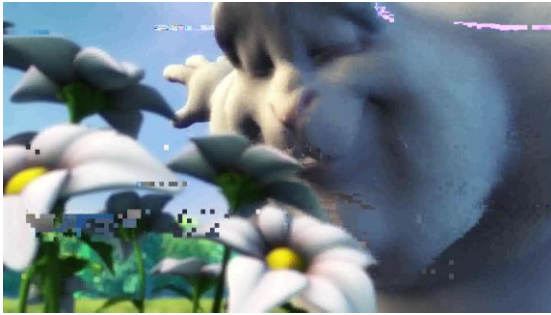


Слика 13: Губитак одређених пакета (степен оштећења: 1%)



Слика 14: Губитак одређених пакета (степен оштећења: 6%)

Гледаоцима је постало напорно да гледају када је оштећено 6% одређених пакета (Слика 14). На овом степену оштећења се често дешава и замрзавање једног фрејма док се наредни емитује преко њега, што укупну слику чини још деформисанијом.



Слика 15: Губитак пакета у групама (степен оштећења: 1%)



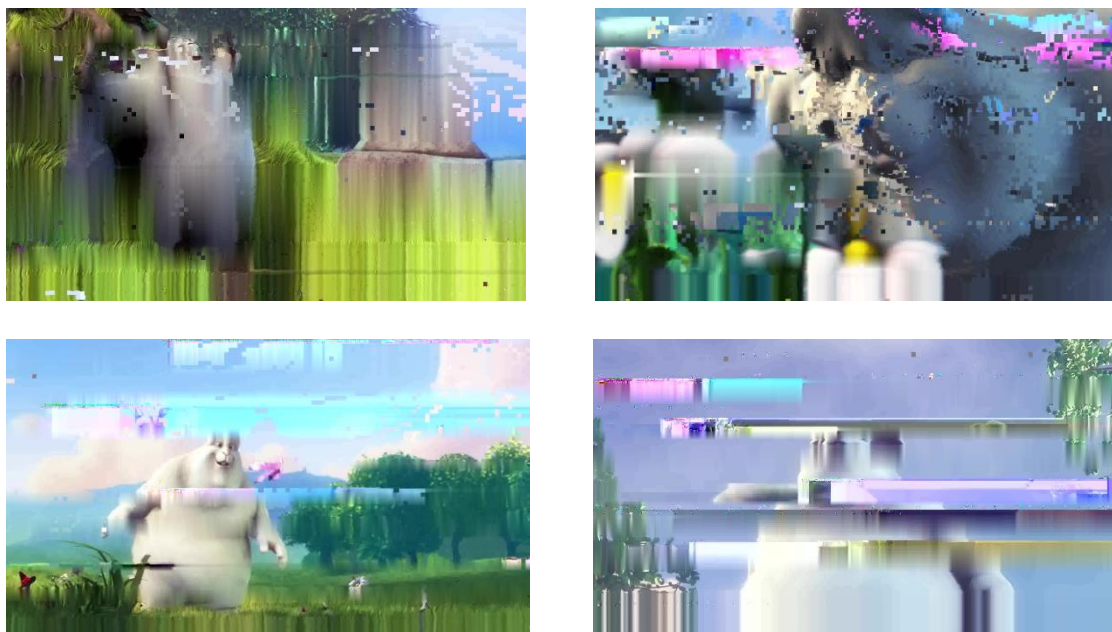
Слика 16: Губитак пакета у групама (степен оштећења: 35%)

Поређењем слика 15 и 16 види се да је MPEG-4 видео формат веома отпоран на губитак пакета у групама. Чак и са оштећењем од 35% и даље постоји

доста неоштећених фрејмова. Проблем при гледању оваквог видео материјала представља замрзавање оштећених фрејмова (то је реакција декодера на ову врсту грешке – покушава да се снађе и поправи губитак пакета) који тако кваре чисту слику која се добија у тренуцима када се репродукују неоштећени.



Слика 17: Насумичан губитак пакета (степен оштећења: 1%)



Слика 18: Насумичан губитак пакета (степен оштећења: 8%)

Насумичан губитак пакета при малом оштећењу (1%, Слика 17) не утиче много на квалитет слике у овом случају. Међутим, губитак пакета сигнала од 8% (Слика 18) доводи до веома оштећених видео фрејмова

Видео формат H.264

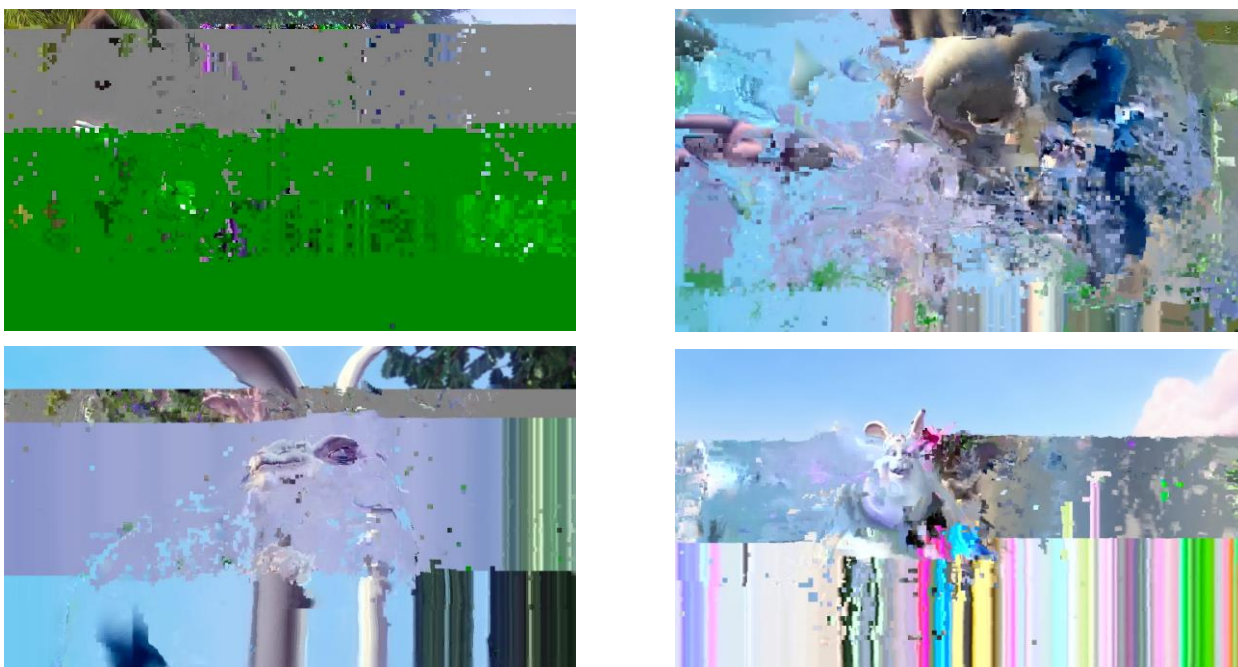
H.264 или MPEG-4 верзија 10, (друга ознака је AVC – од енглеског израза Advanced Video Coding) је један блок-оријентисан видео формат компресије базиран на компензацији покрета. Од 2014. године је један од најчешће коришћених формата за снимање, компресију, и дистрибуцију видео садржаја.

Идеја за покретање H.264/AVC пројекта је била да се створи стандард који је у стању да обезбиједи добар квалитет видео записа на знатно нижим брзинама од претходних стандарда (нпр, пола или и мања брзина преноса у односу на MPEG-2, H.263, MPEG-4 верзија 2) без повећања сложености дизајна како би се избјегла могућност да такав стандард постане непрактичан или прескуп за имплементацију. Такође, један од циљева је било и обезбјеђивање довољно флексибилности да би овај стандард био примјенљив на широк спектар апликација на разним мрежама и системима, укључујући и ниске и високе брзине преноса, ниске и високе резолуције видеа, емитовање, складиштење на DVD, RTP/IP мреже и системе мултимедијалне телефоније ITU-T. H.264 стандард се може посматрати као "фамилија стандарда" која се састоји од великог броја различитих профила. Сваки засебан декодер декодира најмање један, али не нужно и све профиле. На самом декодеру је описано који профили могу да се декодирају.

H.264 је можда најпознатији као један од стандарда видео кодирања за Blu-ray дискове. Сви уређаји који се користе за емитовање садржаја са Blu-ray дискова морају бити у стању да декодирају овај видео формат. Он је такође широко распрострањен што се тиче приказивања садржаја са интернета, те га стога користе сервиси као што су Vimeo, YouTube и iTunes Store. Такође, велику улогу овај формат има и у софтверу, на пример Adobe Flash Player и Microsoft Silverlight, па чак и у различитим облицима HDTV емитовања земаљске (Advanced Television Systems Committee standards, ISDB-T, DVB-T и DVB-T2), кабловске (DVB-C), и сателитске (DVB-S and DVB-S2) телевизије.

Прво појављивање овог видео формата везује се за 2003. годину. Тренутно је актуелна верзија 25 (издање 12) која се развија од априла 2017. године.

Када је у питању овај видео формат, оштећење видео сигнала од 1% (Слика 19) је учинило репродукцију немогућом за гледање.



Слика 19: Насумичан губитак пакета (степен оштећења: 1%)

Видео формат H.265

H.265 видео формат, познат још и као HEVC (High Efficiency Video Coding) или MPEG-H верзија 2 је видео стандард компресије, један од неколико могућих наследника веома коришћеног AVC формата (H.264 или MPEG-4 верзија 10). У поређењу са AVC форматом, HEVC нуди дупло већу компресију података на истом нивоу видео квалитета, или знатно побољшан квалитет видео записа на истој брзини протока података. Подржава резолуције до 8192×4320 , укључујући и 8K UHD.

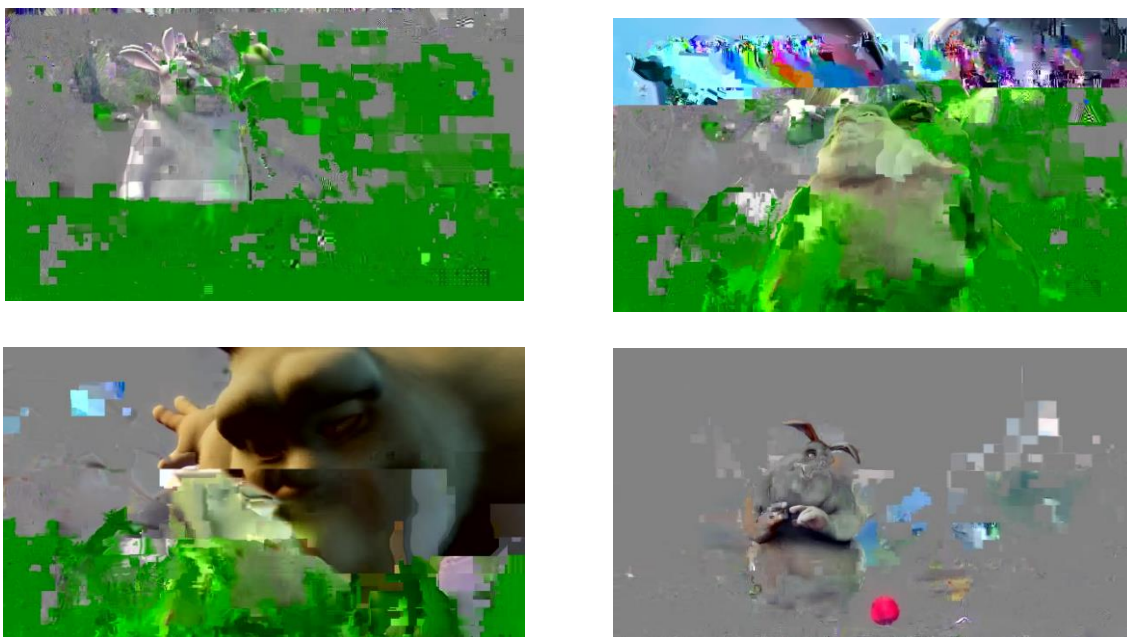
Уопштено говорећи, HEVC је продужетак концепта H.264(MPEG-4 AVC). Оба видео формата раде тако да упоређују различите делове оквира видеа и проналазе области које су вишак, како унутар једног оквира, тако и у оквирима који се касније појављују. Оригинални пиксели ове области се након тога мијењају кратким описом. Основна предност овог видео формата је у томе што има могућност поређења блокова величине 64×64 (умјесто дотадашњих 16×16) као и побољшану могућност предвиђања у оквиру исте слике.

HEVC је развијен од стране Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), као резултат сарадње између ISO/IEC MPEG и ITU-T VCEG. ISO/IEC MPEG овај видео формат назива MPEG-H верзија 2, док га ITU-T VCEG означава као H.265.

Прва верзија HEVC стандарда је објављена у јуну 2013. Тренутно је актуелна 4. верзија (објављена децембра 2016.).

HEVC садржи технологије које покривају патенти у власништву организација које су оснивачи JCT-VC. Имплементација програма за уређај или софтвер који користи HEVC могу захтјевати дозволу од носилаца HEVC патената. Проблематична ситуација везано за лиценцирање је један од главних разлога зашто HEVC још увијек није општеприхваћен као видео формат на интернету и зашто су се неке од највећих технолошких компанија (Amazon, AMD, ARM, Cisco, Google, Intel, Microsoft, Mozilla, Netflix, Nvidia и друге) придружиле Савезу за отворене медије (Alliance for Open Media) који има за циљ да оконча бесплатно видео кодирање формата AV1 до краја 2017.

Приликом губитка пакета (на било који начин), довољно је било оштећење од 1% (Слика 20) да гледаоци не препознају шта им се емитује.



Слика 20: Губитак пакета у групама (степен оштећења је 1%)

Резултати истраживања

У табели 1 је приказан упоредни преглед понашања видео формата у зависности од степена и врсте оштећења. У испитивању гледалаца је учествовало 25 особа.

Табела 1: Упоредни преглед понашања видео формата

Формат	Губитак груписаних пакета		Губитак одређених пакета		Насумичан губитак пакета	
	Гледаоци	софтвер	гледаоци	софтвер	Гледаоци	софтвер
MPEG-1	35%	13%	3%	2%	5%	3%
MPEG-4	35%	17%	6%	3%	8%	5%
H.264	1%	1%	1%	1%	1%	1%
H.265	1%	1%	1%	1%	1%	1%

За „границу гледивости“ исказану од стране софтвера је узет степен оштећења при којем се први пут појавило, на више од два груписања оквира, поклапање мање од 50% (PSNR вриједности у децибелима, Слика 21).

```

Frame: 581# 14.029dB MSSIM: R 72.91% G 71.92% B 70.61%
Frame: 582# 13.899dB MSSIM: R 73.30% G 72.44% B 71.13%
Frame: 583# 13.793dB MSSIM: R 72.50% G 71.87% B 70.26%
Frame: 584# 13.569dB MSSIM: R 71.40% G 70.94% B 69.33%
Frame: 585# 13.145dB MSSIM: R 70.41% G 70.18% B 68.50%
Frame: 586# 12.891dB MSSIM: R 68.88% G 68.86% B 67.30%
Frame: 587# 12.808dB MSSIM: R 68.90% G 69.06% B 67.53%
Frame: 588# 12.768dB MSSIM: R 68.69% G 68.94% B 67.42%
Frame: 589# 13.198dB MSSIM: R 72.20% G 73.93% B 72.50%
Frame: 590# 13.264dB MSSIM: R 71.97% G 73.70% B 72.28%
Frame: 591# 13.294dB MSSIM: R 71.36% G 72.97% B 71.69%
Frame: 592# 13.489dB MSSIM: R 71.65% G 73.22% B 71.84%
Frame: 593# 13.880dB MSSIM: R 72.18% G 73.67% B 72.25%

```

Слика 21: Очитане PSNR и MSSIM вриједности

Видео формати су најотпорнији на губитак пакета у групама (такав видео материјал је могуће гледати чак до степена оштећења од 35%). Што се тиче границе

отпорности, софтвер је ту границу поставио много ниже (17% у најбољем случају). То нам доказује да је људски мозак много способнији да исправља грешке у репродукцији на основу неоштећених фрејмова. Декодер се веома брзо „збуну“ и ради два посла истовремено: врши анализу околних, неоштећених фрејмова како би поправио штету, док у исто вријеме приказује фрејмове који наилазе по реду приказивања. Такав поступак при већим оштећењима ствара још већу неугодност приликом гледања таквог видео материјала.

Иако су видео формати који су се развили у скорије вријеме, H.264 (AVC) и H.265 (HEVC) су потпуно неотпорни на оштећења настала губитком пакета током преноса сигнала. MPEG-1 и MPEG-4 формати су доказали зашто су најзаступљенији када је ријеч о преносу сигнала дигиталне телевизије. Такође, испитивање је показало да се водило рачуна о проблемима овакве врсте, па је MPEG-4 формат, који је касније и развијан, прилично отпорнији.

Што се тиче квалитета слике, H.264 и H.265 формати дају потпуно глатку и много пријатнију слику од слике добијене компресијом података MPEG форматима. Са друге стране, људском оку је много пријатније гледање оштећеног видеа у MPEG формату, јер му „недостатак неколико квадрата“ на слици не квари доживљај цјелокупне слике.

Закључак

С обзиром да је слика високе резолуције главна понуда дигиталне телевизије, пакети којима се преноси дигитални сигнал носе много података. Због ове чињенице губитак пакета видео сигнала приликом преноса путем транспортног тока битно утиче на квалитет репродукције видео материјала.

Кроз рад је показано да су видео формати настали у вријеме када транспортна инфраструктура није била толико поуздана прилично отпорни на појаву губитка пакета. Ти видео формати су веома добро осмишљени, тако да се и видео кодеци који њима одговарају добро сналазе при појави грешака. Видео материјал трпи мања оштећења која не утичу битно на цјелокупну слику.

С друге стране, приликом израде видео формата новије генерације акценат се ставља на квалитет слике и брзину кодека. Потребно је обрадити велику количину података у реалном времену, па се чини да је свјесно остављена по страни поузданост транспорта тих података до декодера. Видео кодеци који одговарају овим видео форматима се веома тешко сналазе у условима појаве грешака. Чини се да сами видео кодеци у тим случајевима додатно себи отежају посао, па самим тим долази до изразитог оштећења у емитованом видео материјалу.

Будућност дигиталне телевизије је у емитовању мултимедијалног садржаја високих карактеристика. За видео сигнал, акценат је на резолуцији слике. Емитовање видео садржаја мора бити квалитетно и глатко, без икаквих сметњи. На основу овог рада, долази се до претпоставке да ће се у скорој будућности развити нови видео формат (а у складу са њим и нови видео кодек) који ће бити у стању да одговори на све изазове које доноси савремена дигитална телевизија.

Литература

[1] Digital Video and Audio Broadcasting Technology; A Practical Engineering Guide (third edition) - Walter Fischer, Springer 2010

[2] Сајт Института за европске телекомуникационе стандарде:
www.etsi.org/standards

[3] Сајт за презентацију стандарда MPEG групе видео формата:
www.mpeg.chiariglione.org/standards

[4] Сајт за презентацију OpenCV (Open Source Computer Vision Library) пројекта:
www.opencv.org

[5] Сајт за презентацију FFmpeg пројекта: www.ffmpeg.org