

PERFORMANSE PRIJENOSA DIGITALNO KOMPRIMIRANE (MPEG) SLIKE REALNIM PRIJENOSNIM SUSTAVIMA

Performance of Digitally Compressed (MPEG) Picture Transmission via Real Transmission Systems

UDK 621.3:681.31

Izvorni znanstveni članak
Original scientific paper

Sažetak

MPEG je jedna od najpopularnijih serija standarda za video/audiokompresiju, pogodnih za različite aplikacije, ali temeljenih na sličnim principima. Ako se MPEG komprimirani videosignal treba prenijeti do udaljenog korisnika, na raspolaganju su različite mrežne tehnologije, primjerice ATM i IP, pri čemu je od interesa osigurati potrebnu kvalitetu usluge, i to uporabom najekonomičnije tehnologije na raspolaganju. Da bi se to ostvarilo, potrebno je nadzirati parametre kvalitete usluge na razini relevantne prijenosne tehnologije (kakvi su npr. varijacije kašnjenja i gubitak podatkovnih jedinica protokola kojim se koristi – okvira, ćelija ili paketa), i odabrati odgovarajuće metode za njihovo držanje na razini koju (zbog smanjenja redundancije) osjetljivi komprimirani MPEG niz može tolerirati. S tim u vezi, u ovom je radu, s jedne strane, predstavljen primjer tehnika mjerenja i testiranja prijenosnog sustava (ATM), a s druge strane, dostignuta je perceptualna kvaliteta prenesenoga MPEG signala, a zatim su doneseni odgovarajući zaključci o razini utjecaja gubitaka podataka u mreži na kvalitetu primljenog videosignala.

Ključne riječi: MPEG, video, kompresija/gubici podataka, kvaliteta usluge, ATM.

Abstract

MPEG is one of the most popular families of audio/video compression techniques, suitable for different applications but still based on similar principles. If an MPEG compressed video signal is to be transmitted to

the remote user, various network technologies are available, such as eg. ATM and IP, where it is of interest to provide the needed quality of service (QoS) still using the most economical technology available. In order to accomplish that goal, it is necessary to monitor the QoS parameters of the relevant transmission technology (such as eg. delay variation and loss of protocol data units – frames, cells and packets), and then select appropriate methods for keeping the parameters values at the level that the vulnerable (due to reduction of the redundancy) compressed MPEG stream can tolerate. With this respect, in this paper, from one point of view, the example of test and measurement techniques as applied to the transmission system (ATM), and from another point of view, the achieved perceptual quality of the transmitted MPEG signal, have been considered, and the appropriate conclusions made about the degree of the impact of network packet loss on the quality of the received video signal.

Key words: MPEG, video, data compression/loss, quality-of-service (QoS), ATM

I. Uvod

Introduction

Zanimanje za digitalne komunikacije temeljene na visokokvalitetnom videosignalu postoji već više godina, kako za poslovne, tako i za primjene u zabavnoj industriji, a osobito u sredinama kojima se komunikacijska infrastruktura zasniva na razvijenoj lokalnoj komunikacijskoj mreži, kao što je to kod velikih brodova, gdje cijeli konglomerat međusobno često i ne previše kompatibilnih komunikacijskih usluga, unutar same lokalne sredine i prema vanjskom svijetu, treba

* prof. dr. sc. Vlatko Lipovac, Sveučilišta u Dubrovniku

** mr. sc. Jasmin Mušović, Regulatorna agencija za komunikacije BIH, Sarajevo

međusobno povezati na najefikasniji i najfleksibilniji način. S tim u vezi, jako je izražen interes za prijenos videoaplikacija u poslovne svrhe preko IP skupa protokola, i to kako preko *intraneta* jedne kompanije, tako i preko globalne mreže Interneta [1], [2] [3]. U zadnje se vrijeme uz tradicionalne videokonferencije velika pozornost pokazuje i aplikacijama kao što su učenje na daljinu, telemedicina i slično. Kako mobilne komunikacije postaju okosnica modernom životu, sljedeći je korak omogućiti podršku mobilnim multimedijским aplikacijama.

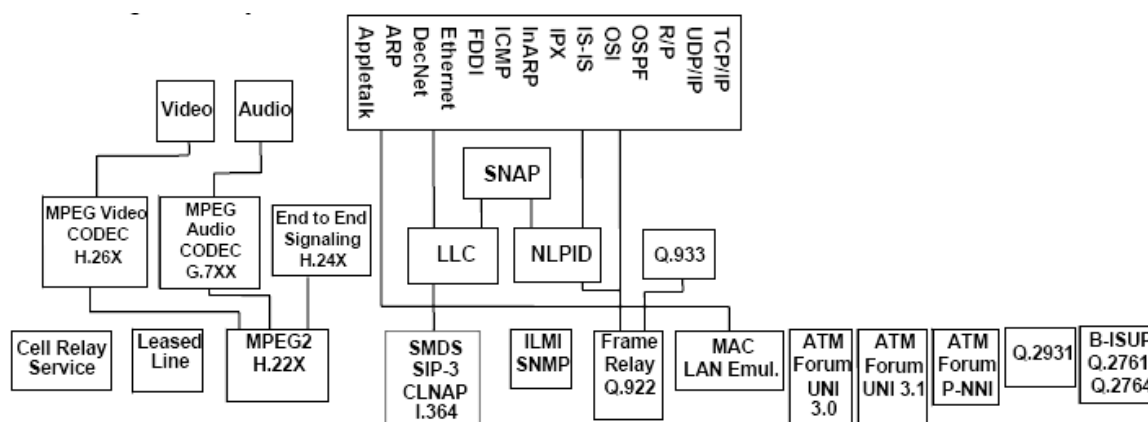
Današnja razina implementacije tehnologija digitalne obrade signala, kao i širokopojsnih prijenosnih sustava, kakav je, primjerice, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ili, pak, fiberoptička mreža gigabitskih usmjerivača (*router*), omogućuje uporabu digitalnog videa na svim razinama i topologijama informacijskih sustava.

A. Prijenosne tehnologije i mrežni protokoli

Transmission Technologies and Network Protocols

Najpopularnija mrežna arhitektura je TCP/IP premda, s gledišta ostvarive ciljane kvalitete usluge (*quality-of-service* – QoS), najšire zastupljena zrela tehnologija za prijenos digitalnog videosignala u praksi i dalje ostaje vrlo konekcijski orijentirani protokol ATM, s fiksnom duljinom okvira – ćelije, od 53 bajta. Međutim, već su odavno razvijene i sve više se primjenjuju metode osiguranja QoS i u nekonekcijskim IP (*Internet Protocol*) mrežama. Ipak, kako se vidi na slici 1., nema univerzalnog rješenja za sve aplikacije i formate videosignala, pa je projektantu i dalje aktualan zadatak identificirati kriterije izbora optimalnog rješenja prijenosne tehnologije za aplikaciju od interesa. Inicijalni ATM standardi pojavili su se krajem osamdesetih godina prošloga stoljeća, a sredinom devedesetih ta je tehnologija dostigla vrhunac razvoja i standardizacije. Premda u zalasku (pod pritiskom novih Gigabit Ethernet *all-IP* arhitektura), ATM se još uvijek široko upotrebljava za prijenos digitalnog videosignala, a projektiran je da, istodobno, u jednoj mreži, osigura

ispunjavanje veoma različitih QoS zahtjeva. Primjerice, prijenos podataka (*e-mail*, *web*, *file transfer*) osjetljiv je na gubitke podataka pri prijenosu, dok kašnjenje i varijacije kašnjenja (*jitter*) imaju manje značenje. Suprotno tomu, prijenosu signala govora i videa smeta kašnjenje i *jitter*, dok su bitske pogreške i gubitak podataka manje važni. Povijesno gledano, za ta tri tipa usluga razvijane su posebne mreže, pa je ATM nastao da podrži sva tri tipa prometa istovremeno u jednoj mreži, što se temelji na strukturi ćelije, fiksne duljine, kao osnovne jedinice ovoga protokola, pogodne za prijenos i videopodataka komprimiranih MPEG-2 standardom u transportni niz. Uz diferenciranu QoS podršku ATM omogućuje dobru procjenu zahtijevanog kapaciteta mreže, za svaki profil prometa. Međutim, zbog statističkog multipleksiranja kojim se koristi u ATM mrežama, moguća su oštećenja ATM ćelija kratkotrajnim preopterećenjem mreže ili zbog nesavršenosti prijenosa kao što su: kašnjenje i varijacije kašnjenja, gubitak i pojava neželjene ćelije i ćelije s bitskim pogreškama. Efikasno upravljanje kvalitetom servisa osnovna je prednost ATM tehnologije. Ostvaruje se kroz ATM adaptacijske slojeve, upravljanjem pristupom mreži i uobličavanjem prometa. Za prijenos MPEG-2 digitalnog videosignala koristi se ATM adaptacijskim slojevima AAL-1 i AAL-5, pri čemu je AAL-1 projektiran tako da simulira pseudosinkronu vezu u asinkronoj ATM mreži, jer MPEG-2 zahtijeva konstantno kašnjenje kako bi se održala sinkronizacija između kodera i dekodera [4]. AAL-1 omogućuje prijenos vremenskih referentnih oznaka (*timestamp*) kako bi se održao konstantan protok, primjenom algoritma tzv. sinkronoga obilježavanja preostalog vremena (*Synchronous Residual Time Stamp* - SRTS). Za prijenos MPEG-2 koristi se adaptivnom rekonstrukcijom takta (*Adaptive Clock Recovery* – ACR), koja se temelji na odvajackim memorijama (*buffer*) na prijemu. Za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka pri prijenosu koristi se *Reed-Solomon* kodom, tako da je moguć ispravak 4 od 128 ćelija ili 2 od 128 bajtova. Prema tome, možemo zaključiti da je MPEG-2 promet vrlo dobro zaštićen od gubitka podataka i *jittera* [4]. Za razliku od drugih prijenosnih



Sl.1. Komunikacijski protokoli za prijenos videosignala
Communications protocols for video signal transmission

rješenja koja obično žrtvuju kvalitetu za brzinu prijenosa, ATM odlično podržava prijenos malih paketa govora ili podataka, te osigurava mnoge upravljačke mogućnosti, kao što su pregovaranje o širini opsega.

S druge strane, prijenos MPEG kodiranog videa IP mrežama je vrlo aktualna tema premda originalni IP nije baš pogodan za prijenos videosignala jer uslugu paketskog prijenosa nudi po principu "najboljeg pokušaja", što znači da, ako iz bilo kakva razloga mreža nije u mogućnosti isporučiti paket, on se odbacuje. Osim toga, IP nema ugrađenu QoS strukturu kojom se jamči dodjela propusnog opsega i potrebne karakteristike prijenosa. Osnovni je problem vremenska osjetljivost multimedijalnog prometa na prijenos IP sustavom kakav je projektiran za prijenos podataka (koji ne zahtijevaju isporuku u realnom vremenu). U biti, IP je nekonekcijski protokol za rutiranje; ispitivanjem različitih dijelova IP adrese donosi se odluka o rutiranju kroz mrežu, pri čemu se ne garantira isporuka podataka, već se taj zadatak ostavlja gornjem sloju OSI-ISO modela (*Transport Control Protocol* – TCP), koji je konekcijski, pa osigurava pouzdan prijenos svih datagrama u mreži. Ako su podaci oštećeni pri prijenosu, TCP osigurava mehanizme za ponovni prijenos i zadržavanje ispravnog redoslijeda dijelova podataka. *User Datagram Protocol* - UDP je nekonekcijski protokol istoga sloja projektiran za servise gdje ponovni prijenos podataka nema smisla, što je tipično kad su u pitanju servisi u realnom vremenu. *Real-Time Transport Protocol* - RTP služi za enkapsulaciju servisa u realnom vremenu i sadržava mehanizme za označavanje redoslijeda podataka i vremenskih oznaka paketa. Primjenom *Real-Time Transport Control Protocol* – RTCP, predajnik dobiva izvještaj o performansama mreže, tako da može postići svoje performanse i prioritet odlaznog prometa. *Network Time Protocol* - NTP omogućuje da se svi mrežni uređaji koriste istim vremenskim taktom (s rezolucijom od 1ms). Niži komunikacijski slojevi (fizički i mrežni) nisu definirani u kontekstu tih protokola i mogu se temeljiti na Ethernet, MPLS ili ATM tehnologiji. Bitno je da su sposobni upravljati mrežnim resursima tako da se zadovolji zahtijevani QoS, tj. da osiguraju dovoljan kapacitet kako bi se izbjegla zagušenja.

Implementacija QoS na Internetu je od bitnoga značenja jer Internet postaje univerzalna platforma za multiservisne aplikacije. Prema tome, sustavi za rezervaciju i upravljanje resursima koji omogućuju garantirani ili statistički QoS, od posebnog su značenja. Međutim, i u suvremenim mrežama postoje mnoge dionice na kojima nije moguće postići garantirani QoS. U takvim okolnostima važni su adaptivni mehanizmi (skaliranja i filtriranja) radi odluke koje je podatke potrebno prezentirati korisniku, a koji mogu biti odbačeni.

B. Zahtjev za kvalitetu usluge (QoS) videosignala

Demand for video QoS

Videoprijenos ima značajno povećane i drugačije zahtjeve za kvalitetu usluge od uobičajenog prijenosa podataka, kakvi su elektronička pošta, prijenos datoteka itd. Već je odavno prošlo vrijeme videokonferencija s

nesinkroniziranim govorom i slikom, te neugodnim kašnjenjem. Današnje poslovne aplikacije zahtijevaju mnogo višu kvalitetu, kao posljedica imperativa podrške prijenosu videosignala i signala govora poslovnim mrežama i Internetom, te aplikacijama za prijenos podataka Internetom i intranetom, na osnovi prioriteta. QoS podrazumijeva garantiranu brzinu na zahtjev (minimalnu, srednju i vršnu), ali i predvidivo (malo) kašnjenje s kraja na kraj veze, te malu varijaciju kašnjenja (*jitter*) i gubitke osnovnih jedinica protokola (blok, ćelija, okvir, paket). Odgovarajuća razina QoS nije više potrebna samo radi spomenutih aplikacija koje zahtijevaju prijenos u realnom vremenu nego i samih aplikacija prijenosa podataka, kako mreže postaju zagušene i sve više integrirane (na korporacijskoj i na internetskoj razini). Dakle, za prijenos videosignala u realnom vremenu obično ne možemo koristiti metodom "snimi i prosljedi", osim kad raspoložemo vrlo brzim mrežama s velikim brojem poslužitelja i odgovarajućim memorijskim kapacitetima.

Za poslovne videoaplikacije već dulje vrijeme postoje standardi, u obliku već klasične preporuke Međunarodne unije za telekomunikacije: ITU-T H.261/H.262 (pod krovom preporuke H.320). Tijekom devedesetih godina prošloga stoljeća ITU-T je odobrio nekoliko familija standarda za multimedijske aplikacije temeljene na LAN/Internet/Intranet topologijama. Aktualni krovni standard je H.323 [7].

Dva novija standarda su za podršku IP-temeljenoj multimediji (H.323) i mobilnoj telefoniji (H.324), kojih aplikacije uključuju i videofon, PC multimedijske aplikacije, jeftine modeme za prijenos govora i podataka, internetske preglednike s videom uživo, video sigurnosne sustave i slično.

II. Kompresija podataka

Data Compression

Potrebne brzine prijenosa za najjednostavnije digitalizirani videosignal kreću se u opsegu od 140 Mbps (za standardne formate PAL, NTSC, SECAM) do 1 Gbps (za televiziju visoke rezolucije - HDTV). Međutim, propusni opseg raspoloživih komunikacijskih kanala je od 9,6 kbps za GSM kanale do 1 Gbps za gigabitski Ethernet. Očito, potrebne brzine prijenosa podataka još su uvijek veće od mogućnosti koje pružaju pojedini realni telekomunikacijski sustavi. Tako velike razlike među performansama različitih kanala mogu biti problem za videokonferencije ako se koristi pristupnim kanalima različitih karakteristika. Primjerice, brzina prijenosa videokonferencije između tri sudionika od kojih se dva terminala koriste Ethernet pristupnim kanalom, a treći ISDN kanalom, mora biti ograničena na 128 kbps, ili treći korisnik neće uopće dobiti videoinformaciju. Takve teškoće heterogenih mreža rješavaju se različitim metodama kodiranja (tj. različitim brzinama kodiranja i prijenosa, ali i različitom kvalitetom).

Kompresija podataka način je kodiranja digitalnog audija i videa pri uporabi manje podataka, što omogućuje pohranjivanje manje količine podataka za određenu izvornu informaciju, te manju potrebnu širinu opsega pri

prijenosu podataka u realnom vremenu. Algoritmi za kompresiju smanjuju te vrijednosti 100 i više puta, pa se primjenjuju u arhiviranju i prijenosu videosignala ograničenim brzinama prijenosa, što, u biti, nameću svi realni prijenosni sustavi. Postoje mnogi efikasni kodovi koji mogu poslužiti da bi se smanjila ili eliminirala redundancija signala, primjerice Huffmanov kod ili Shannonov kod (školski primjeri na koje upućuje prvi Shannonov teorem o kodiranju informacijskog izvora, što je jedan od temelja teorije informacija). Kad se pravilno upotrebljavaju, te su tehnike potpuno reverzibilne, tako da su podaci poslije dekompresije identični onima koji su bili na ulazu u sustav. Takva kompresija poznata je kao proces bez gubitka (informacija). Dobar je primjer toga koda arhiviranje kompjutorskih datoteka PKZip-om, koje predstavlja kompresiju bez gubitaka.

Naravno, bilo bi idealno koristiti se kompresijom bez gubitaka, ali ona najčešće ne osigurava dovoljan stupanj redukcije količine podataka potreban za video i audioaplikacije. Ako eliminacija redundancije ne smanjuje količinu podataka koliko je to potrebno, onda neki podaci moraju biti izgubljeni.

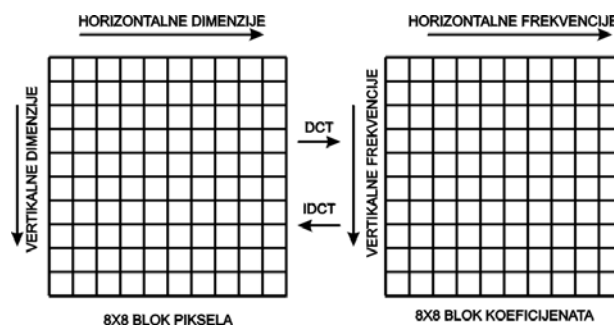
A. MPEG standardi

MPEG standards

Najpoznatiji standard za kompresiju je ISO *Moving Pictures Experts Group* - MPEG, a slijede standardi H.261 i H.263. Postoji i više nestandardnih metoda koje pojedini proizvođači opreme ugrađuju u svoje vlastite sustave. MPEG-1 je bio prvi međunarodni standard kompresije pokretnih slika i razvijen je između 1988. i 1992., a zamrznut 1991. godine, kada počinje proces definiranja MPEG-2 standarda, koji to postaje 1994. godine, s vrlo jednostavnim početnim ciljevima kodiranja slika, standardne definicije. Fleksibilnost MPEG-2, potaknuta raspoloživim elektroničkim krugovima visoke integracije, pridonijela je uporabi MPEG-2 u različitim aplikacijama, čemu treba dodati i neuspjeh MPEG-3 standarda, koji je bio zamišljen za televiziju visoke rezolucije, ali je ubrzo napušten kad je postalo jasno da MPEG-2 može relativno lako nadomjestiti i tu traženu funkcionalnost. Ubrzo poslije objave/napuštanja MPEG-3, pristupilo se radu na MPEG-4 standardu, s namjerom da se postavi standard za kodiranje video i audiosignala pri veoma niskim brzinama, s potpuno novim konceptom kodiranja multimedije i moćnim alatima za interaktivan rad, te širokom primjenom.

MPEG-2 kompresor identificira korisne dijelove signala, koji se nazivaju *entropija*, i šalje ih u kanal, sve do dekodera. Ostatak signala naziva se *redundancija* (suvišnost) jer se može izvesti iz onoga što je primljeno u dekoderu. Videokompresija oslanja se na osnovne pretpostavke da je ljudska osjetljivost na šum u slici, u stanovitoj mjeri, ovisna o učestalosti šuma, te da čak i pokretne susjedne slike imaju poprilično zajedničkih

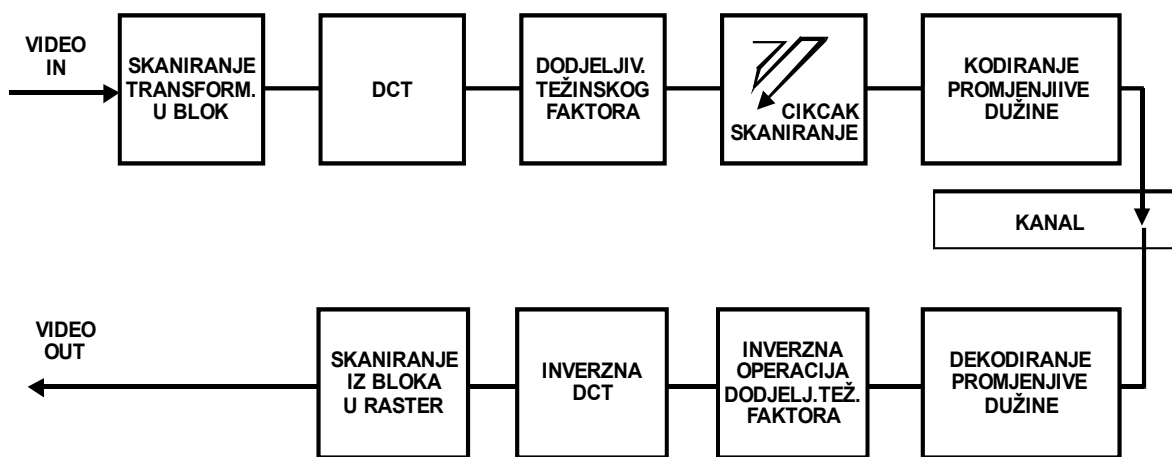
detalja, pa se podaci mogu komprimirati ili tako što će se povećati nivo šuma gdje je manje vidljiv, ili slanjem samo razlike između jedne slike i njezine sljedbenice. U tipičnoj slici, veliki objekti rezultiraju manjim *prostornim frekvencijama*, a mali objekti daju visoke prostorne frekvencije. Ljudsko osjetilo vida detektira šum u nižim prostornim frekvencijama mnogo jasnije nego pri višima. Primjerice, ako slika sadržava velike jednostavne objekte, visoke su frekvencije samo na rubovima. MPEG analiza dvodimenzionalnih prostornih frekvencija obnavlja se s pomoću diskretne kosinusne transformacije. Skupina elementarnih dijelova slike - *piksela* (*picture element – pixel*), obično 8x8, pretvara se u skupinu *koeficijenata* kojima amplitude predstavljaju koliko se puta određena prostorna frekvencija pojavljuje. Slika 2. prikazuje kako u rezultirajućem bloku koeficijenata gornji lijevi koeficijent predstavlja "istosmjernu" komponentu, to jest srednju osvijetljenost bloka piksela. Idemo li desno i prema dolje, koeficijenti predstavljaju veće frekvencije, pa koeficijent u donjemu desnom kutu predstavlja koeficijent najveće dijagonalne frekvencije.



Sl. 2. Diskretna kosinusna transformacija - iz rastera u blok koeficijenata

Discrete cosine transform – from raster to block of coefficients

U stvarnome programskom videomaterijalu mnogi koeficijenti mogu imati zanemarive vrijednosti, što samo po sebi daje dovoljno kompresije za neke aplikacije. Daljnja se kompresija postiže skraćivanjem ili zaokruživanjem duljine riječi preostalih koeficijenata, smanjenjem njihove rezolucije i dopuštenim povećanjem šuma (na način koji smanjuje njegovu vidljivost, dakle ovisno o prostornoj frekvenciji). Prije zaokruživanja, koeficijentima se zadaje težinski faktor, koji je funkcija njihovih prostornih frekvencija. Više prostorne frekvencije množe se većim težinskim faktorima, što naglašava visokofrekvencijski šum koji je manje vidljiv od šuma u niskofrekvencijskom području. U dekoderu se obavlja inverzni proces. Tako se koeficijenti velikih vrijednosti većinom nalaze u gornjemu lijevom kutu, dok su ostali zanemarive vrijednosti. Zato je pogodno slati koeficijente u cikcak-sekvencama, s početkom od gornjega lijevog kuta, tako da se značajni koeficijenti šalju prvi - slika 2.



Sl. 3. Unutarnje MPEG kodiranje prve slike u skupini
Inner MPEG coding of the first picture in the group

Slika 3. prikazuje tzv. unutarnje MPEG kodiranje prve slike u skupini. Ulazna se slika digitalizira, pa se konvertira iz rasterske u blokovsku, a zatim se blokovi transformiraju diskretnom kosinusnom transformacijom (DCT). Dobiveni se koeficijenti onda skaniraju u cikcak i dodjeljuju im se težinski faktori, prije kvantiziranja (radi skraćivanja kodne duljine), nakon čega se primjenjuje kodiranje s promjenjivom duljinom kodne riječi. Na slici 3. prikazana je i prijemna, dekoderska strana; ona inverznim slijedom od opisane obrade proizvodi blokove piksela koji se spremaju u RAM s ostalim blokovima, tako da se, jednoznačnim čitanjem memorije, obnavlja rasterska slika.

Za pokretne slike, korištenje redundancijom između slika daje veći faktor kompresije. U jednostavnom međukodiranju, poslije početne slike koja je kodirana unutarnjim kodiranjem sljedeće se slike opisuju samo na temelju razlika od prethodnih. Dekoder dodaje razlike na prethodnu sliku i proizvodi novu. Slika razlike, koja se proizvodi razlikom svakoga piksela jedne slike u odnosu prema odgovarajućem pikselu sljedeće slike, analogno se komprimira DCT procesom.

Izlaz jednog MPEG audio ili videokodera naziva se osnovnim nizom. Radi pogodnosti obrade, osnovni se niz može razbiti u blokove manje veličine, formirajući na taj način tzv. paketizirane osnovne nizove (*Packetised Elementary Stream* – PES). Ti paketi podataka trebaju sadržavati zaglavlje koje će identificirati početak paketa, te sačuvati vremensku referenciju, jer paketizacija "iskrivljuje" vremensku os. Nakon formiranja PES-ova promjenjive duljine, oni se enkapsuliraju u pakete fiksne duljine (TS), što je sve praćeno ubacivanjem nekodiranog zaglavlja ispred svake informacijske jedinice (sekvence, skupine slika, slike, "kriške", TS i PES). Ako nastupi oštećenje zaglavlja, informacija je iza njega izgubljena.

B. Problemi s kompresijom

Compression problems

MPEG-2 komprimirani video ima nizak nivo tolerancije gubitaka podataka jer je, kako smo vidjeli, transportni niz

iznimno kompleksna struktura. U koderu se provodi intenzivna obrada signala kako bi se otklonila redundancija iz bitskih nizova, tako da je sve što je preostalo, od velikog značenja, to više kada se mrežni kapaciteti dijele sa sporadičnim internetskim prometom ili, u još nepovoljnijem slučaju, ako IP mreža prenosi i govor - VoIP. Prijenos MPEG-2 niza zahtijeva konstantno kašnjenje u mreži, što znači da *jitter* koji uvode IP mreže mora biti uklonjen ili u tzv. *set-top* kutijama u širokopojasnim mrežama ili na krajnjemu terminalnom uređaju u kabelskim sustavima. Iako je to relativno jednostavan proces, on podrazumijeva dodatne troškove uređaja i, što je još važnije, unosi dodatna kašnjenja.

Problemi sinkronizacije, kao što su gubitak ili narušavanje integriteta sinkrouzorka, mogu spriječiti prijam cijeloga transportnog niza. Neusklađenosti u implementaciji protokola transportnog niza mogu spriječiti dekoder da nađe sve programske podatke, pa je npr. isporučena slika, ali ne i zvuk. S druge strane, ako je sam prijenos bez pogrešaka, ali postoji značajan *jitter*, mogu se pojaviti problemi u vremenskoj domeni na dekoderu.

MPEG kompresija proces je kodiranja s gubicima jer dekodirani sadržaj nije identičan originalu. Entropija se izvora mijenja, pa kad je ona visoka, sustav za kompresiju može ostaviti vidljive produkte prilikom dekodiranja. U vremenskoj kompresiji uzima se u obzir redundancija između susjednih slika, pa kad se ona iznenada smanji, sustav ne radi dobro. Dobar primjer za to je video s neke konferencije za tisak na kojoj su često svijetlili blicevi, jer se svaka slika koja sadržava blic, potpuno razlikuje od susjednih slika, pa produkti kodiranja moraju postati očit. Dodajmo još i to da su, s gledišta perceptualnoga subjektivnog doživljaja korisnika, produkti kompresije više ometajući nego konstantne smetnje u prijenosnim sustavima analogne televizije. Jedino je rješenje tih problema smanjenje faktora kompresije. Zbog toga se mora dobro procijeniti što se dobiva visokom kompresijom, a što gubi, zbog porasta razine neželjenih produkata.

III. Gubitak podataka

Data loss

A. Bitske pogreške

Bit errors

Podaci koji se prenose paketskim mrežama kao što su Internet i ATM, mogu biti podložni bitskim pogreškama i gubicima paketa; međutim, proces gubitka podataka jako ovisi o samoj aplikaciji i tipu mreže, te o prijenosnim protokolima. Bitske pogreške nastaju zbog loše interpretacije prenesenih podataka u digitalnim prijamnicima, najčešće zbog šuma tijekom prijenosa. Intenzitet bitske pogreške (*Bit Error Ratio* – BER) veoma je nizak u postojećim zemaljskim fiberoptičkim sustavima za prijenos (najviše 10^{-9}), ali je znatno veći i promjenjiv u satelitskim i radiomrežama, pa i u većini digitalne TV difuzije (*Digital Video Broadcasting* – DVB).

MPEG kodirani niz jako je osjetljiv na bitske pogreške u prijenosu. Metoda kodiranja definirana standardom MPEG-2, čini video niz osjetljivim na bitske pogreške jer se pogreška koja se pojavi u jednoj ćeliji, može proširiti kroz cijelu videosekvencu i vremenski i prostorno. Prostorna pogreška nastaje jer su kodovi promjenjive duljine riječi, koji tvore blokove, diferencijalni, pa ako je jedan kod izgubljen, dolazi do prostiranja pogreške do sljedećega (apsolutnog) kodiranja. U MPEG-2 nizu ta je točka na početku sljedećeg skupa videoblokova - kriške (*video slice*), pa bitska pogreška uzrokuje znatno dužu degradaciju kvalitete slike u jednom okviru [6]. U 25-30 okvira u sekundi, pogreška može postojati oko 0,5 s, što je dovoljno dugo da se očituje u najvećem broju slučajeva.

B. Gubitak okvira/ćelije i gubitak paketa

Frame/cell and packet loss

Međutim, kako je okvir (ili ćelija kod ATM prijenosa) osnovna jedinica podataka na drugom OSI sloju, intenzitet je gubitaka okvira (*Frame Loss Ratio* – FLR), to jest ćelija (*Cell Loss Ratio* – CLR), zapravo, od najvećeg značenja za kvalitetu dekodiranog videoniza. On ovisi o mnogim faktorima koji određuju i BER, ali i o tehničkoj komutaciji, veličini *buffera* i broju preklonika kroz koji niz prolazi na jednoj konekciji, te o klasi QoS, definiranoj za aktualni servis, ali i o činjenici je li videoniz s konstantnom bitskom brzinom (*Constant Bit Rate* – CBR), ili promjenjivom (*Variable Bit Rate* – VBR). CLR je gotovo zanemariv u CBR konekcijama, ali se veoma teško određuje u VBR konekcijama. Međutim, neke studije dokazuju da je funkcija vjerojatnosti gubitaka ćelija veoma blizu uniformnoj, ali samo ako je brzina prijenosa mala u usporedbi s kapacitetom veze. Gubici ćelija u ATM mrežama često su rezultat zagušenja u preklonnicima. Uz odgovarajuće kontrole brzine prijenosa možemo ograničiti gubitak ćelija.

Na paketskoj razini veoma je teško predvidjeti kako se odvija proces gubitaka u mreži jer taj proces ovisi o mnogo različitih faktora koji se teško mogu predvidjeti, a takvi su, primjerice, zauzetost veze, odabrana pravila rutiranja, velike promjene kašnjenja i veličina odvajacke memorije (*buffer*). Gubitak paketa u IP mreži zapaža se

pri rekonstrukciji videomaterijala, tako da se uvijek nastoji smanjiti. Ponovni prijenos izgubljenog paketa najčešće nije rješenje, pogotovo kad se radi o *multicast* aplikacijama, kada se signal šalje prema više korisnika. Umjesto toga, ili se IP mreža mora konfigurirati i upravljati tako da isporučuje pakete s niskim intenzitetom paketske pogreške, ili se mora odabrati neka od metoda korekcije pogreške na prijamoj strani (*Forward Error Correction* - FEC). U IP mreži jako je teško statistički opisati pojavu gubitka paketa, pa i broj izgubljenih paketa u nizu (duljinu *bursta*), što se osobito odnosi na MPEG-2 niz. Zato gotovo sve studije i testovi prijenosnih sustava u ovome slučaju podrazumijevaju uniformnu distribuciju pri simulaciji procesa gubitaka, kako bi se obradili najlošiji slučajevi u vezi s kvalitetom MPEG-2 videosignala.

IV. Rezultati testiranja

Test results

U postupcima analize komunikacijskih sustava i mreža primjenjuju se analitičke i simulacijske metode, te mjerenje na realnim sustavima. Zbog ograničenih materijalnih resursa, u istraživanjima kojih rezultate prezentira ovaj rad, mjerenja na realnom prijenosnom sustavu (CARNET-ov ATM priključak Sveučilišta u Dubrovniku, STM-1, 155 Mbit/s) kombinirana su s programskim simulacijama ocjene perceptualne MPEG kvalitete usluge, kako bi se predstavio model analize jedne mrežne postavke prijenosa MPEG-2 komprimiranoga digitalnog video i audiosignala preko ATM mreže. (Ovaj praktični testni model nije uključio i IP prijenos.)

Cilj je bio praktično ispitati u kojoj mjeri izobličenja u ATM mreži (gubitak i varijacija kašnjenja ćelija...) mogu utjecati na MPEG kvalitetu usluge. Naime, koliko je god izvjesno da ustrojstvo OSI modela smanjuje mogućnost da se problemi na nižim prostiru i u višim slojevima protokola, a svakako najmanje na aplikacijskom sloju (servisa), realno okruženje i veoma zahtjevne aplikacije u realnom vremenu kreiraju potrebu da se ispita svaki segment u vertikalnom lancu, kako bi se dostignute performanse na svim razinama sjedinile i tako odredile integralnu kvalitetu krajnje (aplikacijske) usluge.

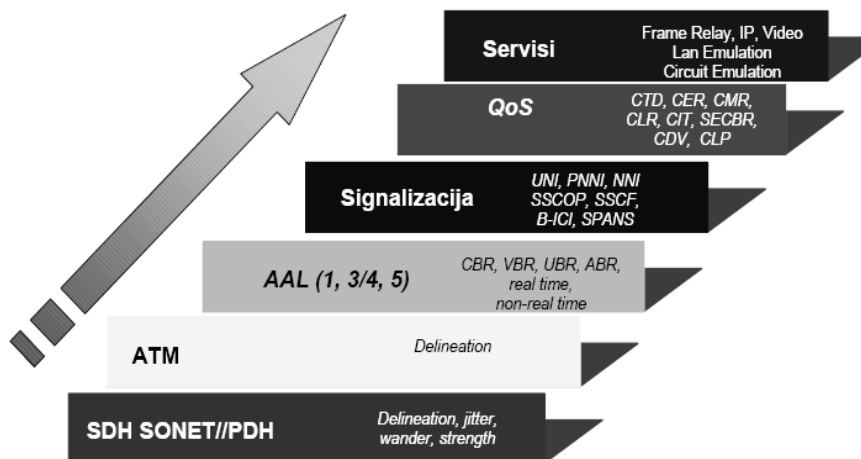
A. Testiranje ATM mreže

ATM network testing

Nekoliko je ključnih područja za testiranje ATM i viših slojeva kao što su: signalizacija (ustopava veze), usklađenost stvarnih parametara prometa s ciljnim (iz korisničkoga ugovora s pružateljem usluga), interoperabilnost, statistika prometa, te performanse po pojedinim slojevima protokola i same aplikacije (videoprijenos). Sljedeći tzv. *bottoms-up* model testiranja po OSI slojevima (sl. 4.) gdje se počinje najnižim (fizičkim medijem/prijenosom, linkom podataka, mrežnim ...) i nastavlja prema aplikacijskom sloju, prateći performanse i QoS individualnih slojeva, a posebice onih kojih se efekti prostiru na gornje slojeve, uz mjerenja tijekom rada sustava (*in-service*) provode se i mjerenja kad sustav ne prenosi realni promet (*out-of-*

service). To se postiže simulacijom mrežne ili korisničke strane, generiranjem odgovarajućega testnog prometa (s

tim ciljem, definirane su standardne testne ćelije, npr. ITU I.356).



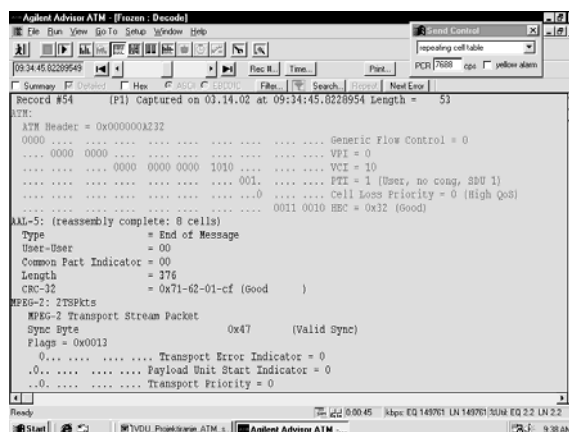
Sl. 4. Servisni slojevi za ATM referentni model (različit od OSI modela)
Service layers for the ATM reference model (different from the OSI model)

Mjereni su relativni broj ćelija s bitskim pogreškama (Cell Error Ratio - CER), varijacije kašnjenja ćelija (Cell Delay Variation - CDV) i relativni broj ćelija koje ne zadovoljavaju prometni ugovor (Non-Conforming Cells - NCC). Na slici 5. sumarno je prikazana dekodirana sekvenca ATM prometa, gdje se vidi da ga, između ostaloga, čini i MPEG-2 transportni niz - prva ćelija odozgo (broj 54 u bufferu analizatora), koja je potom i detaljno dekodirana – slika 6. i 7.

Uz ATM informaciju iz slika se vidi i sadržaj bajta “punjenja” (stuffing na sl. 7.), iz čega možemo verificirati da se radi o CBR kodiranju.

Cell	Time	VPI/VCI	AAL	PCOT	Description
(P1) 54	09:34:45.8226954	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU01 HEC=Good AAL-5: Type=EOM Len=176 CRC32=Good MPEG-2: 2TSPKts
(P2) 55	09:34:45.8230260	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P1) 56	09:34:45.8230260	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P2) 57	09:34:45.8231560	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P1) 58	09:34:45.8231560	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P1) 59	09:34:45.8232060	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P2) 60	09:34:45.8232861	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P2) 61	09:34:45.8234166	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P1) 62	09:34:45.8234166	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM
(P1) 63	09:34:45.8235466	0.10	5	5	ATM: CLP=High PTI=SDU0 HEC=Good AAL-5: Type=NotEOM

Sl. 5. Dekodirana sekvenca ATM prometa, kao verifikacija prisutnosti MPEG-2 (ćelija br. 54)
Decoded sequence of ATM traffic, as a verification of MPEG-2 presence (cell no. 54)

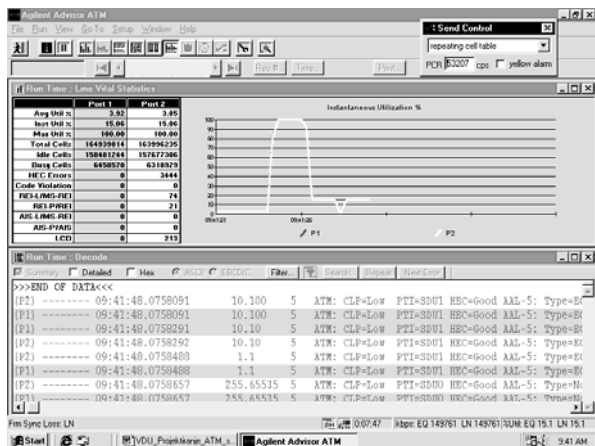


Sl. 6. Detalj dekodirane ATM ćelije s MPEG-2 sadržajem
A detail of decoded ATM cell with MPEG-2 content



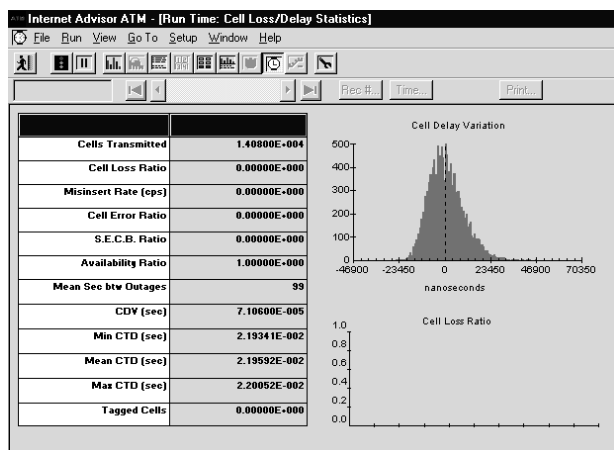
Sl. 7. Detalj dekodirane ATM ćelije s MPEG-2 (nastavak)
A detail of decoded ATM cell with MPEG-2 content (continuation)

Mjerenjima tzv. vitalne statističke analize, (sl. 8.) dobiva se ukupna slika prometa na ATM razini. Kako je stvarni promet na CARNET-ovu linku, u vrijeme mjerenja na Sveučilištu u Dubrovniku, bio vrlo malen (srednjeg iskorištenja opsega manjega od 4%, od čega vrlo malo MPEG-2 prometa), zaključili smo da, nažalost, na temelju mjerenja na realnom sustavu nećemo moći donijeti zaključke o praktičnoj performansi MPEG-2 pri prijenosu ATM sustavom.



Sl. 8. Statistička analiza ATM parametara prometa
Statistical analysis of ATM traffic parameters

No, da bismo ipak demonstrirali korisnost predloženoga mjernog modela, koristili smo se ugrađenim simulacijskim programom analizatora protokola, te mjerili CLR u vremenskoj korelaciji s CDV (sl. 9.).

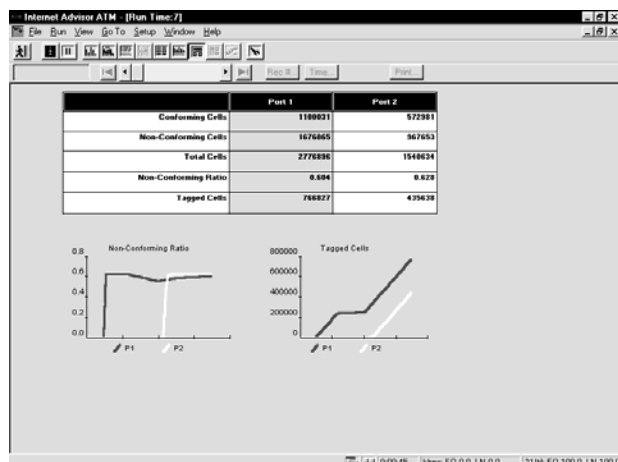


Sl. 9. Vremenski korelirani prikaz gubitaka i varijacije kašnjenja ćelija
Time-correlated cell loss and delay variation

Na slici je vidljivo da varijacije kašnjenja ćelija nisu dovele do gubitka ćelija. Međutim, to ne znači da se gubici neće dogoditi jer, premda izmjerene varijacije kašnjenja još uvijek ne dovode do gubitka ćelija, one ipak značajno smanjuju "margin" prema toleranciji kašnjenja sustava, koji time postaje podložan gubicima ćelija.

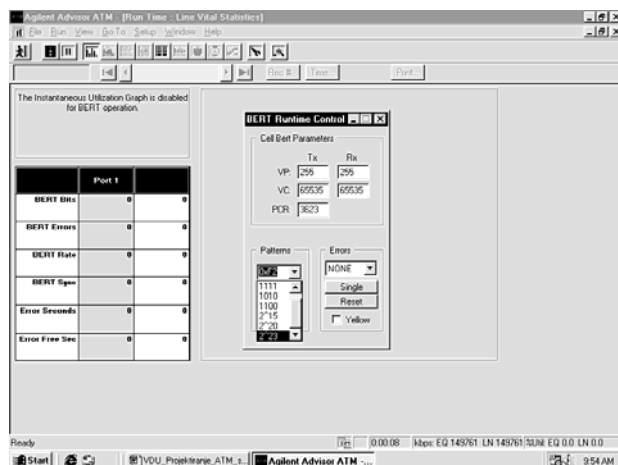
Na slici 10. predstavljeni su rezultati testiranja (hardwareske simulacije) QoS niza ćelija, gdje se vidi

koliko ATM prometa nije u skladu s QoS zahtjevima iz prometnog ugovora.



Sl. 10. Klasifikacija ćelija u odnosu prema postavljenim QoS ciljevima
Classification of cells with respect to the established QoS goals

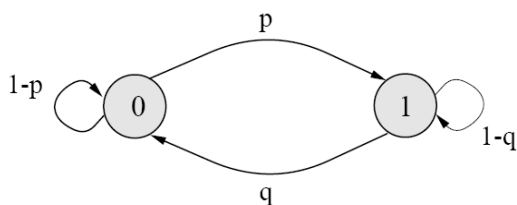
I konačno, na slici 11. predočeno je konfiguriranje analizatora protokola za mjerenje BER (injekcijom pseudoslučajne sekvence u odabranom ATM virtualnom kanalu).



Sl. 11. Konfiguriranje analizatora protokola za BER mjerenja

Configuring of the protocol analyzer for BER measurements

Međutim, budući da je riječ o *out-of-service* mjerenju (na pseudoslučajnoj, mjernim instrumentom generiranoj sekvenci, a ne na "živom" prometu), a s obzirom na već spomenutu uočenu vrlo nisku razinu MPEG sadržaja u realnom prometu, BER mjerenja nisu ni izvršena na realnom ATM sustavu, već s pomoću programske simulacije, pri čemu je generator gubitaka simuliran po modelu Markovljeva lanca (Gilbertov model, sl. 12.) [6], uzimajući vrijednosti intenziteta prometa vremenskih uzoraka iz prethodnog mjerenja na ATM mreži.



SI. 12. Markovljev lanac s dva stanja: Gilbertov model

Two-state Markov chain: Gilbert model

B. Mjerenje kvalitete videosignala

Measurements of the video signal quality

Kvaliteta primljene slike ovisi o više različitih faktora, kakvi su, u prvom redu, sadržaj slike, algoritam kodiranja i karakteristike prijenosnog kanala. Mjere kvalitete slike mogu se podijeliti na objektivne i subjektivne, gdje se ove druge temelje na subjektivnim procjenama određenih sekvenci slika, što je vremenski vrlo zahtjevno i nije sustavno ponovljivo. Uobičajeni princip objektivnog mjerenja proračun je zbroja kvadrata razlike između svih piksela primljene i originalne slike, gdje razlikujemo normiranu srednju kvadratnu pogrešku (*Normalized Mean-Square Error* - NMSE) i vršnu vrijednost odnosa snaga signala i šuma:

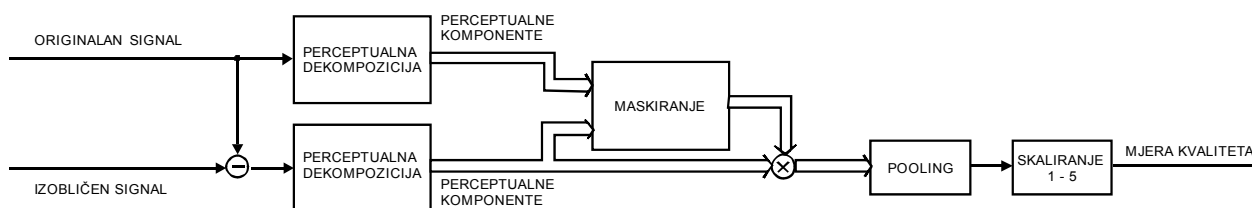
$$NMSE = \frac{\sum_{i,j}^{M,N} (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2}{\sum_{i,j}^{M,N} x_{ij}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{|x_{p-p}|^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i,j}^{M,N} (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2} [dB] \quad (2)$$

respektivno, pri čemu su x_{ij} vrijednosti piksela originalne slike, \hat{x}_{ij} vrijednosti piksela rekonstruirane slike, a x_{p-p} je vršna vrijednost piksela originalne slike (najčešće jednaka 255, za 8-bitnu prezentaciju slike).

Te dvije mjere mogu se jednostavno ugraditi u sustave za provjeru kvalitete usluge; međutim, ljudsko je osjetilo vida neosjetljivo na neke pojave pogreški, tako da se tim mjerama jednako značajnim uzimaju u obzir i neke perceptualno ne baš značajne devijacije dekodiranog videosignala, u odnosu prema originalnom, čak i kada pogrešku uopće ne zapaža ljudsko oko. Zbog toga se, slično kao kod audiosignala (primjerice u prijenosu govora Internetom), u praksi koristi takvim modelima procjene kvalitete videosignala koji su u korelaciji s perceptualnim doživljajem na temelju ljudskoga vida.

Jedan takav model (to jest na njemu temeljen programski alat) upotrijebili smo i u procjeni kvalitete rekonstruiranoga videosignala (sl. 13.).



SI. 13. Blok-dijagram mjerenja kvalitete pokretnih slika (*Moving Pictures Quality Metric* - MPQM)
Block-diagram for measuring the quality of moving pictures (Moving Pictures Quality Metric - MPQM)

U modelu se prvo obavlja dekompozicija (parametarskim kodiranjem) originalne sekvence i njezine prijenosom deformirane verzije, u perceptualno značajne komponente, uzimajući u obzir osjetljivost kontrasta i proces maskiranja, da bi se, zatim, procijenila kvantitativna mjera kvalitete pokretnih slika MPQM (*Moving Pictures Quality Metric*), skalirana od 1 do 5 (što odgovara opisnim ocjenama *loš*, *slab*, *dobar*, *vrlo dobar* i *odličan*, respektivno), analogno standardnoj subjektivnoj procjeni u TV inženjerstvu.

C. Eksperimentalni model MPEG-2 koder

Experimental model for the MPEG-2 coder

MPEG-2 koder, promjenjive bitske brzine niza, simuliran je programski, a korištene su 4 ulazne sekvence ("Vijesti", "Ribe", "Skijaš" i "Barcelona") s po

100 okvira, usklađene s ITU-T 601 formatom [7], te kodirane kao poluslike, sa strukturom od 12 slika po grupi (GOP) i 2 B-slike između svake dvije referentne slike, a enkapsulirane u 18800-bajtna PES-ove i podijeljene u nizove, fiksne duljine [7]. Stanja 0 i 1 odgovaraju korektnom ili nekorektnom prijemu paketa, respektivno, a brzina prijelaza iz jednog stanja u drugo određuje duljinu *bursta* (višebitske) pogreške. Dakle, imamo tri veličine koje treba mjeriti: duljinu izgubljenog paketa (*Packet Loss Size* - PLS), intenzitet izgubljenih paketa (PLR) i srednju duljinu *bursta* pogreške (*Average Burst Length* - ABL). Iz uzoraka podataka prethodnoga mjerenja iskoristili smo one koji simuliraju proces s ABL=1, transportne pakete od 188 bajta i PLR između 10^{-2} i 10^{-7} . Kvaliteta videosignala procijenjena je s pomoću MPQM programskog alata.

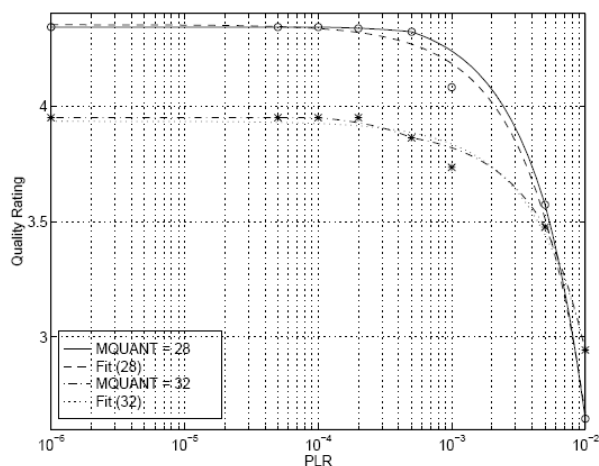
Ciljevi eksperimentalnog istraživanja uključuju ispitivanje video QoS i moguće srednje brzine kodiranja,

u funkciji PLR, ali i stupnja kvantizacije koeficijenta u MPEG-2 koderu s promjenjivom bitskom brzinom.

V. Utjecaj gubitaka podataka na kvalitetu videosignala

Impact of data loss on the video signal quality

Utjecaj uniformno distribuiranih gubitaka paketa transportnog niza TS na kvalitetu videosignala predstavljen je na slici 14. Vidi se da se za danu vrijednost stupnja kvantizacije (MQUANT) koeficijenta (koja određuje i srednju bitsku brzinu), MPQM uopće ne mijenja s povećanjem PLR, sve do neke granične vrijednosti PLR (koja je to veća što je manji MQUANT), od koje počinje brzo opadati. Kako je PLR jednak odnosu između broja izgubljenih paketa u sekundi i brzine paketa, slijedi da su za manju bitsku brzinu (veći MQUANT) manji i gubici paketa, za fiksni PLR. Također, što je manji PLR, manji je i srednji broj izgubljenih paketa po okviru. Dakle, veći MQUANT ima za posljedicu i veći PLR, za jednaku degradaciju prijemnog signala (sl. 14.).

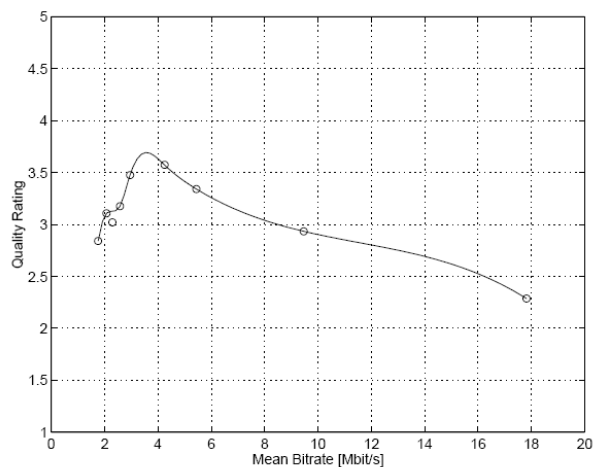


Sl. 14. Odnos MPQM i PLR za različite MQUANT kodirane sekvence "Skijaš"

Relationship between MPQM and PLR, for various MQUANT of the coded sequence "Skiman"

Iz gornje slike možemo zaključiti da, u prvoj aproksimaciji, za danu ulaznu sekvencu i fiksni MQUANT, videokvaliteta, usrednjena po cijeloj sekvenci, dijelom gotovo linearno opada s porastom PLR, iz čega proizlazi zaključak da su PLR i bitska brzina kodiranja (brzina paketa) međusobno čvrsto povezane u pogledu njihova utjecaja na videokvalitetu. Tako veća bitska brzina kodiranja proizvodi i višu videokvalitetu, ali samo dok je PLR manji od kritične vrijednosti, poslije čega videokvaliteta ubrzano opada. Zato, dijagram odnosa između kvalitete i bitske brzine kodiranja za neku realnu vrijednost PLR pokazuje optimalnu vrijednost brzine kodiranja, koja daje najvišu vrijednost do koje perceptualna kvaliteta najprije raste, a potom opada sa srednjom bitskom brzinom (sl. 15.). Optimalna srednja brzina izravno ovisi o kompleksnosti sekvence, a to

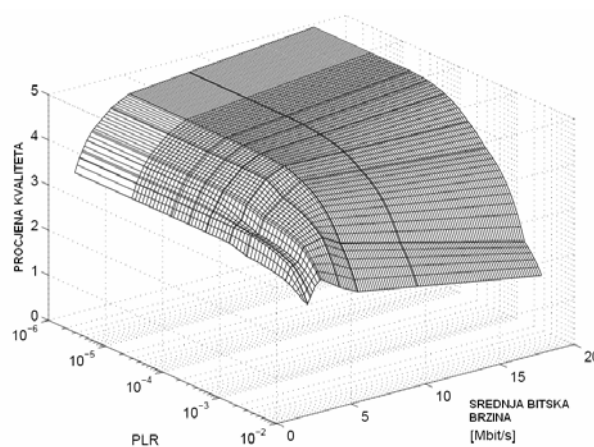
zapažanje od najveće je važnosti za izvedbu kontrolera brzine na mreži, te efikasnih algoritama za potiskivanje pogreški itd.



Sl. 15. Odnos MPQM i bitske brzine kodiranja za $PLR=5 \cdot 10^{-3}$ za ulaznu sekvencu "Skijaš"

Relationship between MPQM and coding bit rate, for $PLR=5 \cdot 10^{-3}$ and "Skiman" input sequence

Kombinirani efekt bitske brzine kodiranja i mrežnih smetnja (PLR) na primljene videopakete prikazuje graf na slici 16.



Sl. 16. Odnos MPQM, srednje bitske brzine i PLR, za ulaznu sekvencu "Barcelona"

Relationship among MPQM, average bit rate and PLR, for the input sequence "Barcelona"

Drugim riječima, kada korisnički orijentirana kvaliteta usluge nije dovoljno visoke razine, povećanje bitske brzine kodiranja, pri konstantnom PLR, može čak i degradirati kvalitetu primljenoga videosignala, ovisno o poziciji radne točke na predmetnom 3D grafiku. Optimalna bitska brzina, u određenim mrežnim uvjetima (tj. smetnjama), određuje se tako što se maksimizira kvaliteta prijemnog videosignala na strani korisnika.

Takav zaključak vrijedi ne samo za MPEG nego i za bilo koji drugi sustav kodiranja.

VI. Zaključak

Conclusion

Razmatrani su faktori utjecaja na kvalitetu videosignala prenesenoga suvremenom komunikacijskom mrežom. Najvažniji je pritom utjecaj bitske brzine kodiranja i gubitaka podataka u mreži, kojih je združeni utjecaj analiziran programskim simulacijama radi zaključnog razmatranja praktičnih performansi prijenosa MPEG digitalno komprimirane slike realnim prijenosnim sustavima. S tim u vezi verificirana je netočnost uobičajenog očekivanja da povećanje bitske brzine kodera izvjesno pridonosi poboljšanju kvalitete slike, jer je to striktno istinito samo za komunikacijske kanale bez gubitaka, dok u realnim sustavima funkcija kvalitete nije striktno rastuća kad su videopaketi podložni gubicima, te postoji optimalna vrijednost bitske brzine kodiranja koja održava kvalitetu primljenog videosignala na zadovoljavajućoj razini.

Literatura

References

- [1] J. Mušović, "Performanse prijenosa digitalno komprimirane (MPEG) slike realnim prijenosnim sistemima", magistarski rad, Univerzitet u Sarajevu, rujna 2005.
- [2] C. Ericsson, *Audio and Video for the Internet*, Addison-Wesley, Boston, 2002
- [3] J. Watkinson, *Convergence in Broadcast and Communications Media*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2001
- [4] G. Karlsson, "Asynchronous Transfer of Video", *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, pp. 118–126, August 1996
- [5] B. G. Haskell, A. Puri and A. N. Netravali, "Digital Video: an Introduction to MPEG-2", Digital Multimedia Standards Series, Chapman and Hall, 1997
- [6] P. Frossard and O. Verscheure, "MPEG-2 over Lossy Packet Networks - QoS Analysis and Improvement", *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 619–631, July 7, 1998
- [7] ITU-T H.323, *Packet based multimedia communications systems*, International Telecommunication Union Recommendations, 1998.

Rukopis primljen: 14. 11. 2006.



croatia lloyd d.d.
Z A R E O S I G U R A N J E