

SADRŽAJ:

<u>UVOD</u>	1
I. ISTORIJSKI RAZVOJ SLIKE I TELEVIZIJE	1
II. KRATAK OPIS CJELINA U RADU	2
<u>1. UVOD U DIGITALNU SLIKU</u>	4
1.1. NASTANAK SLIKE	4
1.2. FORMAT SLIKE	5
1.3. DIGITALIZACIJA.....	6
• JEDNODIMENZIONALNO ODMJERAVANJE (1-D SAMPLING)	7
• ODMJERAVANJE U PROSTORU (2-D SAMPLING).....	7
1.4. MATRICA PIKSELA	7
1.5. OŠTRINA VIDA	9
1.6. UDALJENOST I UGAO GLEDANJA.....	9
1.7. PROSTORNO-VREMENSKI DOMEN.....	11
1.8. TERMINOLOGIJA OSVJETLJENJA	12
1.9. NELINEARNO KODOVANJE SLIKE.....	12
1.10. LINEARNOST I NELINEARNOST.....	15
1.11. KOMPONENTE ZA PREDSTAVLJANJE OSVJETLJENJA I BOJE	15
<u>2. SKENIRANJE LINIJA EKRANA</u>	16
2.1. FREKVENCIJA OSVJEŽAVANJA.....	16
2.2. UVOD U SKENIRANJE	18
2.3. PARAMETRI SKENIRANJA.....	19
2.4. SKENIRANJE SA PREPLITANJEM ILI INTERLACED SCANNING.....	20
2.5. TWITTER EFEKAT.....	21
2.6. POREĐENJE PROGRESIVNOG I SKENIRANJA SA PREPLITANJEM.....	22
2.7. NOTACIJA U SKENIRANJU.....	23
2.8. POJAVA ARTIFAKATA KOD SKENIRANJA SA PREPLITANJEM.....	24
2.9. PRIKAZ POKRETA	25
2.10. KLASIFIKACIJA VIDEO SISTEMA	26
2.11. KONVERZIJA IZMEĐU RAZLIČITIH SISTEMA	27
<u>3. REZOLUCIJA</u>	28
3.1. OSNOVNI PARAMETRI VIDEO SIGNALA I SISTEMA	28
3.2. KELLOV EFEKAT	29
3.3. REZOLUCIJA.....	30
3.4. REZOLUCIJA KOD VIDEO.....	31
3.5. OSVRT NA SKENIRANJE SA PREPLITANJEM	33

<u>4. DIGITALNA TELEVIZIJA.....</u>	34
4.1. POTPUNI PRELAZ NA DIGITALNU TELEVIZIJU	35
4.2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE DIGITALNE TELEVIZIJE	36
• STANDARDI U DIGITALNOJ TELEVIZIJI	36
• MOGUĆNOSTI KOJE DONOSI DIGITALNA TELEVIZIJA.....	37
• NAČINI DIGITALNOG EMITOVANJA	38
4.3. TELEVIZIJA VISOKE DEFINICIJE - HDTV.....	39
• STANDARDNE REZOLUCIJE I BRZINE FREJMOVA ILI POLJA	39
• POREĐENJE SA SDTV	40
• OSVRT NA RAZLIČITE FORMATE	40
• OSVRT NA TEHNIČKE ZAHTEJE.....	41
• POBOLJŠANJA KOJA SE OČEKUJU OD HDTV.....	42
• VRSTE HDTV PRIJEMNIKA	42
<u>5. PROMJENA UČESTANOSTI ODABIRANJA</u>	45
5.1. KONVERZIJA NANIŽE SA FAKTOROM 2:1.....	47
5.2. PREODMJERAVANJE.....	47
5.3. INTERPOLACIJA.....	48
5.4. LAGRANŽOVA INTERPOLACIJA.....	49
5.5. LAGRANŽOVA INTERPOLACIJA KAO FILTRIRANJE	50
5.6. POLIFAZNI INTERPOLATORI	51
5.7. BROJ POLIFAZNIH KORAKA I FAZA.....	52
5.8. PRIMJENA POLIFAZNIH INTERPOLATORA	52
5.9. DECIMACIJA	53
5.10. NF FILTRIRANJE KOD DECIMACIJE	53
<u>6. PRAKTIČNI DIO.....</u>	54
6.1. KORIŠTENJE FUNKCIJA MATLABA	54
6.2. PRIMJER BR. 1: KONVERZIJA NANIŽE SA FAKTOROM 2:1	58
6.3. PRIMJER BR. 2: KONVERZIJA NAVIŠE KAO FILTRIRANJE	60
6.4. PRIMJER BR. 3: KONVERZIJA NAVIŠE SA FAKTOROM 1:2.....	62
6.5. PRIMJER BR. 4: KONVERZIJA FREKVENCije ODMJERAVANJA SA FAKTOROM P/Q	63
6.6. PRIMJER BR. 5: KONVERZIJA FORMATA	64
6.7. PRIMJER BR. 6: DVODIMENZIONALNA INTERPOLACIJA	65
6.8. PRIMJER BR. 7: 2D INTERPOLACIJA POMOĆU FUNKCIJE RESAMPLE.....	67
<u>7. ZAKLJUČAK.....</u>	68
<u>8. PRILOG</u>	70
♦ PRIMJER1.M.....	70
♦ PRIMJER2.M.....	72
♦ PRIMJER3.M.....	75
♦ PRIMJER4.M.....	76

♦ PRIMJER5.M.....	78
♦ PRIMJER6.M.....	80
♦ PRIMJER7.M.....	80

UVOD

Tokom nepunih sedam decenija svog postojanja, televizija se uselila u ogroman broj domova na našoj planeti i predstavlja osnovni vid zabave čak i u onim društvima koja ne bismo mogli nazvati tehnološki naprednim. Pored radija, štampe, Interneta i ostalih sredstava informisanja, televizija predstavlja jedan od najuticajnijih medija i izvora informacija uopšte. Međutim, i pored svog relativno dugog perioda postojanja, inovacije na polju televizije su prilično rijetke u odnosu na druge vidove komunikacija, računarsku industriju, itd. To zasigurno nije zbog toga što je televizijska tehnika toliko dobra da je ne treba mijenjati, već zato što su ustanovljeni određeni standardi kojima se održava kompatibilnost uređaja sa novom tehnologijom. Nakon pojave televizije sa slikom u boji, najveći skok u televizijskoj tehnologiji svojim prednostima izazvala je pojava digitalne televizije.

Pa ipak u zadnje vrijeme dolazi do usvajanja novih standarda, često se susrećemo s pojmom digitalna televizija, sve češće vidamo ogromne televizijske ekrane, plazma i LCD displeje sa oznakama HD ready i HDTV kompatibilan. Oblast digitalne televizije je veoma široka i obuhvata sve postupke od nastanka digitalne slike i zvuka, njihove obrade, kompresije, prenosa, regulisanja pravnih normi i standarda, pa sve do isporuke konačnom korisniku, tako da ovaj rad predstavlja samo mali dio trenutnih dešavanja na ovom području.

I. Istorijski razvoj slike i televizije

Korijeni televizije sežu čak do 1923. godine kada su u SAD i Engleskoj ostvareni prvi prenosi crno-bijelih silueta. Prvi redovni televizijski program započeo je s emitovanjem 1936. godine, ali je tokom drugog svjetskog rata prekinut. Poslije rata, televizija oživljava u savršenijem obliku, zahvaljujući televizijskoj tehnici koja je razvijana u ratne svrhe. Značajnu prekretnicu predstavlja 1954. godina kada u SAD počinje emitovanje prvog programa kompatibilne televizije u boji. Kompatibilnost se ogledala u tome što su crno bijeli televizori mogli da koriste televizijski signal u boji iz kojeg su koristili samo jednu komponentu slike (luma), dok su informacije o boji sadržane u ostalim komponentama odbacivali.

U zavisnosti od načina na koji se iz slike u boji dobija crno-bijela, kao i nekih drugih tehničkih karakteristika razvijeno je više međusobno nekompatibilnih standarda, kao što su NTSC, PAL i SECAM.

NTSC - (*National Television System Committee*) je razvijen 1950. godine kao prvi televizijski standard. Zasnovan je na 525 linija i frekvenciji osvježavanja slike od 60 Hz. U upotrebi je u SAD, Kanadi i Japanu.

PAL - (*Phase Alternating Line*) je 15 godina mlađi od NTSC-a. Njegove odlike su 625 linija i frekvencija osvježavanja od 50 Hz. Nešto je detaljniji od NTSC standarda jer ima 100 linija više, podložniji treptanju slike zbog niže frekvencije osvježavanja. U upotrebi je u najvećem dijelu Evrope, kao i kod nas.

SECAM - (*Sequence Couleur a Mémoire*) je vršnjak PAL standarda. Eliminisanje grešaka u boji koje postoje kod NTSC standarda izvedeno je na drugačiji način od PAL-a, ali u svakom drugom pogledu s njim dijeli prednosti i nedostatke. U upotrebi je u Francuskoj, Grčkoj, Rusiji, nekim zemljama istočne Evrope i u Africi.

Kao što vidimo, standardi na kojima se zasniva današnja televizija postavljeni su prije skoro pola vijeka. Od tada do danas se skoro ništa nije promijenilo. Ukoliko pogledamo rezoluciju televizijske slike, koja u PAL standardu iznosi 768×576 piksela, vidimo da je to daleko ispod standarda koji postavljaju današnji kompjuterski monitori. To je postalo naročito izraženo povećanjem dijagonale televizijskih ekrana, pri čemu rezolucija slike ostaje nepromjenjena. Iz tog razloga postoje brojni standardi koji se trude da prevaziđu postojeća ograničenja televizije i da doživljaj gledanja podignu na viši nivo. Svi oni se kreću u pravcu digitalnog procesiranja slike.

Digitalna televizija predstavlja sasvim novu tehnologiju u proizvodnji i emitovanju radio i televizijskog programa. U zavisnosti od rezolucije slike i tehnike skeniranja koja se koristi, postoji nekoliko standarda koji se upotrebljavaju u digitalnoj televiziji, a dati su u preporukama Međunarodne unije za telekomunikacije. O njima će nešto više biti riječi kasnije. Posljednjih pet godina u zemljama Zapadne Evrope digitalna televizija se toliko brzo razvijala, da su poslanici u mnogim zemljama morali u nekoliko navrata da mijenjaju pravne odredbe koje regulišu ovu oblast. Način emitovanja audio i video signala otvorio je potpuno nove prostore za radiodifuziju i omogućio integraciju svih telekomunikacionih i informacionih sistema.

II. Kratak opis cjelina u radu

Rad je podijeljen u nekoliko tematskih cjelina podijeljenih po poglavljima.

Prva, druga i treća glava se bave osnovnim principima u digitalnoj obradi slike koji uključuju nastanak slike, ljudsku percepciju kako mirne slike tako i pokretnih slika (video). Isto tako u njima se razmatraju osnovne tehnike prikaza slike na ekranima kao i problemima koji se pojavljuju pri prikazu videa.

Četvrta glava se bavi konkretnim primjenama, odnosno standardima u digitalnoj televiziji. U njoj se razmatraju osnovne karakteristike digitalne televizije, kako standardne definicije - SDTV, tako i televizije visoke definicije - HDTV, kao i poređenje ta dva standarda međusobno i u odnosu na klasičnu analognu televiziju. Obrat ćemo pažnju i na to šta krajnji korisnik dobija uvođenjem digitalne televizije. Navedeno je i par postojećih digitalnih televizija u svijetu, kao i trenutno stanje u našem okruženju.

Peta glava apostrofira koje su to konkretne operacije digitalne obrade slike i zvuka koje se trenutno koriste. Postojanje različitih standarda u svijetu zahtijeva prilagođavanje televizijskog signala ili videa ukoliko želimo da se on prikaže na uređaju koji koristi drugi standard.

Šesta glava je praktični dio diplomskog rada i vezan je za programski paket Matlab. Cilj ovog dijela rada je ilustracija operacija u digitalnoj obradi slike koje se koriste prilikom konverzije formata kod televizije standardne i visoke definicije. Navedena je lista korištenih Matlabovih funkcija, kao i kraći opis načina njihovog korištenja.

Sedma glava je zaključak.

U *prilogu* su navedeni m-fajlovi korišteni u okviru praktičnog dijela rada.

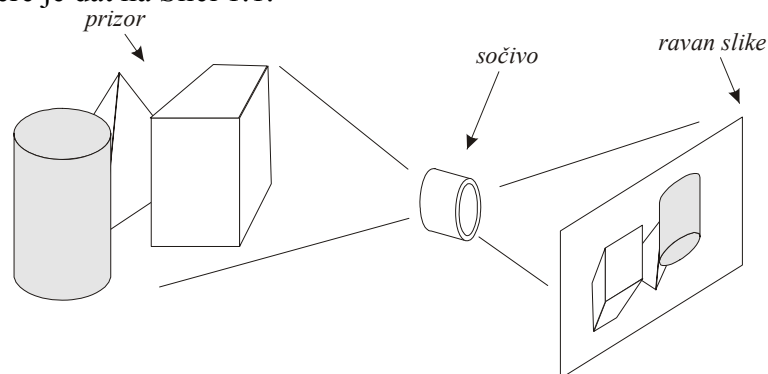
Na kraju rada je dat spisak korištene literature, kao i Internet stranica koje su poslužile kao izvor informacija vezanih za temu rada. Uz rad je priložen i CD na kojem se nalazi rad u elektronskom obliku, kao i Internet stranice koje su korištene kao literatura.

1. UVOD U DIGITALNU SLIKU

Ovo poglavlje se odnosi na osnovne osobine piksela, odnosno matrice piksela i načine digitalizacije iz ravni slike. Takođe, opisuje se veza vrijednosti piksela i osvjetljenja, odnosno boje, kao i zašto većina video sistema koristi vrijednosti piksela koje su nelinearno povezane sa intenzitetom svjetla.

1.1. Nastanak slike

Kod ljudskog vida trodimenzionalni svijet se kroz očno sočivo preslikava na mrežnjaču (retinu) oka, na kojoj se nalaze ćelije fotoreceptora. Fotoreceptori reaguju na svjetlost čije se talasne dužine kreću od oko 400nm do 700nm. Način rada filmske kamere (kamere sa filmskom trakom) i standardne video kamere (kako analogne tako i digitalne) zasniva se na sličnom principu. Osnovni dijelovi kamere su sočivo i fotoosjetljivi uređaj. Da bi slika prizora dobijena kamerom bila realna, odnosno približna onakvoj kako je mi vidimo okom, fotoosjetljivi uređaj bi trebao po obliku biti sličan mrežnjači, odnosno senzori bi trebali biti raspoređeni po površini čiji je oblik nalik isječku sfere. Iz praktičnih razloga umjesto isječka sfere koristi se ravna površina na koju se preslikava prizor, i ta ravan se naziva ravan slike. Princip rada kamere je dat na Slici 1.1.

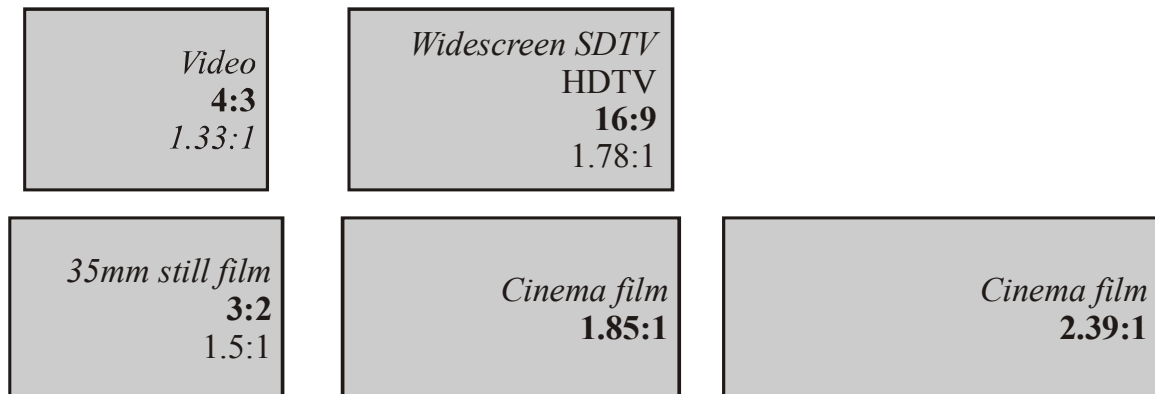


Slika 1.1. Princip rada kamere

Prizor se kroz sočivo kamere preslikava unutar kamere i pada na fotoosjetljivi uređaj. Senzori fotoosjetljivog uređaja reguju na svjetlost koja pada na njih i pretvaraju je u električni, magnetni ili optički signal. Informacije iz slike se u takvom obliku dalje prenose, obrađuju ili memorišu.

1.2. Format slike

Format slike (aspect ratio) jednostavno rečeno predstavlja proporciju dimenzija slike, odnosno koji je odnos širine i visine slike. To je neimenovan broj i piše se kao proporcija (na primjer 4:3), s tim da je uobičajeno da se proporcija skraćivanjem svede na oblik u kojem predstavlja prost razlomak (dakle 4:3, a ne 12:9 ili 16:12). Standardni formati slike za film i video su dati na Slici 1.2. Konvencionalna televizija standardne definicije (Standard Definition Television - SDTV) koristi format slike 4:3. Širokoekranska (*widescreen*) televizija, kao i televizija visoke definicije (High Definition Television - HDTV) koriste format slike 16:9. Bioskopski film koristi format slike 1.85:1 i takav format se naziva "ravni" ili "sferični" format.

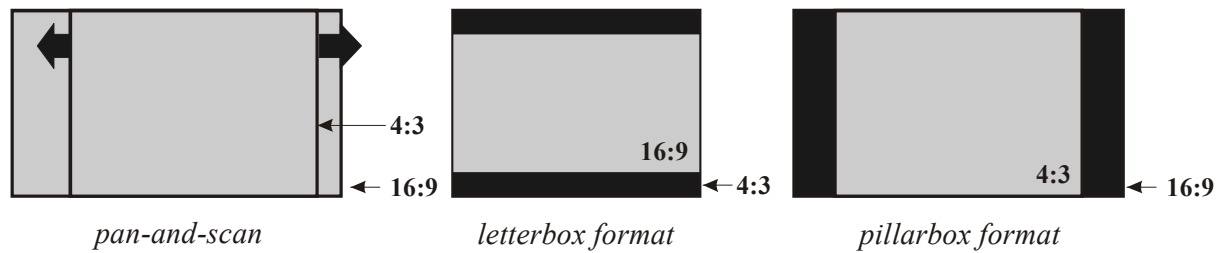


Slika.1.2. Standardni formati slike

Da bi se dobio format slike 2.39:1 ("*Cinemascope*" ili u žargonu "*scope*" format), za snimanje filma se obično koriste asferična sočiva koja horizontalnu dimenziju dobijene kvadratne slike u odnosu na vertikalnu smanjuju dva puta. Pri tome treba imati u vidu da i projektor za prikaz takve slike treba biti opremljen sa sličnim sočivom, da bi se prilikom prikazivanja dobila slika bez izobličenja. Ovakva sočiva nose naziv *anamorfna sočiva*. Uopšteno gledano, sa ovakvim sočivima se može dobiti bilo koji format slike.

Često je u praksi potrebno promijeniti odnos širine i visine slike zbog prilagođenja veličini ekrana. Filmska slika se može transformisati u dimenzije 4:3 za video odsijecanjem dijela slike sa strane, to jest sa gubitkom tih dijelova slike. Drugi način ove transformacije se naziva *pan-and-scan*, koji umjesto fiksnog odsijecanja sa strana, pomijera ram lijevo ili desno u zavisnosti od scene filma. Ovakav način omogućava da prikaz u novom formatu obuhvati značajne dijelove scene, dok one manje bitne odsijeca. Nedostatak *pan-and-scan* metode je što se prilikom transformacije mora ručno podešavati pozicija od kadra do kadra. Pozicija rama u čitavoj slici se prenosi do krajnjeg korisnika tako da uređaj koji se koristi za prikaz slike ima informaciju koji dio slike treba da prikaže. Proces ovakve transformacije se, naravno, može automatizovati.

Umjesto odsijecanja dijela slike, češće se koristi takozvani *letterbox* format, koji omogućava zadržavanje čitave slike, kao što je prikazano na Slici 1.3.



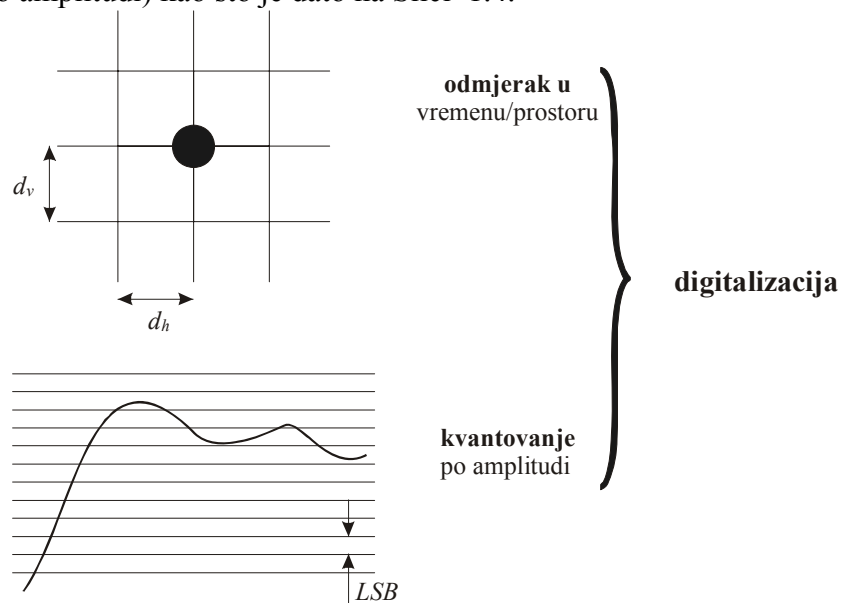
Slika 1.3. Prilagođenje slike različitim dimenzijama ekrana

Ovakav način nema gubitka dijelova slike, koristi se čitava širina ekrana, s tim što se gornji i donji dio slike dopunjava crnim ili sivim, i ne koristi se za prikaz.

Pojavom *widescreen* tv prijemnika postalo je uobičajeno vidjeti 4:3 materijal prikazan na ovakvoj vrsti prijemnika u *pillarbox* formatu (negdje poznat i kao *sidebar* format). Ovdje se koristi čitava visina ekrana, dok su lijeva i desna strana zatamnjene.

1.3. Digitalizacija

Digitalizacija video signala se sastoji od odmjeravanja (po vremenu i prostoru) i kvantovanja (po amplitudi) kao što je dato na Slici 1.4.



Slika 1.4. Digitalizacija

Obično se prvo vrši odmjeravanje pa kvantovanje, mada može i obratno. Odmjeravanje je postupak pri kojem se formira diskretni signal, dok kvantovanje podrazumijeva zaokruživanje vrijednosti amplitude signala.

- **Jednodimenzionalno odmjjeravanje (1-D sampling)**

Jednodimenzionalno odmjjeravanje ili odmjjeravanje u vremenu je postupak kod kojeg od polaznog kontinualnog signala dobijamo diskretni signal. Da se podsjetimo, diskretni signal je signal koji ima vrijednosti amplitude poznate samo u određenim diskretnim trenucima vremena. Obično se vrijednosti diskretnog signala nazivaju odmjerci, jer nastaju kao rezultat odmjjeravanja. Matematički gledano diskretni signal, koji odgovara polaznom analognom signalu, dobija se množenjem analognog signala sa povorkom jediničnih Dirakovih impulsa. Praktično gledano, umjesto povorke Dirakovih impulsa koristi se povorka uskih pravougaonih impulsa jedinične amplitude. Kao rezultat se dobija diskretni signal koji u diskretnim trenucima u vremenu ima istu vrijednost amplitude kao analogni signal u tim trenucima vremena.

U zavisnosti od načina na koji su Dirakovi ili uski pravougaoni impulsi raspoređeni u vremenu, postoji uniformno i neuniformno odmjjeravanje. Kada su svi intervali između susjednih impulsa jednake veličine, a to je najčešće, dobijamo uniformno odmjjeravanje. Ukoliko to nije slučaj, radi se o neuniformnom odmjjeravanju.

- **Odmjjeravanje u prostoru (2-D sampling)**

Kod jednodimenzionalnog odmjjeravanja, analogni signal je funkcija jedne promjenljive (vrijeme), odnosno funkcija jedne koordinate. U slučaju signala koji je funkcija dvije promjenljive, odmjjeravanje se vrši u diskretnim tačkama u prostoru. Kao rezultat odmjjeravanja dvodimenzionalne funkcije dobijamo diskretni signal čija je amplituda u diskretnim tačkama u prostoru jednaka amplitudi polaznog kontinualnog signala u tim tačkama. Primjer kontinualnog signala koji je funkcija dvije promjenljive, i koji se odmjjerava, je intenzitet svjetlosti u ravni slike, pri čemu amplituda signala predstavlja intenzitet svjetlosti u nekoj tački iz ravni slike. Kao rezultat odmjjeravanja funkcije intenziteta svjetlosti u ravni slike dobijamo diskretni signal koji je takođe funkcija dvije promjenljive, i taj signal predstavlja odmjjerke slike.

Kod digitalnog videa i konvencionalne obrade slike, odmjerci leže na pravilnoj, pravougaonoj mreži ili rešetki, kao na Slici 1.4. Udaljenost između susjednih odmjeraka po horizontalnoj osi je d_h a po vertikalnoj je d_v . Treba napomenuti da odmjerci ne moraju biti digitalni: *charge-coupled device* (CCD) kamera odmjerava, ali ne kvantuje odmjjerke. Analogni video se uopšte ne odmjerava horizontalno, već samo vertikalno, i to prilikom skeniranja u vremenu.

1.4. Matrica piksela

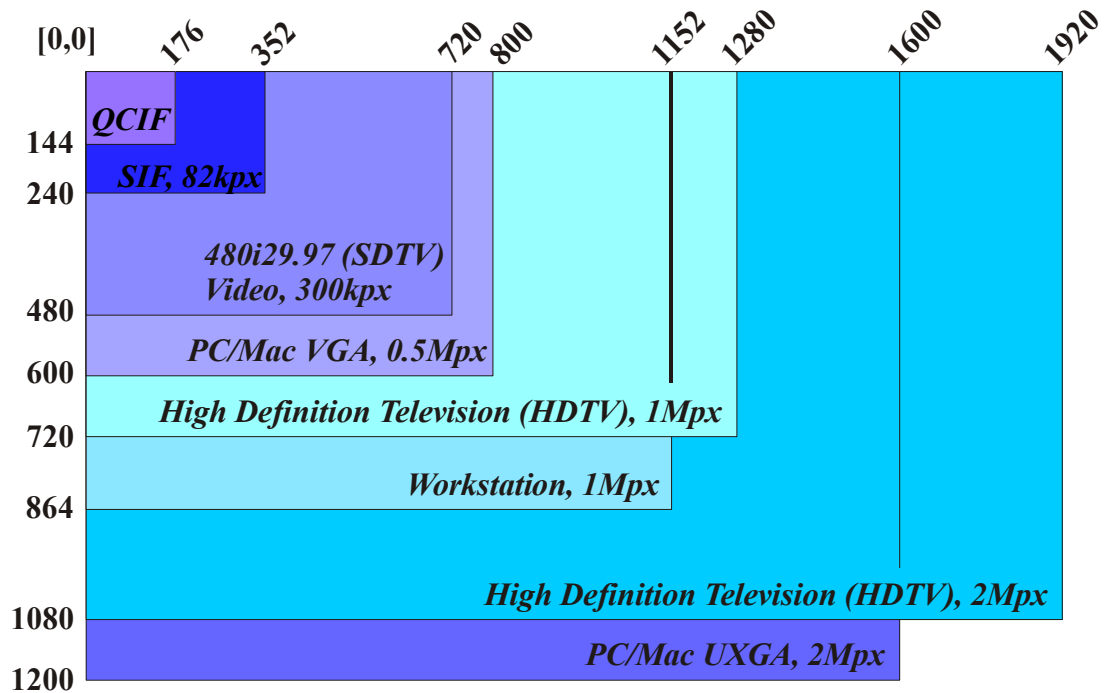
Digitalna slika se predstavlja pomoću pravougaone matrice elemenata slike - piksela. Kod sivih slika, ili u žargonu rečeno crno-bijelih, svaki piksel sadrži samo jednu komponentu čija je vrijednost u širem smislu proporcionalna osvjetljenju. Kod slika u boji, svakom pikselu se pridružuje više komponenti - obično tri - čije su vrijednosti blisko povezane sa ljudskom percepcijom boja.

Kod multispektralne analize, svaki piksel ima dvije ili više komponenata koje predstavljaju snagu zračenja osvjetljenja na pojedinim talasnim dužinama. Ovakve sistemi mogli bi se opisati kao sistemi u boji, ali su oni obično projektovani u naučne svrhe, pa te komponente često nemaju neke bliske veze sa ljudskom percepcijom boja.

Vrijednost svake od komponenti piksela zavisi od osvjetljenja i boje na dijelu slike veoma male površine koja okružuje odgovarajuću tačku mreže za odmjjeravanje. Vrijednost

dobijena odmjerenjem se kvantuje, a zatim koduje. Obično se broj kvantnih nivoa bira tako da bude jednak 2^n pri čemu je onda n broj bita potrebnih za kodovanje.

Tipična video kamera ili digitalni fotoaparati u ravni slike imaju jedan ili više CCD senzora slike, a svaki od njih se sastoji od stotina hiljada, ili čak nekoliko miliona fotosjetljivih mjesta u sebi. Ukupan broj piksela koji sadrži slika je proizvod broja kolona slike (tehnički rečeno uzoraka po aktivnoj liniji, S_{AL}) i broja redova slike (aktivnih linija, L_A). Ukupan broj piksela se obično izražava u kilopikselima (kpx) ili češće megapikselima (Mpx). Postoje različiti standardi dimenzija slike, a nekoliko standarda je dato na slici 1.5.



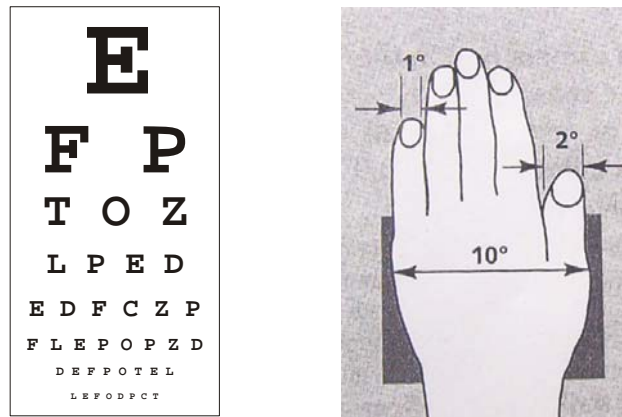
Slika 1.5. Standardizovane dimenzije slike

Za sistem koji ima jednaku horizontalnu i vertikalnu gustinu odmjerača kaže se da ima kvadratno odmjerenje. Kod takvog sistema, broj odmjerača po širini slike jednak je proizvodu formata slike i broja horizontalnih linija slike. Na primjer, za format slike 4:3 koja ima 480 horizontalnih linija, dobijamo $480 \cdot (4:3) = 640$ odmjerača po širini slike.

Treba napomenuti da se termin kvadratno kod odmjerenja odnosi na gustinu uzoraka, jer bi se greškom moglo zaključiti da je informacija iz slike pridružena pikselu ravnomjerno raspodijeljena po kvadratnom regionu. U računarstvu, kvadratno odmjerenje je postalo standardno, iako postoje i sistemi koji koriste nekvadratno odmjerenje. Koristi se termin nekvadratno a ne pravougaono da ne bi došlo do zabune, jer je i kvadrat u stvari pravougaonik.

1.5. Oštrina vida

Kada oftamolog provjerava naš vid, on najčešće koristi Snellov dijagram, predstavljen na Slici 1.6. Rezultati ovog testa zavise od udaljenosti gledanja pa je test standardizovan za gledanje sa udaljenosti od 20 stopa (što je otprilike 6 metara). Sa te udaljenosti visina najmanjih slova zahvata ugao vidnog polja od jedne šezdesetine stepena, odnosno ugao od jedne minute. Ovo je ugrubo i krajnja granica raspoznavanja kod normalnog vida.



Slika 1.6. Snellov dijagram i pravilo palca

Vidni ugao se može procijeniti i korištenjem astronomskog pravila palca: kada ispružimo ruku, ugao koji zahvata dlan je otprilike deset stepeni, ugao koji zahvata palac je oko dva stepena, dok mali prst zahvata oko jedan stepen. (Poređenja radi, ugao koji zahvata pun mjesec je oko pola stepena.)

1.6. Udaljenost i ugao gledanja

Ako prikažemo bijelu površinu na ekranu sa katodnom cijevi i sa tipičnom veličinom tačke, linijska struktura slike na ekranu će se primijetiti ukoliko se posmatrač nalazi na udaljenosti manjoj od one na kojoj susjedne linije slike zahvataju ugao od jedne minute ili više u vidnom polju posmatrača.

Da bi se postiglo posmatranje pri kojem razmak između linija (d) zahvata manje od šezdesetine stepena, udaljenost gledanja bi trebala biti oko 3400 puta veća od tog razmaka, tako da se dobija:

$$udaljenost \approx 3400 \cdot d \approx \frac{3400}{ppi} = \frac{3400}{linija/cm}; \quad 3400 \approx \frac{1}{\sin\left[\frac{1}{60^\circ}\right]}$$

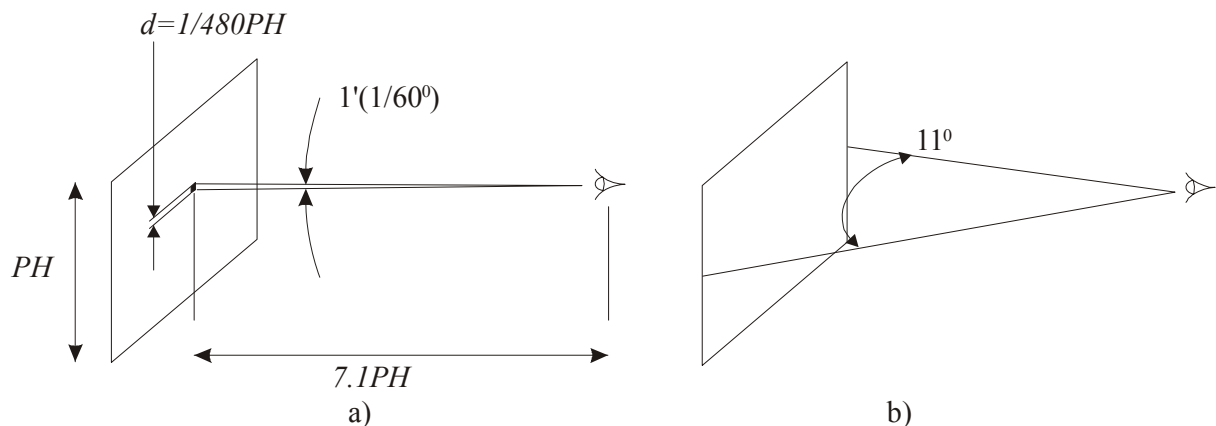
gdje ppi označava gustinu linija (piksela po inču). Sa ove udaljenosti, oko 60 piksela se nalazi po jednom stepenu ugla.

Udaljenost gledanja može se izraziti i kao:

$$udaljenost \approx \frac{3400}{L_A} \times PH$$

gdje je sa PH označena visina slike (*picture height*) a sa L_A broj redova piksela (linija) slike.

Televizija standardne definicije (Standard definition television - SDTV) ima 480 linija slike. Za ovakav slučaj, razmak između linija slike zahvata ugao od šezdesetine stepena na udaljenosti od oko sedam puta većoj od visine slike, kao što je skicirano na Slici 1.7a.



Slika 1.7. a) udaljenost i b) ugao gledanja kod SDTV, 480 linija

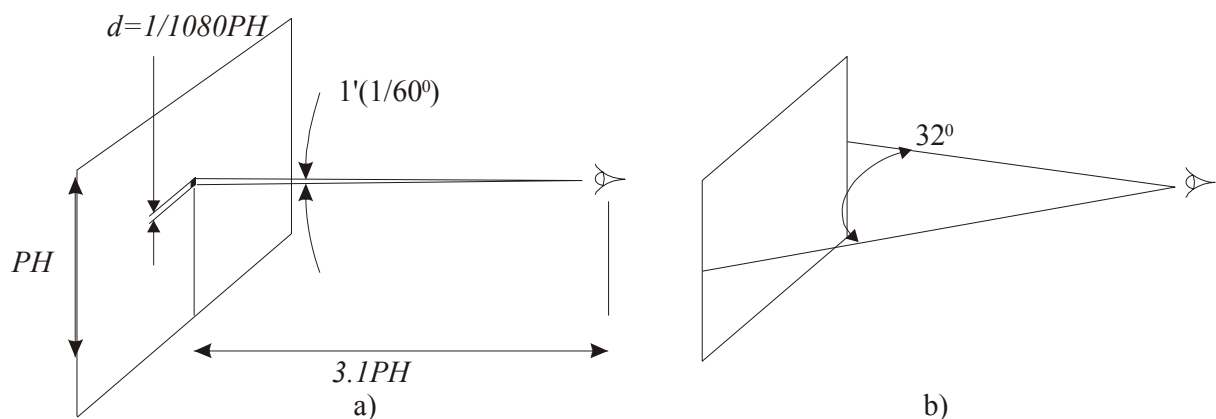
Za format slike 4:3, i SDTV sa 480 linija slike dobijamo $480 \cdot (4:3) = 640$ piksela po širini slike. Ako jedna linija, odnosno piksel zahvata $1/60^\circ$ stepena vidnog polja posmatrača onda po širini slike dobijamo ugao gledanja od $640 \cdot (1/60^\circ) = 10.667^\circ \approx 11^\circ$ (Slika 1.7b), dok po vertikali imamo $480 \cdot (1/60^\circ) = 8^\circ$. To znači da bi nam dlan kada ispružimo ruku, prema astronomskom pravilu palca, trebao skoro potpuno da prekrije čitavu širinu slike.

Optimalna udaljenost gledanja se često izražava prema dijagonali ekrana televizora. Uzmimo format slike 4:3 na primjer. Dijagonala, visina i širina slike čine pravougli trougao. Prema Pitagorinoj teoremi, za pravougli trougao čije su katete proporcionalne sa odnosom 4:3, proporcionalnost hipotenuze i kateta je respektivno 5:3 i 5:4. Prema tome, visina ekrana iznosi tri petine dijagonale ekrana, pa prethodna relacija dobija oblik:

$$\text{udaljenost} \approx \frac{3400}{L_A} \times PH = \frac{3400}{L_A} \times \frac{3}{5} D = \frac{2040}{L_A} \times D$$

gdje je D dijagonala ekrana. Za 480 linija slike dobijamo da je minimalna udaljenost posmatrača od ekrana 4.25 puta veća od dijagonale ekrana.

Sličnu analizu možemo izvršiti i za televiziju visoke definicije (High definition television - HDTV) za standard sa 1080 linija slike. U ovom slučaju format slike 16:9, broj piksela po širini je $1080 \cdot (16:9) = 1920$.

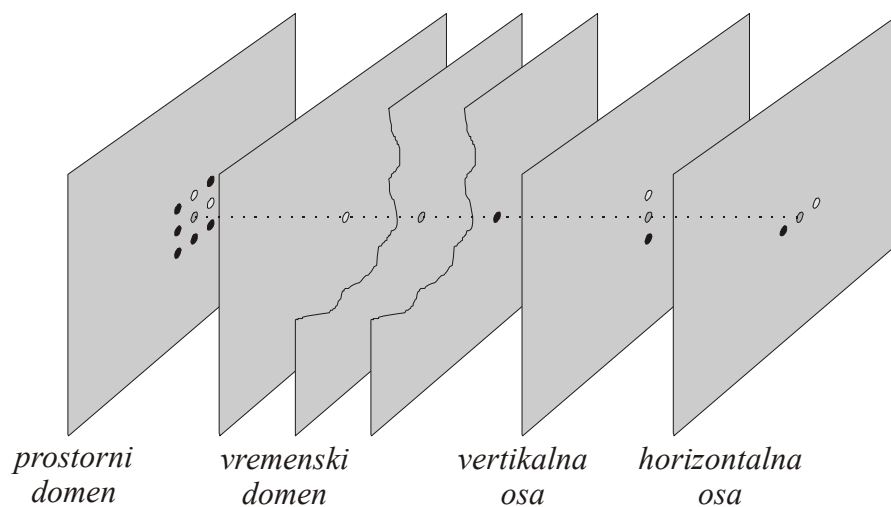


Slika 1.8. a) udaljenost i b) ugao gledanja kod HDTV, 1920x1080

Kao što vidimo na Slici 1.8b, horizontalni ugao koji slika zahvata u vidnom polju posmatrača je $1920 \cdot (1/60^0) = 32^0$, što je praktično skoro tri puta više nego kod SDTV sa 480 linija. Vertikalni ugao koji slika zahvata je $1080 \cdot (1/60^0) = 18^0$, pa je i on povećan u odnosu na SDTV. Iz tog razloga, glavni efekat povećanja broja piksela slike je povećanje ugla koji slika zauzima u vidnom polju posmatrača. Značenje "visoke definicije" kod HDTV se ne može tumačiti kao šest puta povećan broj piksela pri istom uglu gledanja, nego to znači da slika u stvari zauzima veću oblast vidnog polja posmatrača.

1.7. Prostorno-vremenski domen

Niz mirnih slika prikazanih dovoljno velikom brzinom, koja se kreće od 24 do 60 slika u sekundi, može dati iluziju pokreta. Odmjeravanje u vremenu, zajedno sa 2-D odmjerenjem u prostoru ima za posljedicu odmjerenje videa po tri ose: horizontalnoj, vertikalnoj i vremenskoj osi, kao na Slici 1.9. Jednodimenzionalna teorija odmjerenja se primjenjuje duž svake ose.



Slika 1.9. Prostorno-vremenski domen

Na lijevoj strani Slike 1.9., dat je prostorni domen jedne slike, a zatim vremenski i po osama. Odmjeravanje u vremenskom domenu podrazumijeva fiksnu poziciju piksela u slici, a odmjerava se nivo osvjetljenja u toj tački i vrši se u diskretnim trenucima vremena. Odmjeravanje osvjetljenja po vertikalnoj osi podrazumijeva fiksni vremenski trenutak i fiksnu horizontalnu poziciju piksela, a vrši se na diskretnim pozicijama piksela po vertikali. Isto tako je i za odmjerenje po horizontalnoj osi, s tim da se radi o fiksnoj poziciji piksela po vertikali.

Neke obrade slike, kao što su određeni tipovi filtriranja, mogu odvojeno da se primjene po horizontalnoj i vertikalnoj osi, a da imaju efekat u prostornom domenu. Ovakve operacije se nazivaju *separabilne* operacije. Neke druge operacije ne mogu da se primjenjuju zasebno po osama, i moraju se direktno primjenjivati na dvodimenzionalni vektor odmjeraka.

1.8. Terminologija osvjetljenja

Kada kod sivih slika govorimo o svjetlini piksela, treba napraviti razliku između *subjektivnog osjećaja svjetline (brightness)*, koji je predstavlja osjećaj našeg čula vida da razazna da li neka oblast emituje (ili reflektuje) više ili manje svjetlosti, i *objektivne mjere svjetline i intenziteta svjetlosti*.

Intenzitet svjetlosti se definiše kao snaga izračena u datom pravcu; *zračenje* je intenzitet po jedinici površine. Ovakva terminologija ne uzima u obzir talasnu dužinu svjetlosti, koja je značajna za slike u boji.

Luminansa predstavlja zračenje korigovano težinskom funkcijom koja uzima u obzir osjetljivost čula vida na pojedinim talasnim dužinama. Međunarodna komisija za standardizaciju CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) za luminansu je uvela oznaku Y . Kasnije ćemo vidjeti da sistemi za obradu i prikaz slike rijetko koriste vrijednosti piksela koje su proporcionalne luminansi; vrijednosti koje se ovdje koriste su često nelinearno povezane sa luminansom. U tom slučaju se preporučuje da se za komponentu koja predstavlja luminansu koristi oznaka Y' da bi se naglasilo da postoji nelinearna veza te komponente i stvarne luminanse. Nekad je pogodno koristiti i relativnu luminansu, koja se dobija kada normalizujemo vrijednosti luminanse sa maksimalnom luminansom. Relativna luminansa može imati samo vrijednosti od nula do jedan.

Radi kratkoće pisanja, pojam *svjetlina (lightness)* ćemo usvojiti za objektivnu mjeru koja pokušava da što bolje opiše subjektivni doživljaj svjetline i predstavlja standardnu aproksimaciju odziva čula vida na svjetlost. Njena oznaka je L^* u skladu sa CIE. Ova veličina se dobija podvrgavajući luminansu nelinearnoj prenosnoj funkciji koja simulira vid. Praktično se može pokazati da je relativna luminansa podignuta na stepen 0.4 približno jednaka L^* . Vrijedi i obrnuto, relativna luminansa se može dobiti iz svjetline kao L^* podignuto na stepen 2.5. Nekoliko sistema za dobijanje slike koriste vrijednosti piksela koje su proporcionalne L^* .

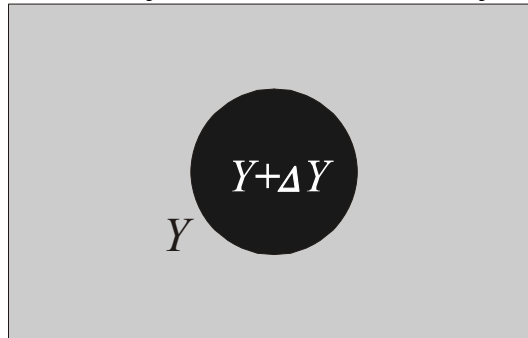
Slike u boji vidimo i reprodukujemo na osnovu tri komponente boje, čije su amplitude proporcionalne njihovim intenzitetima. Njihov spektralni sastav je pažljivo izabran imajući u vidu osnovne principe proučavanja boja. Senzor slike digitalnog fotoaparata, na primjer, može da proizvodi vrijednosti proporcionalne zračenju koje aproksimiraju crvenu, zelenu i plavu komponentu (RGB sistem). Međutim, kod većine sistema ove vrijednosti se podvrgavaju nelinearnoj prenosnoj funkciji - koju nazivamo *gamma correction (gama korekcija)* - i ona simulira odziv našeg opažanja. Mnogi sistemi koriste RGB vrijednosti koje nisu proporcionalne intenzitetu. U skladu s tim, oznaka $R'G'B'$ naglašava tu nelinearnost.

1.9. Nelinearno kodovanje slike

Ljudski vid ne može razlikovati dva nivoa luminanse ako je odnos njihovih intenziteta manji od otprilike 1.01, drugim riječima, prag vida za razliku u luminansi je oko 1%. Osjetljivost na kontrast je utvrđena eksperimentalno korištenjem testnih uzoraka. Testni uzorak za kontrast predstavlja sliku koja sadrži dvije oblasti sa različitim nivoima luminanse. U zavisnosti od međusobnog odnosa ta dva nivoa, možemo vidjeti dvije oblasti na slici ili samo jednu. Jedan testni uzorak je dat na Slici 1.10.

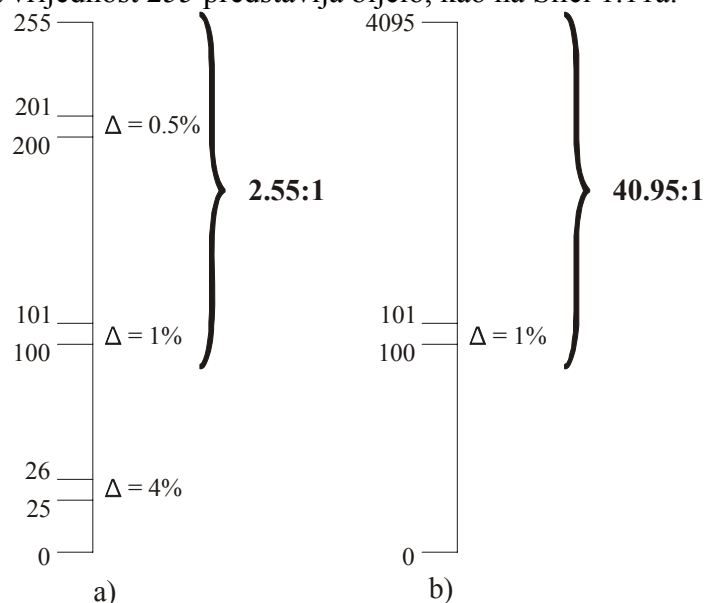
Kod ovog uzorka, jedna oblast je krug (čija je vrijednost luminanse Y) i njegovo okruženje, čija luminansa ima vrijednost $Y + \Delta Y$. Vrijednost ΔY se postepeno smanjuje, i to sve dok okom možemo primijetiti da se na testnom uzorku radi o dvije oblasti. Prag kontrasta predstavlja granicu razlikovanja dvije susjedne luminanse.

Ukoliko je razlika između luminansi manja od praga kontrasta nećemo uočiti krug, a ukoliko je razlika veća, uočićemo dvije oblasti sa različitom vrijednošću luminanse.



Slika 1.10. Testni uzorak za osjetljivost na kontrast

Razmotrimo vrijednosti piksela koje su proporcionalne luminansi, pri čemu nula predstavlja crno, a maksimalna vrijednost 255 predstavlja bijelo, kao na Slici 1.11a.



Slika 1.11. Kodovanje luminanse sa a) 8 bita i b) 12 bita

Kod vrijednosti 100, relativna razlika između susjednih luminansi je 1%, dok kod vrijednosti 25 ona iznosi 4%. Granica između regiona sa odmjercima čija je vrijednost 100 i onih sa 101 će vjerovatno biti primjetna. Kako se vrijednost piksela smanjuje ispod 100, ta razlika će biti sve primjetnija.

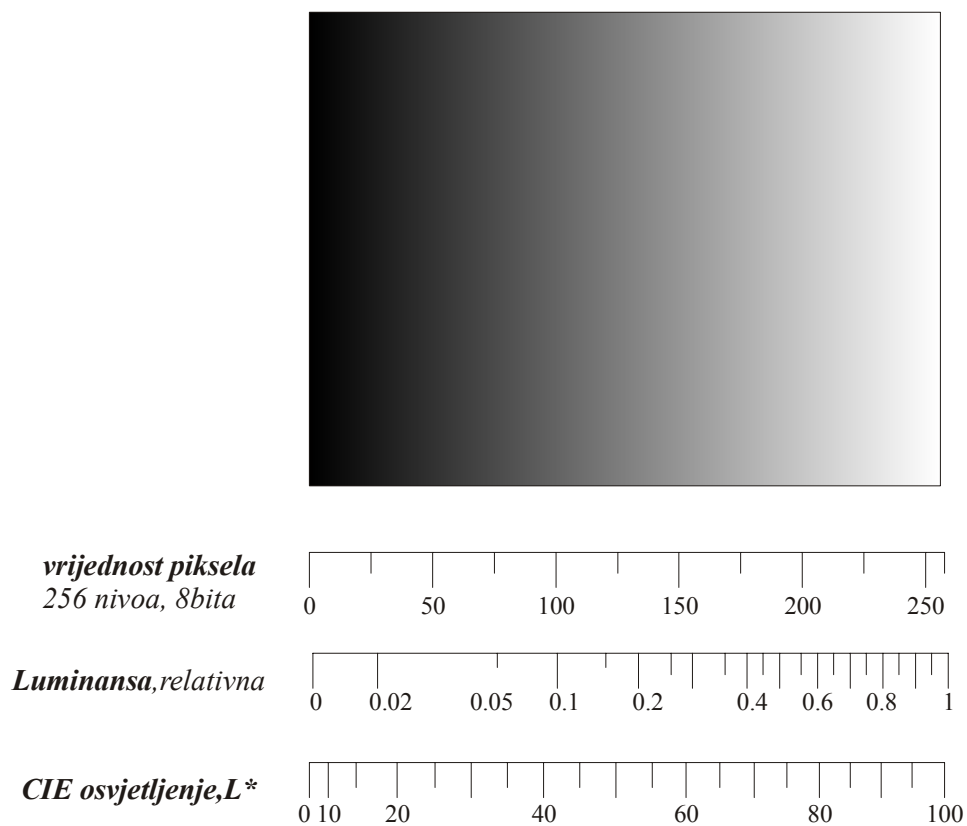
Ukoliko bismo imali testnu sliku sa kontinualnim porastom vrijednosti luminanse od 0 do 255, s tim da je luminansa piksela na krajnjoj lijevoj strani testne slike nula, a na krajnjoj desnoj 255, umjesto kontinualne promjene luminanse duž horizontalne ose uočili bismo skokovit prelaz na mjestima gdje razlika između susjednih luminansi iznosi više od 1%. Skokoviti prelazi bi se manifestovali kao vertikalne trake, i ta pojava se naziva *banding* (eng. band-traka). Na slici sa proizvoljnom raspodjelom luminanse to bi se manifestovalo kao pojava kontura (eng. contouring) na mjestima gdje je raspodjela luminanse inače kontinualna. Neželjeni objekti u slici, kojih u stvarnom prizoru koji prikazuje slika nema, obično se pojavljuju nakon obrade slike i uopšteno se nazivaju *artifakti*.

Linearne vrijednosti iznad nivoa 100 nemaju pojavu artifakata. Povećanjem vrijednosti luminanse razlika se smanjuje, i kad vrijednost dođe na 200, relativni odnos susjednih luminansi je samo 0.5%. Razlika između nivoa 200 i 201 nije vidljiva, i ukoliko bi se vrijednost 201 izbacila, ne bi se primijetila nikakva razlika.

Visoko kvalitetne slike zahtijevaju odnos 30:1 između maksimalne i minimalne vrijednosti luminanse, i da pri tome nema pojave bandinga ili drugih artifakata. Za osmootno kodovanje odnos maksimalne i minimalne vrijednosti luminanse je 255:100, odnosno 2.55:1, i pri tome su vrijednosti ispod 100 izostavljene zbog pojave bandinga ili kontura, pa je prema tome kodovanje sa 8 bita nepogodno za visoko kvalitetne slike.

Problem linearnog kodovanja (ili "code 100" - problem) može se umanjiti povećavajući maksimalnu vrijednost, kao na Slici 1.11b. Kada se luminansa koduje sa 12 bita, maksimalna vrijednost je 4095, a odnos maksimalne i minimalne je 40.95:1. Međutim, ovo ima i svoje nedostatke, jer većina od velikih vrijednosti se ne razlikuju, npr. za 4001 i 4040 ne možemo primjetiti razliku. Zbog toga umjesto linearnog kodovanja sa velikim brojem bita koristimo manji broj vrijednosti koje su dodijeljene nelinearno, na bazi osjećaja.

Kad bi se prag kontrasta ponašao striktno prema pravilu 1% duž čitave tonske skale, luminansa bi se mogla kodovati logaritamski. Za kontrast 100:1, sa 463 vrijednosti luminanse pri logaritamskom kodovanju bi nam trebalo oko 9 bita. Zbog određenih odstupanja se ne koristi logaritamsko već eksponencijalno kodovanje, pri čemu je vrijednost eksponenta oko 0.4.



Slika 1.12. Promjena nivoa svjetline

Na Slici 1.12 prikazana je testna slika kod koje se luminansa mijenja od minimalne do maksimalne vrijednosti i to sa lijeve na desnu stranu. U ovom slučaju, luminansa piksela je nelinearno povezana sa vrijednošću piksela tako da se ispoštuje pravilo 1% duž čitave tonske skale. Vrijednost piksela se koduje sa 8 bita, pa se vrijednosti piksela kreću od 0 do 255. Vrijednost piksela u jednoj koloni matrice slike je ista, i može se očitati na skali ispod slike. Ispod nje je data i skala relativne luminanse piksela. Iako luminansa ima nelinearnu skalu, imamo osjećaj da na slici imamo njenu kontinualnu promjenu. Iz tog razloga se uvodi L^* kao jedinica koja približno odgovara onome što mi okom osjetimo, i njena skala je linearna.

Luminansa crvenog, zelenog ili plavog osnovnog svjetla koju proizvodi monitor je proporcionalna naponu podignutom na stepen 2.5. Interesantno je napomenuti da je prenosna

funkcija ekrana sa katodnom cijevi (Cathode Ray Tube - CRT) približno jednaka inverznoj osjetljivosti oka na svjetlost.

Kod videa, osjećaj uniformne raspodjele se koristi kod kola za gama korekciju unutar svake kamere. $R'G'B'$ vrijednosti koje su rezultat gama korekcije, koje se dalje obrađuju, memorišu i prenose, približno su proporcionalne kvadratnom korijenu intenziteta osvjetljenja u prirodi, i približno su uniformne za naš osjećaj. Uniformnost nam daje mogućnost da koristimo samo 8 bita za svaku komponentu. Kada toga ne bi bilo morali bismo koristiti 11 ili više bita. Digitalni fotoaparati rade na sličnom principu.

1.10. Linearnost i nelinearnost

Senzori za sliku, uopšteno gledano, pretvaraju fotone u elektrone. Oni proizvode signal čija je amplituda proporcionalna intenzitetu osvjetljenja. Video signali se često obrađuju analognim kolima koja imaju linearan odziv na pobudu, ili digitalnim sistemima koji su linearni u smislu operacija koje se obavljaju na kodnim riječima. Za video sisteme se često kaže da su linearni.

Međutim, linearnost u jednom domenu se ne može prenijeti u drugi ako ta dva domena razdvaja nelinearna prenosna funkcija. Kod videa, luminansa prizora je linearna u optičkom domenu, video signal je linearan u električnom. Međutim, nelinearna gama korekcija između ta dva domena implicira da ta dva signala nisu linearno zavisna.

Ako neka obrada sadrži ljudsko opažanje kao parametar, uobičajeno je da se koristi nelinearno predstavljanje.

1.11. Komponente za predstavljanje osvjetljenja i boje

Postoji video oprema koja koristi direktno $R'G'B'$ komponente slike u boji. Međutim, ljudski vid je znatno manje osjetljiv na promjenu boje nego na promjenu osvjetljenja. Iz tog razloga se informacija o osvjetljenju zadržava u punom obliku, dok se informacija o boji može redukovati procesom koji nazivamo *subsampling* (*pododmjeravanje*), a on se može posmatrati kao neka vrsta digitalnog filtriranja ili usrednjavanja.

Pošto je ljudski vid znatno osjetljiviji na osvjetljenje, veoma je bitno kako ćemo doći do komponente koja predstavlja osvjetljenje. Prirodan način za dobijanje te komponente bi bio formiranje određene težinske sume od tri RGB komponente. Međutim, u praktičnoj primjeni prvo se primijeni nelinearna gama korekcija na svaku komponentu, a tek nakon toga se formira težinska suma od tri $R'G'B'$ komponente. Na primjer, prema preporuci 601 za SDTV, komponenta Y' se dobija na sljedeći način:

$$Y' = 0.299R' + 0.587G' + 0.114B' \quad (1.1)$$

Za slučaj HDTV koeficijenti se razlikuju, i dati su preporukom 709:

$$Y' = 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B' \quad (1.2)$$

Spomenimo još da se kompozitni video sastoji od niza slika koje takođe imaju tri komponente: luma - Y' , i dvije diferencijalne komponente boje, C_B i C_R za digitalnu varijantu signala, odnosno P_B i P_R za analognu. Diferencijalne komponente boje daju informaciju samo o boji, a zanemaruju svu informaciju o osvjetljenju. Diferencijalne komponente se podvrgavaju pododmjeravanju da bi se smanjila količina prenesenih informacija, sve u cilju smanjenja potrebnog propusnog opsega za prenos ili kapaciteta memorije za snimanje.

2. SKENIRANJE LINIJA EKRANA

Skeniranje linija (raster scanning) je proces u kome se se ispisuje slika preko čitavog ekrana televizora ili računarskog monitora. Odmjerci slike, koje smo nazvali pikseli, su kod videa poredani uniformno u vremenu i tako formiraju linije skeniranja. Te linije su takođe poredane u vremenu i tako formiraju jednu sliku, odnosno *frame (ram)* u toku određenog vremenskog intervala. U ovom poglavlju se obrađuju osnovni principi skeniranja, određeni standardi u skeniranju i njihova notacija, problemi koji se javljaju prilikom skeniranja kao i načini njihovog eliminisanja.

2.1. Frekvencija osvježavanja

Niz mirnih slika prikazanih dovoljno velikom brzinom mogu da stvore iluziju pokreta u slici.

Mnogi ekrani koji prikazuju pokretne slike emituju svjetlost samo dio vremena predviđenog za prikaz jedne slike (*frame time*). Preostali dio vremena ekran je zatamnjen. Brzina ispisivanja, odnosno učestanost kojom se ispisuju slike između zatamnjenja ekrana naziva se *frekvencija osvježavanja* ili *blicanja* (eng. *flash rate* ili *refresh rate*). Ako je ova frekvencija preniska, primjećuje se treperenje slike odnosno *flicker*. Najniža frekvencija pri kojoj se primjećuje treperenje zavisi i od osvjjetljenja ambijenta u kojem se nalazi ekran, kao i od ugla gledanja. Što je svjetlije okruženje, i veći ugao koji slika zahvata u vidnom polju posmatrača, to je potrebna veća frekvencija osvježavanja da bi se izbjeglo treperenje. Ugao gledanja ili ugao koji slika zauzima u vidnom polju posmatrača zavisi od udaljenosti posmatrača od ekrana, i to tako da se s povećanjem udaljenosti ugao gledanja smanjuje i obratno. Zbog te zavisnosti umjesto da kažemo da treperenje ekrana zavisi od ugla gledanja, možemo reći da treperenje ekrana zavisi od udaljenosti posmatrača od ekrana.

Osvjetljenje prikazane slike takođe utiče na prag treperenja u izvjesnoj mjeri. Tako za prikaz svjetlije slike i frekvencija osvježavanja mora biti viša. U potpuno mračnom okruženju, kao što su kino sale, frekvencija osvježavanja je u potpunosti određena luminansom same slike.

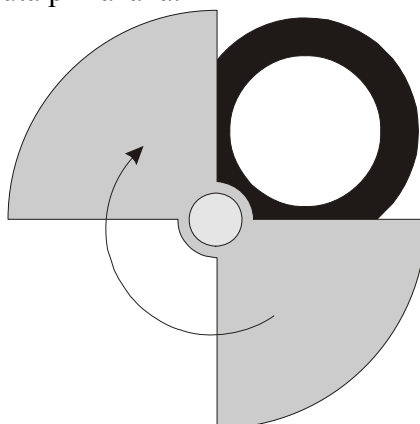
Zbog veće vremenske osjetljivosti perifernog vida od centralnog (fovealnog), prag primjećivanja treperenja se donekle povećava sa većim horizontalnim uglovima gledanja.

U Tabeli 2.1. date su neke vrijednosti frekvencije osvježavanja (*flash/refresh rate*), frekvencije izmjene slika (*frame rate*) koje su u upotrebi u kinu, na televiziji i u računarstvu.

Tabela 2.1. Frekvencije osvježavanja

okruženje	osvjetljenje u okruženju	frekvencija osvježavanja (blicanja)	frekvencija ramova
<i>kino sala</i>	<i>potpuni mrak</i>	<i>48 Hz</i>	<i>24 Hz</i>
<i>televizija</i>	<i>tamno okruženje</i>	<i>50 Hz ≈ 60 Hz</i>	<i>25 Hz ≈ 30 Hz</i>
<i>kancelarija</i>	<i>svijetlo okruženje</i>	<i>promjenjiva npr. 66, 72, 76, 85 Hz</i>	<i>ista kao frekvencija osvježavanja</i>

U mraku kino sale za prevazilaženje treperenja dovoljna je frekvencija od 48Hz . Kad su se tek pojavile pokretne slike, smatralo se da je frekvencija osvježavanja od 48Hz bila prevelika zbog velike potrošnje filmske trake, pa su se za prikaz koristile 24 slike u sekundi, što je bilo dovoljno dobro za prikaz pokreta u filmu. Da bi se ispoštovala frekvencija osvježavanja od 48Hz , konvencionalni kino projektor je koristio dvostruki poklopac, kao na Slici 2.1., sa kojim je svaka slika bila dva puta prikazana.



Slika 2.1. Projektor sa dvostrukim poklopcem

Rijetko su se koristili i projektori sa trostrukim poklopcem, dok se veća realističnost postiže sa projektorom sa jednostrukim poklopcem i prikazom 60 slika u sekundi.

U tamnijim prostorijama, kao što su na primjer dnevne sobe, frekvencija osvježavanja od 60Hz je dovoljna za prikaz bez treperenja. Tehnika preplitanja (*interlaced scanning*), koja će biti objašnjena naknadno, može se uporediti sa projektorom sa dva poklopca. Svaka slika se prikazuje u dva polja. Osvježavanje se ostvaruje frekvencijom pojavljivanja polja (ona je jednaka dvostrukoj frekvenciji broja slika). Za datu brzinu podataka (odnosno slika u sekundi), tehnika preplitanja udvostručuje frekvenciju osvježavanja i omogućuje bolji prikaz pokreta udvostručujuću brzinu odmjerenja u vremenskom domenu. Skeniranje bez preplitanja se naziva *progressivno* (*progressive*).

Kod računarskog monitora koji se koristi u svjetlijem okruženju, potrebno je da frekvencija osvježavanja bude 70Hz pa i viša da bi se izbjeglo treperenje.

2.2. Uvod u skeniranje

U prethodnom odlomku vidjeli smo da izbor frekvencije osvježavanja zavisi od nekoliko faktora (osvjetljenje ambijenta u kojem je ekran, udaljenost posmatrača, osvjetljenje same slike), a sve u cilju eliminisanja nepoželjnih pojava prilikom prikaza slike. Pri tome smo podrazumijevali da se slika trenutno prikazuje u cjelosti. Međutim u praksi to nije baš tako. Pošto prikaz slike može da se posmatra kao ispisivanje jedne po jedne tačke, ili što je češće, prikaz jedne po jedne horizontalne linije slike, potrebno je određeno vrijeme da se prikaže čitava slika.

Skeniranje kao pojam u širem smislu može da ima nekoliko značenja, kao na primjer: sistematsko prikupljanje podataka iz neke oblasti ili područja, snimanje, ispitivanje i slično. Kada govorimo o televiziji, pod skeniranjem podrazumijevamo postepeno ispisivanje ili prikaz slike (piksel po piksel ili linija po linija) na ekranu TV prijemnika ili monitora. Ukoliko vršimo prikaz dovoljnog broja slika tokom određenog vremenskog intervala, dobija se iluzija pokreta u slici.

Postoje dvije osnovne tehnike skeniranja: *progresivno* (sekvencijalno) skeniranje i skeniranje sa preplitanjem ili *interlaced scanning*. Kod progresivnog skeniranja, prikaz čitave slike se dobija skeniranjem, odnosno ispisivanjem jedne po jedne linije slike odozgo na dole. Dovoljno je jedno prebrisavanje ekrana da bi se prikazala čitava slika. Kod skeniranja sa preplitanjem, slika se prikazuje u dva prebrisavanja ekrana, s tim da se skeniraju jednom parne linije slike, a drugi put neparne. Ukoliko se drugačije ne naglasi, uvijek će se podrazumijevati da se radi o progresivnom skeniranju. Nešto više riječi o obe tehnike skeniranja će biti kasnije.

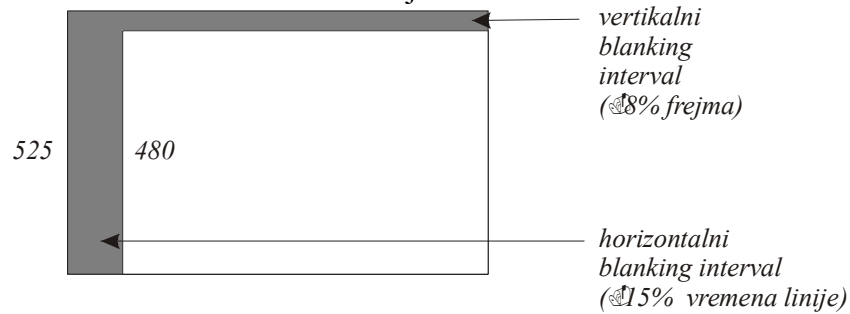
Kod analognog videa, informacija u ravni slike se skenira sa lijeva u desno tokom kratkog fiksnog intervala vremena koji se naziva *vrijeme (interval) aktivne linije*. Horizontalne linije slike se ispisuju (skeniraju) postepeno sa lijeva na desno, i to jedna po jedna, dok se prelaz na sljedeću liniju odvija odozgo prema dole. Skeniranje linija se vrši konstantnom brzinom tako da se može uspostaviti direktna veza između pozicije piksela u slici koja se skenira i vremenske pozicije u električnom signalu koji prenosi sliku. Stacionarni uzorak paralelnih linija duž slike koje se koriste pri skeniranju naziva se *raster*¹. Kod digitalnog videa, uzorci iz matrice slike su poredani isto kao i kod analognog videa, sa lijeva na desno po liniji, a zatim vertikalno odozgo prema dole po linijama.

Kod kamera i ekrana treba naglasiti da prelazak sa kraja tekuće na početak sljedeće linije slike, kao i prelazak sa posljednje linije trenutne slike na prvu liniju sljedeće nije trenutnan i odvija se u toku određenog intervala vremena u procesu skeniranja. Tokom ovog vremenskog intervala odvija se proces koji se naziva *retracing* (repozicioniranje), i on je posljedica konstrukcije ekrana sa katodnom cijevi (*Cathode Ray Tube display - CRT display*).

Pri prelasku sa kraja jedne na početak sljedeće linije skeniranja elektronski top ekrana sa katodnom cijevi se mora isključiti (biti zatamnjen - eng. *blanked*), pa se ovi intervali nazivaju *blanking intervali* ili *intervali zatamnjivanja*. Horizontalni blanking intervali se vremenski pojavljuju između skeniranja dvije susjedne linije, dok se vertikalni blanking intervali (*VBI*) pojavljuju između skeniranja dve slike - rama (*frame*) ili polja. Treba naglasiti da signal koji prenosi televizijsku sliku sadrži i blanking intervale. Radi lakšeg razumijevanja, blanking intervali se mogu interpretirati kao dodatne linije ili pikseli slike koji bi se mogli skenirati ukoliko ne bi bilo potrebe vršiti retracing. Ilustracija blanking intervala preko dodatnih piksela je data na Slici 2.2., i to za standard sa ukupno 525 linija od kojih 480 linija sadrži sliku.

¹ *rustum* - grč. grablje, grabulje zbog sličnosti datog uzorka linija sa uzorkom koji grablje ostavljaju za sobom na pijesku

Pikseli koji predstavljaju blanking intervale naznačeni su sivom bojom, dok je svijetli dio predstavlja sliku za video standard sa 525 linija.



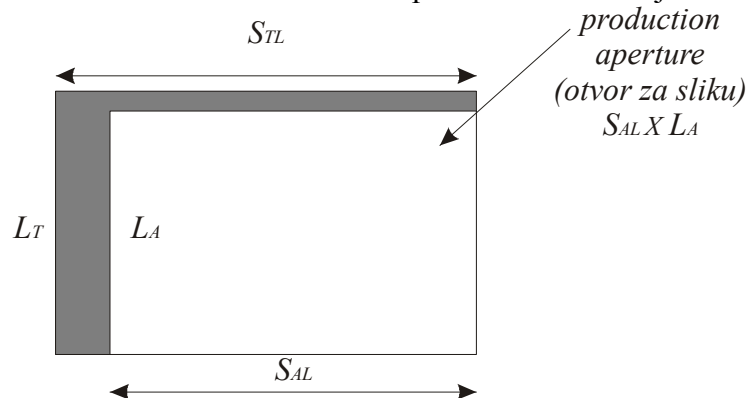
Slika 2.2. Blanking intervali

Horizontalni i vertikalni blanking intervali oduzimaju određeni dio linijskog vremena, kao i vremena prikaza jedne slike ili rama. Otprilike, vertikalni blanking interval iznosi oko 8% vremena skeniranja jednog frejma ili slike, dok horizontalni zauzima oko 15% vremena skeniranja jedne linije.

Kod analognih video sistema tokom blanking intervala se prenose informacije o sinhronizaciji. U principu, kod digitalnih video sistema blanking intervali bi se mogli izostaviti tako da signal prenosi samo sliku. Međutim, ovakva rješenja su u logičkom smislu nešto složenija jer zahtijevaju dva takt signala, od kojih jedan određuje horizontalnu, a drugi vertikalnu poziciju piksela u slici. Umjesto toga kod digitalnih sistema se biraju takve frekvencije takta da uzimaju u obzir postojanje blanking intervala kao kod tipičnih ekrana. U toku ovih intervala, pošto nema slike, mogu se prenositi audio signali, testni signali, titlovi, signali za detekciju i korekciju grešaka ili neke druge informacije.

2.3. Parametri skeniranja

Kod progresivnog skeniranja, sve linije slike se skeniraju sekvencijalno, od vrha slike prema dole, pri čemu se čitava slika mora prikazati brzinom koja je dovoljna za prikaz pokreta. Na Slici 2.3 naznačena su četiri osnovna parametra skeniranja:

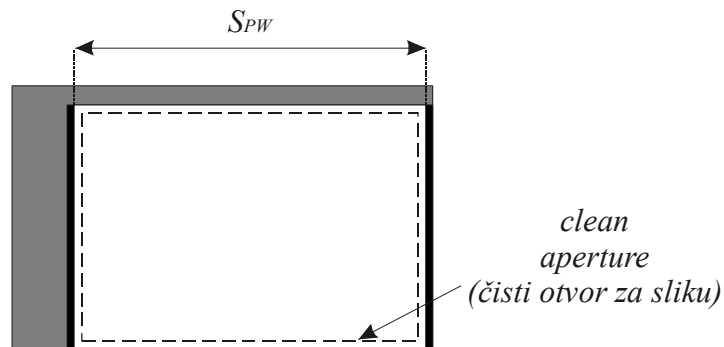


Slika 2.3. Production aperture (otvor za sliku)

- ♦ Ukupan broj linija (L_T) - predstavlja ukupan broj linija koje se skeniraju, uključuje linije slike kao i linije koje predstavljaju vertikalni blanking interval
- ♦ Broj aktivnih linija (L_A) - predstavlja broj linija koje sadrže sliku
- ♦ Broj odmjeraka po čitavoj liniji (S_{TL}) - to je ukupan broj odmjeraka, odnosno piksela, po cijeloj liniji, a ona uključuje i piksele koji predstavljaju horizontalni blanking interval
- ♦ Broj odmjeraka po aktivnoj liniji (S_{AL}) - to je broj odmjeraka koji imaju vrijednost koja je različita od zatamnjenog (blank) nivoa, odnosno broj odmjeraka slike po liniji.

Na Slici 2.3 skicirani su pikseli koji predstavljaju sliku, kao i pikseli koji predstavljaju blanking interval. Ovakav način prikazivanja naziva se *production aperture* (*proizvodni otvor ili otvor za prikaz slike*). Odmjerci koji se nalaze u otvoru za prikaz slike su u stvari matrica piksela slike; to su *aktivni pikseli*. Svi ostali sadrže blanking i nazivaju se *neaktivni, pasivni* (ili *zatamnjeni*). Međutim, iako pasivni pikseli mogu da sadrže neke informacije (titlove i slično), potrošački uređaji ove linije treba da zatamne ili da ih ne prikazuju na ekranu.

Nagli prelaz između neaktivnih i aktivnih piksela može da dovede do pojave artifakata poznatih pod nazivom *zvonjenje* ili *ringing*. Naime, ukoliko video signal na lijevoj strani slike i linije skeniranja ima vrijednost koja je dosta veća od vrijednosti kada je ekran zatamnjen, dešava se pojava zvonjenja kada taj skok video signala naiđe na analogni ili digitalni filter. Slično se dešava i na desnoj strani. Kod studijskog video signala, porast signala od minimalne do maksimalne vrijednosti i obrnuto nije skokovit, već se odvija kroz nekoliko prelaznih odmjeraka, koji bi u idealnom slučaju trebali da imaju oblik podignutog kosinusa (\cos^2). Aktivni odmjerci obuhvataju ne samo sliku, već i prelazne odmjerke, kao na Slici 2.4. Širina slike koju predstavljaju svi aktivni odmjerci je označena sa S_{PW} , kao što je to naznačeno na slici, a prelazni odmjerci su na istoj slici naznačeni crnom bojom. Studijska oprema bi trebala da održi što veću moguću širinu slike koju dozvoljava *otvor za sliku*, uzimajući u obzir i prelazne odmjerke.



Slika 2.4. Čisti otvor za sliku

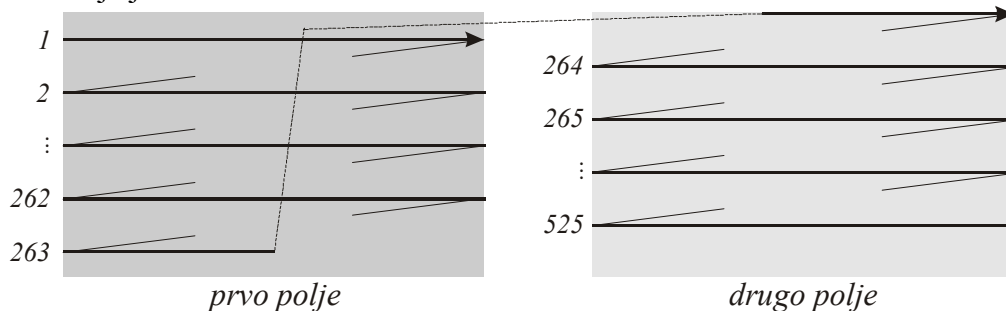
Čisti otvor za sliku u stvari predstavlja sliku koja se dobija na ekranu, i trebao bi biti subjektivno bez artifakata koji nastaju kao posljedica filtriranja. Čisti otvor ne sadrži prelazne odmjerke.

2.4. Skeniranje sa preplitanjem ili interlaced scanning

Dosad smo sliku tretirali kao matricu sa S_{AL} redova i L_A kolona piksela, i pri tome smo zanemarivali prostornu raspodjelu intenziteta svjetlosti na samom pikselu, odnosno profil tačke (eng. *spot profile* - profil, izgled tačke). Ako je profil tačke takav da postoji značajna razlika između raspodjele intenziteta svjetlosti između susjednih linija slike, struktura linija slike bi mogla da bude vidljiva na određenoj udaljenosti. Razmak između linija skeniranja je funkcija razmaka između linija slike i profila tačke. Veličinu tačke (eng. *spot size*) karakteriše prečnik tačke, i pri tome se uzima onaj prečnik pri kojem intenzitet svjetlosti na obodu tačke iznosi 50% intenziteta svjetlosti u centru tačke. Za datu udaljenost između linija skeniranja, manja veličina tačke će uticati na to da linijska struktura postane primjetna. Ukoliko želimo da se to ne desi, posmatrači moraju da budu na većoj udaljenosti od ekrana.

Tehnika skeniranja sa preplitanjem ili *interlaced scanning* je postupak kod kojeg možemo smanjiti veličinu tačke bez bojazni da će se primijetiti linijska struktura slike. Duž čitave visine, slika se skenira tačkom čija je vertikalna dimenzija takva da prilikom skeniranja

ostaju praznine između susjednih linija skeniranja. Zatim se, nakon $1/50$ s ili $1/60$ s, slika ponovo skenira, ali sad sa pomjerajem tako da se popune dobijene praznine. Zbog toga se kompletna slika kod skeniranja sa preplitanjem dobija nakon dva prebrisavanja ekrana. Dio slike koji se dobije jednim prebrisavanjem, a koji sadrži samo polovinu informacija iz slike naziva se *polje*. *Frame* ili slika se sad sastoji od dva *polja*, naznačenim kao *prvo* i *drugo* polje. Način skeniranja je skiciran na Slici 2.5.



Slika 2.5. Skeniranje sa preplitanjem

Za fiksni nivo primjećivanja linija skeniranja ova tehnika omogućava manju udaljenost posmatrača u odnosu na ekrane sa progresivnim skeniranjem. Hronološki, skeniranje sa preplitanjem se u početku koristilo ne samo za prikaz, već i prilikom prikupljanja, odnosno snimanja signala u televiziji.

Skeniranje bez preplitanja (*progresivno* ili *sekvencijalno*) je uobičajeno kod stonih računara i uopšte u računarstvu. Ovaj način skeniranja podrazumijeva da se slika dobije jednim prebrisavanjem ekrana, skeniranjem jedne po jedne linije od vrha slike prema dole. Kod televizije, progresivno skeniranje nije bilo toliko rasprostranjeno i njegova veća primjena je zaživjela tek pri pojavi digitalne televizije. Iz tog razloga tehnika skeniranja sa preplitanjem još uvijek prevladava kod radiodifuznog emitovanja, a takođe je dominantna kod televizije visoke definicije.

2.5. Twitter efekat

Osjetljivost vida na treperenje zavisi i od širine slike. Pošto je visina slike manja od širine, ona ima manji uticaj na treperenje. Međutim, po visini se javlja drugi problem i to prilikom prikaza detalja čije su vertikalne dimenzije veoma male, odnosno detalji koji uzrokuju da se susjedne linije skeniranja bitno razlikuju. Kod progresivnog skeniranja, vidljivost linija skeniranja je faktor ograničenja smanjivanja veličine tačke (odnosno piksela), a samim tim i prikaza detalja slike. Kod skeniranja sa preplitanjem granica smanjivanja dimenzija tačke nije baš jasno definisana zbog specifičnog načina skeniranja, ali treba spomenuti da ova tehnika daje nešto bolje rezultate. Međutim, kod skeniranja sa preplitanjem se pojavljuje drugi nepoželjan efekat koji se naziva *twitter*.



Slika 2.6. Twitter efekat

Kada se u slici nalaze detalji čija je rezolucija po vertikali uporediva sa razmakom između linija skeniranja, kao na Slici 2.6., prilikom skeniranja sa preplitanjem sadržaj slike u dva polja će se bitno razlikovati na ekranu.

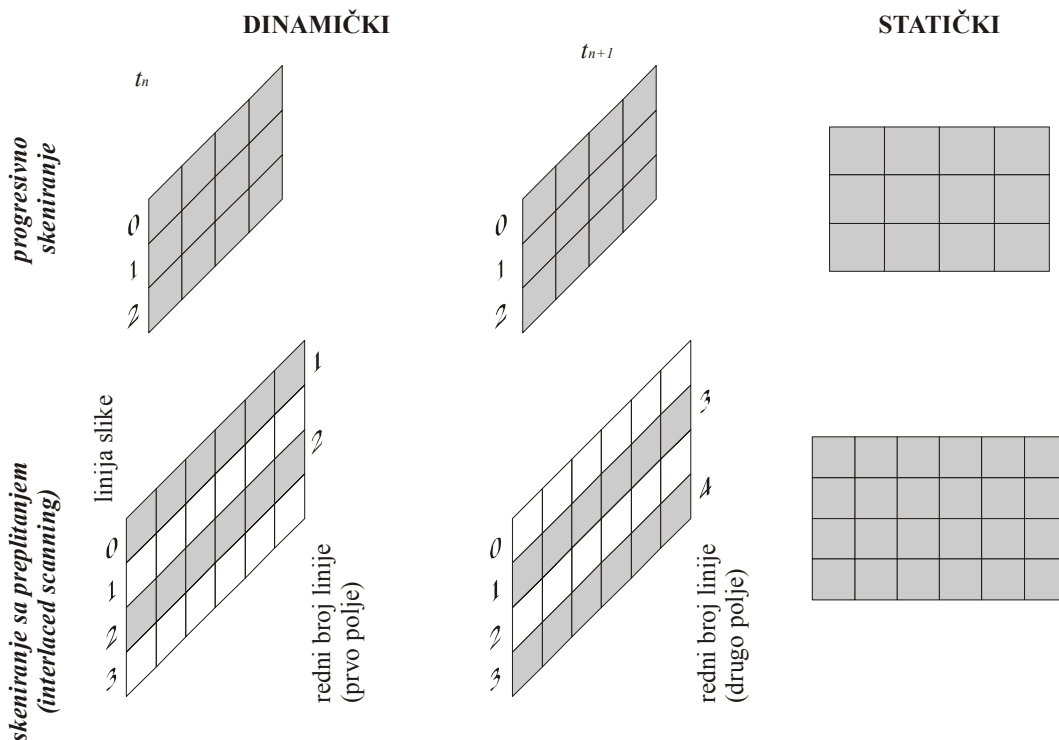
Pri praktičnim frekvencijama osvježavanja od 50 ili 60Hz ovo uzrokuje pojavu koja se naziva *twitter*. Ovakav fenomen se opaža kao svjetlucanje, ili kao veoma brzo kretanje gore-dole. Ako ovakvi detalji zauzimaju veće područje slike umjesto ove pojave će se primijetiti treperenje. *Twitter* se ponekad naziva i međulinijsko treperenje, ali to je loše odabran termin jer je treperenje pojava na širem području slike.

Twitter efekat se pojavljuje ne samo kod degenerisanih slika kao što je uzorak crno bijelih linija na Slici 2.6., već i kod običnih slika sa velikim kontrastom po vertikali. Visoko kvalitetne video kamere imaju optičke prostorne filtere da bi oslabile detalje koji bi mogli prouzrokovati *twitter*. Ukoliko se skeniranje sa preplitanjem koristi kod kompjuterske grafike, vertikalni detalji se moraju filtrirati da bi se izbjeglo treperenje. Kolo koje to obavlja naziva se *twitter filter*.

2.6. Poređenje progresivnog i skeniranja sa preplitanjem

Za fiksnu udaljenost gledanja, oštrina slike se poboljšava sa smanjivanjem veličine piksela. Međutim, smanjivanjem veličine piksela ispod određene vrijednosti, u zavisnosti od profila tačke ekrana postaće vidljive linije skeniranja ili pikseli. U principu, povećanje širine propusnog opsega kanala za prenos slike ili smanjenje profila tačke kao krajnji rezultat omogućava smanjenje udaljenosti posmatrača od ekrana, što omogućava širi ugao gledanja. Međutim, pošto potrošači određuju udaljenost gledanja može se uzeti da je ta udaljenost fiksna, i umjesto toga reći da je poboljšana rezolucija.

Poređenje dva osnovna principa skeniranja je dato na Slici 2.7.



Slika 2.7. Poređenje progresivnog i skeniranja sa preplitanjem

Na prvi pogled, sistemi koji koriste skeniranje sa preplitanjem imaju dvostruko veći broj piksela, i u širem smislu dvostruko veću rezoluciju u odnosu na sistem sa progresivnim skeniranjem sa istim protokom podataka i frekvencijom osvježavanja. Ukoliko se radi o mirnoj slici odnosno statički gledano to je stvarno tako. Međutim, već kod pokretnih slika ili dinamički gledano, dolaze do izražaja određeni nedostaci skeniranja sa preplitanjem. O nekim nedostacima ove tehnike vezanim za prikaz pokreta će više biti riječi kasnije. Istorijski, kamere koje koriste skeniranje sa preplitanjem su projektovane sa dovoljno velikom vertikalnom rezolucijom da se twitter ne primijeti. Rezolucija je tokom godina povećavana čak i više nego što to tehnika preplitanja dozvoljava. Međutim, sva poboljšanja u ovoj tehnici su se uvodila sa određenim kompromisom, tako da su neki nedostaci koji se javljaju pri prikazu pokreta i dalje ostali.

2.7. Notacija u skeniranju

U računarstvu, formati prikaza slike se predstavljaju sa dva broja: broj piksela po širini slike, i broj linija slike, i pri tome se podrazumijeva da se radi o kvadratnom odmjeravanju slike.. Kao alternativno rješenje formati se mogu predstavljati simbolički - *VGA*, *SVGA*, *XGA*, kao što je to dato u Tabeli 2.2. Nedostatak ovakve notacije ogleđa se u tome što ne naglašava o kojoj se frekvenciji osvježavanja radi.

Tabela 2.2. Notacija skeniranja u računarstvu

<i>Notacija</i>	<i>Matrica piksela</i>
VGA	640×480
SVGA	800×600
XGA	1024×768
SXGA	1280×1024
UXGA	1600×1200
QXGA	2048×1365

Tradicionalno, video skeniranje je nekad označavano u sljedećem obliku:

625/50/2:1

Pri tome je značenje oznaka sljedeće:

- ♦ Prvi navedeni broj označava broj linija jednog frejma (slike ili polja), a uključuje broj linija slike zajedno sa vertikalnim zatamnjenim zaglavljem.
- ♦ Broj iza prve kose crte označava frekvenciju pojavljivanja frejmova ili polja u hercima
- ♦ Iza druge kose crte se nalazi oznaka koja nam govori da li se radi o progresivnom (1:1) ili o skeniranju sa preplitanjem (2:1). Ako je ova oznaka izostavljena podrazumijeva se da se radi o skeniranju sa preplitanjem.

Standard za skeniranje 525/59.94/2:1 se koristi u Sjevernoj Americi i Japanu; 625/50/2:1 preovladava u Evropi, Aziji i Australiji. Sve doskora ovo su bili i jedini načini skeniranja koji su se koristili pri radiodifuziji. Nedavno, digitalna tehnologija je omogućila nekoliko novih standarda u skeniranju. Pošto konvencionalni način obilježavanja skeniranja ne može adekvatno da opiše nove sisteme skeniranja, usvojeni su novi načini obilježavanja. Novi način obilježavanja nam daje informacije o broju aktivnih linija slike, o tome da li se radi o progresivnom (*p*) ili skeniranju sa preplitanjem (*i*), i kolika je frekvencija osvježavanja.

Slova *p* i *i* su mala i pisana da bi se izbjegla moguća zabuna slova "i" sa jedinicom.

<i>računarska notacija</i>	<i>video notacija</i>
640 p 480	525/59.94

480i29.97

Slika 2.8. *Nova notacija u skeniranju*

Na Slici 2.8. je data računarska, tradicionalna i nova notacija jednog te istog standarda. Standard 480i29.97 nam govori da se radi o slici sa 480 linija, skeniranju sa preplitanjem i da je frekvencija osvježavanja 29.97Hz. Računarska notacija nam daje samo dimenzije slike u pikselima, dok kod tradicionalnog obilježavanja znamo samo ukupan broj linija slike i frekvenciju osvježavanja.

Tradicionalna video notacija (kao npr 625/50) nije dosljedna jer daje ukupan broj linija po frejmu i broj prikaza polja u sekundi. Neki smatraju da bi trebalo umjesto 525/59.94 da se označava sa 480i59.94 da bi se izbjegla konfuzija.

Kod nove notacije, konvencionalni video sa 525/59.94/2:1 se označava sa 480i29.97; konvencionalni 625/50/2:1 ima oznaku 576i25. HDTV sistemi obuhvataju 720p60 i 1080i30. Filmski bliske verzije HDTVa se označavaju sa 720p24 i 1080p24. Formati slike kod ove notacije nisu eksplicitno naglašeni, 720p, 1080i, i 1080p svi imaju format slike 16:9 pošto za te standarde ne postoji standard 4:3, dok kod 480i30.00 ili 480i60.00 bi mogli u principu da koriste oba formata slike.

2.8. Pojava artifakata kod skeniranja sa preplitanjem

Kamera koja koristi skeniranje sa preplitanjem zabilježi 60 (ili 50) jedinstvenih polja (slika) u sekundi. Ako prizor sadrži objekat u pokretu, čija je brzina bliska brzini kamere, svako polje sadrži polovicu informacije o tom objektu, s tim da je informacija u drugom polju pomjerena u skladu sa kretanjem objekta.



a) testna slika

b) prvo polje

c) drugo polje

d) kompletna slika

Slika 2.9. *Prikaz pokreta kod skeniranja sa preplitanjem*

Pogledajmo testni uzorak na Slici 2.9a., koji sadrži crnu pozadinu i bijeli krug koji se kreće dovoljno velikom brzinom. Prvo i drugo polje koje je kamera uhvatila je prikazano na Slici 2.9. b) i c). Pri ovome smo zanemarili zamućenje slike zbog objekta u pokretu jer je vrijeme ekspozicije vrlo kratko. Slika u drugom polju je zakašnjena u odnosu na prvu za polovicu trajanja jednog frejma, tako da se pri snimanju drugog polja objekat već pomjerio.

Kod ekrana koji koriste skeniranje sa preplitanjem, pri prikazu materijala koji je snimljen sa kamerom koja takođe koristi skeniranje sa preplitanjem ne pojavljuju se ni vremenski ni

prostorni artefakti. Naime, zbog iste tehnike skeniranja pri snimanju i prikazu, slika na ekranu se prikazuje onako kako stvarno izgleda i u vremenu i u prostoru. Međutim, često je neophodna rekonstrukcija progresivnih frejmova za visokokvalitetno pozicioniranje slike, promjenu njenih dimenzija, konverziju naviše ili naniže, ili za konverziju između različitih standarda. Moglo bi se pomisliti da su linije slike kod signala koji koristi skeniranje sa preplitanjem samo ispreturane ili preuređene; međutim, u prisustvu pokreta samo spajanje dva polja u jednu sliku daje neželjene efekte kao što je to dato na Slici 2.9.d. Pojava ovakvih artefakata se naziva "*mišji zubi*" (eng. mouse teeth) ili "*cijepanje polja*" (eng. field tearing). Neželjene pojave ovakvog tipa se umanjuju postupkom poznatim pod imenom *deinterlacing*.

Skeniranje sa preplitanjem ima i još jedan nedostatak. Naime, pretpostavimo da u slici postoji dio ili element koji se pomjera vertikalno, prema dole ili gore, i to brzinom jedne linije tokom svakog polja. Za sistem 480i29.97 to je pomjeranje elementa za 1/480 visinu slike u tokom 1/60 sekunde, odnosno taj element pređe čitavu sliku za 8 sekundi. Zbog ovakve vrste skeniranja čak polovica vertikalnih informacija slike će se izgubiti. Pri nekim drugim frekvencijama osvježavanja takođe se gubi dio vertikalne informacije u slici. Prema tome, kod skeniranja sa preplitanjem prikaz vertikalnog kretanja može da proizvede ozbiljne artefakte.

2.9. Prikaz pokreta

Izbor frekvencije osvježavanja je veoma bitan za prikaz pokreta. Da bi se izbjeglo primjetno treperenje slike, slika se mora prikazivati na ekranu nešto većom brzinom nego što je to potrebno da bi se dobio dojam pokreta. U zavisnosti od konkretne primjene, zbog različitih kvaliteta slike i uslova gledanja biraju se i različite frekvencije osvježavanja. Frekvencija osvježavanja je obično već izabrana i ugrađena u video sistem i predviđeno je da se ne mijenja.

Pri prikazu jednog frejma u principu možemo imati dva pristupa. Ako ekran prikazuje, odnosno osvjetljava frejm tokom čitavog vremena između prikaza dva susjedna frejma, onda se radi o ekranu koji proizvodi konstantno osvjetljenje. Ukoliko se frejm prikazuje samo tokom dijela vremena između prikaza dva susjedna frejma pa se onda zatamni, onda se radi o ekranu koji proizvodi impulsno osvjetljenje. Kod ekrana koji proizvode konstantno osvjetljenje za vrijeme prikaza jednog frejma uticaj treperenja je minimalan. Moglo bi se zaključiti da su ovakvi ekrani pogodniji za upotrebu nego oni kod kojih je impulsno osvjetljenje. Međutim, ukoliko kod ekrana sa konstantnim osvjetljenjem imamo prikaz nekog kretanja čija brzina je bliska brzini prikaza frejmova moglo bi postati primjetno zamućenje dijela slike gdje je prikazan pokret. Ovaj problem je izražen pri većim uglovima gledanja, odnosno kod HDTV.

Filmski zapis sa 24 slike u sekundi se prilagođava za *interlaced video* sa 60 polja u sekundi procesom koji se naziva *2-3 pulldown*. Postupak se odvija tako što se prva slika prebacuje u dva polja, dok naredna u tri video polja, a zatim se proces ponavlja. Ovakvim postupkom dobijamo video sa frekvencijom osvježavanja koja je 59.94Hz, a ne 60Hz, pa film ide 0.1% sporije od brzine 24 slike u sekundi. Ova tehnika se može koristiti i za konverziju u progresivni video sa 59.94Hz ili 60Hz. Postupak prebacivanja u format *576i* se naziva *2-2 pulldown*: Svaka slika se skenira u dva polja (ili frejma), i pri tome brzina prikaza se povećava za 4%.

2.10. Klasifikacija video sistema

Klasifikacija video sistema može se izvršiti sa različitih aspekata. Ukoliko posmatramo način prenosa video signala, sve sisteme možemo klasifikovati na analogne i digitalne. Analogni video sistemi sliku i zvuk pretvaraju u analogni električni signal koji se dalje utiskuje u signal nosilac i na taj način prenosi do krajnjeg korisnika. Digitalni video sistemi sliku i zvuk pretvaraju u binarni niz podataka, a dalji prenos se odvija u skladu s digitalnim prenosom podataka.

Prema vrsti samog signala koji prenosi sliku, video sisteme možemo klasifikovati na one koji koriste komponentni signal i one koji koriste kompozitni. Kod komponentnog signala, slika se prenosi u tri odvojene komponente, i svaka komponenta se prenosi nezavisno jedna od druge. Sa druge strane, video sistemi koji koriste kompozitni signal koriste samo jedan signal za prenos slike. Kao krajnji rezultat određenih postupaka obrade slike, tri komponente slike su transformisane u jedan signal koji se dalje prenosi do krajnjeg korisnika.

Sa aspekta rezolucije, odnosno definicije slike, video sisteme možemo klasifikovati na SDTV (Standard definition TV) i HDTV (High definition TV). Granica između ove dvije kategorije nije baš precizno definisana, ali se može reći da HDTV video sistemi sadrže 720 linija slike i više, dok je kod SDTV video sistema broj linija slike manji.

Zbog malog propusnog opsega za prenos televizijskog signala, u početku emitovanja televizije nije korišten princip prenosa tri odvojene komponente slike, pa su razvijene nove tehnike kao što su NTSC (*National Television System Comitee*), i PAL (*Phase Alternating Line*). Ove tehnike su kombinovale (kodovale) tri komponente slike u jedan kompozitni signal. Kompozitni video se još uvijek koristi za analogno emitovanje i u potrošačkoj opremi, kao i kod određene digitalne opreme koju koriste neke televizije u Sjevernoj Americi. Međutim, praktično sva nova video oprema - uključujući i potrošačku - kao i HDTV oprema koristi komponentni video, bilo da su to analogne $Y'P_BP_R$ ili digitalne $Y'C_B C_R$ komponente.

Tabela 2.3. Klasifikacija video sistema

	<i>signal</i>	<i>analogni</i>	<i>digitalni</i>
HDTV	<i>komponentni</i>	$R'G'B'$ ⁷⁰⁹ $Y'P_B P_R$	$4:2:2$ ⁷⁰⁹ $Y'C_B C_R$
SDTV	<i>komponentni</i>	$R'G'B'$ ⁶⁰¹ $Y'P_B P_R$	$4:2:2$ ⁶⁰¹ $Y'C_B C_R$
	<i>hibridni</i>	<i>S-video</i>	-
	<i>kompozitni</i>	<i>NTSC</i> <i>PAL</i>	$4f_{sc}$

U Tabeli 2.3. je data klasifikacija video sistema, zajedno sa načinom kodovanja boja. Komponente slike koje se koriste pri prenosu ($Y'P_B P_R$ odnosno $Y'C_B C_R$) mogu se dobiti iz $R'G'B'$ komponenti, koje predstavljaju RGB komponente nakon gama korekcije. Kodovanje boja se vrši prema standardima datim u preporukama Međunarodne unije za telekomunikacije broj 601 i 709, a način dobijanja Y' komponente za SDTV i HDTV signal dat relacijama (1.1) i (1.2).

Kod digitalnog komponentnog signala često se koristi tehnika pododmjeravanja ili subsampling, čiji je cilj da se smanji broj potrebnih bita za prenos slike i ekonomičnije korištenje kanala za prenos slike. Ova metoda u stvari predstavlja postupak za snižavanje horizontalne frekvencije odmjeravanja komponenti slike. Snižavanje horizontalne frekvencije odmjeravanja je moguće kod komponenti koje sadrže informaciju o boji jer je osjetljivost vida na boju mnogo manja nego osjetljivost na osvjetljenje.

Ukoliko se ne koristi subsampling, signal ima oznaku 4:4:4, i pri tome svaka komponenta signala ima jednak broj odmjerača. Usvojen je ovakav način označavanja jer se posmatra učinak pododmjeravanja na dijelu slike veličine 2×2 piksela. Tako signal kod kojeg nije izvršen subsampling ima po četiri piksela za svaku komponentu. Ukoliko se koristi 8 bita za kodovanje vrijednosti piksela, za dio slike od 2×2 piksela nam je potrebno 12 bajtova. Kada se koristi subsampling, kao na primjer signal sa oznakom 4:2:2, C_B i C_R komponente za dio slike veličine 2×2 piksela predstavljaju se sa samo dva piksela, pa te komponente imaju dvostruko manje odmjerača od Y' komponente. Kod takvog signala, za dio slike veličine 2×2 piksela nam je potrebno ukupno 8 bajtova.

Kompozitni NTSC i PAL sistemi se koriste samo kod 480i i 576i varijanti, dok HDTV sistemi koriste samo komponentni video. *S-video* je hibridna varijanta komponentnog analognog signala i kompozitnog analognog NTSC i PAL signala. U pomenutoj tabeli, *S-video* je klasifikovan u zasebnu sedmu kategoriju. Postoje i neki digitalni video sistemi koji koriste standard $4f_{SC}$, a to je u stvari digitalna varijanta kompozitnog SDTV signala.

2.11. Konverzija između različitih sistema

Kod videa, termin kodovanje se tradicionalno odnosi na pretvaranje $R'G'B'$ komponenti u NTSC ili PAL kompozitni signal. Termin dekodovanje, kada se radi o video sistemima, podrazumijevao je pretvaranje NTSC ili PAL kompozitnog signala u $R'G'B'$. Kodovanje i dekodovanje su danas generalizovani termini, mogu se odnositi na JPEG kompresiju, MJPEG, MPEG i slično gdje se ti postupci koriste.

Transkodovanje (prekodovanje) se u ovoj oblasti odnosi na konverziju između različitih metoda kodovanja boje, i to kod sistema koji imaju iste načine skeniranja. Transkodovanje podrazumijeva interpolaciju hrominentne komponente, njeno pododmjeravanje i matične operacije na njoj. Transkodovanje kompozitnog videa podrazumijeva dekodovanje signala, a zatim ponovno kodovanje u drugi standard. Razvojem kompresije u oblasti memorisanja i prenosa signala, transkodovanje je dobilo šire značenje koje podrazumijeva razne metode ponovnog kodovanja niza podataka, njihovu kompresiju ili dekompresiju.

Konverzija skeniranja se odnosi na konverziju između standarda skeniranja koji imaju različitu prostornu strukturu, bez korištenja vremenske obrade signala. Ulazna i izlazna brzina frejmova je različita, moguća je i degradacija kvaliteta prikaza pokreta. (U računarskoj terminologiji imamo naziv skaliranje - *scaling*)

Hronološki, *konverzija naviše* se odnosila na konverziju iz SDTV u HDTV, a *konverzija naniže* iz HDTV u SDTV. Takođe, nekad se podrazumijevalo da je brzina frejmova prije i nakon obrade bila ista, dok danas to ne mora da bude. Visoko kvalitetna konverzija naviše i naniže obuhvata i prostornu interpolaciju, s tim da se najbolji rezultati postižu ukoliko se radi o signalu sa progresivnim načinom skeniranja. Ukoliko je izvor zasnovan na skeniranju sa preplitanjem neophodno je prvo izvršiti deinterlacing, čak i ako se za krajnji prikaz koristi skeniranje sa preplitanjem. Konverzija između standarda je termin koji označava konverziju između standarda sa različitim brzinama frejmova. U početku ovaj termin se koristio samo za konverziju između standarda sa različitim brojem piksela (kao na primjer konverzija između 480i i 576i), danas konverzija između standarda može značiti i promjenu načina skeniranja. Konvertori standarda koji se danas koriste često imaju i memoriju za pamćenje polja ili frejmova, koja može memorisati i više frejmova zbog boljeg kvaliteta slike, kao i dio za interpolaciju slike sa kompenzacijom pokreta. Složenost konverzija između standarda 480i i 576i je u početku bio uzrok teškoća koje su se pojavljivale pri prilagođavanju evropskog video materijala za prikaz u Sjevernoj Americi i Japanu ili obrnuto. Međutim, ubrzan razvoj tehnologije omogućio je da se takvi problemi prevaziđu.

3. REZOLUCIJA

Kvalitet slike koji se dobija kod krajnjeg korisnika zavisi od mnogo faktora, pogotovo kada govorimo o analognoj televiziji. Jedan od načina mjerenja kvaliteta slike je i rezolucija. Kod prvih analognih televizijskih sistema rezolucija slike se izražavala u broju horizontalnih linija slike, odnosno broju piksela slike po vertikali. Rezolucija slike kod krajnjeg korisnika direktno zavisi od propusnog opsega sistema koji se koristi za snimanje, obradu, prenos i memorisanje, kao i od širine spektra signala koji se prenosi. Iz tog razloga osvrnućemo se na osnovne parametre signala i sistema koji mogu da utiču na rezoluciju.

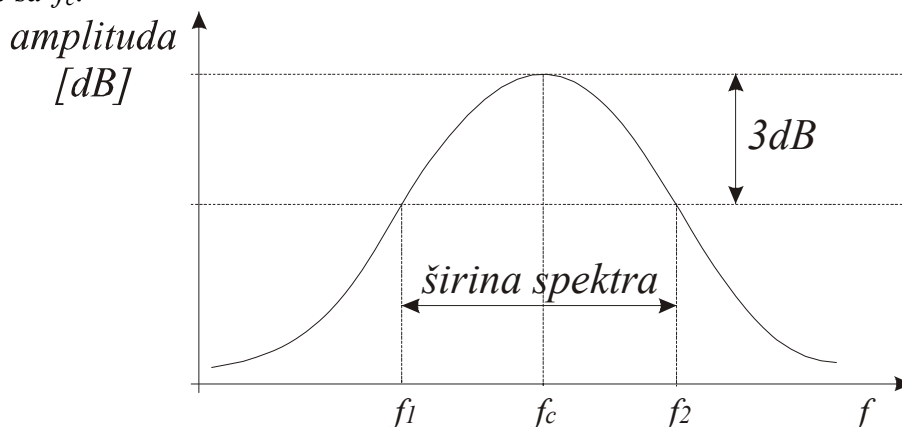
3.1. Osnovni parametri video signala i sistema

Kada govorimo o snimanju, prenosu i prijemu televizijskog ili video signala, podrazumijevamo da se radi o električnom signalu koji predstavlja sliku i zvuk. Da bismo mogli analizirati kvalitet slike koja se isporučuje krajnjem korisniku, moramo poznavati osnovne karakteristike signala koji prenosimo.

Signal koji prenosimo možemo posmatrati u dva domena, a to su vremenski i frekvencijski domen. U oba domena osnovni parametri koji opisuju signal su amplituda i frekvencija signala.

Za analogne signale, koje možemo posmatrati kao kontinualnu funkciju vremena, *širina spektra signala* (Δf) predstavlja opseg frekvencija za koje je vrijednost Furijeove transformacije signala (odnosno spektar signala) različita od nule. Pošto je širina spektra definisana na ovaj način često veoma široka, uzima se da spektar signala čini samo onaj opseg frekvencija za koje amplituda Furijeove transformacije signala ima vrijednost iznad određenog praga. Za granicu spektra obično se uzima frekvencija pri kojoj je amplituda signala manja za 3dB u odnosu na maksimalnu amplitudu. Izraženo preko snage, to je ona frekvencija pri kojoj je snaga signala jednaka polovini maksimalne vrijednosti snage.

Na Slici 3.1. je data ilustracija računanja širine spektra signala. Širina spektra signala se dobija kao $\Delta f = f_2 - f_1$. Frekvencija pri kojoj amplituda signala ima maksimalnu vrijednost označena je sa f_c .



Slika 3.1. Definisane širine spektra signala

Značajan parametar analognih signala je i Nikvistova frekvencija, odnosno minimalna frekvencija odmjerenja. *Nikvistova frekvencija* ($2f_g$) predstavlja frekvenciju odmjerenja pri kojoj je u potpunosti moguće rekonstruisati polazni analogni signal iz niza odmjeraka dobijenih odmjerenjem tom frekvencijom. Nikvistova frekvencija se računa kao dvostruka vrijednost najviše frekvencije iz spektra signala.

Kada je riječ o digitalnim signalima, njih karakteriše nekoliko parametara. *Sampling rate* ili *frekvencija odmjerenja* predstavlja frekvenciju kojom je odmjeren analogni signal iz kojeg je dobijen dati digitalni signal. Može predstavljati i brzinu dolaska odmjeraka signala na ulaz u sistem. *Dužina kodnih riječi* (n) predstavlja broj bita koji se koriste za kodovanje odmjeraka signala. Brzina protoka bita signala ili *bit rate* nam govori koliko bita u sekundi obezbjeđuje dati signal kao izvor informacija.

Kada je riječ o sistemima za prikupljanje, obradu i prenos signala, njih takođe karakterišu određeni parametri. Ako govorimo o analognim sistemima, njihov osnovni parametar je *propusni opseg sistema*, koji predstavlja opseg frekvencija koje sistem može da prikupi, prenese ili obradi. Kod digitalnih sistema, osnovni parametar je *kapacitet sistema*, koji se izražava u bitima u sekundi. Kapacitet sistema se može definisati kao maksimalan broj bita u sekundi koji sistem može da prikupi, prenese ili obradi.

3.2. Kellov efekat

Televizijski sistemi tridesetih godina nisu uspjeli da omoguće maksimalnu rezoluciju koja se očekivala prema Nikvistovom radu. Godine 1934., Kell je objavio članak u kojem je objasnio da je najveća rezolucija koju je postigao RCA eksperimentalni televizijski sistem manja od teoretski maksimalne. Faktor smanjenja je označio sa k , a kasnije je postalo uobičajeno da se naziva Kellov faktor. U svojim prvim radovima, Kell je utvrdio vrijednost k od 0.64, međutim nije objasnio na koji način se to dobija. U njegovim kasnijim radovima (1940.god) faktor k je imao vrijednost 0.8.

Kellov faktor se određuje prema subjektivnom kriterijumu. Ukoliko bi sistem imao širok profil tačke, sa Gausovom raspodjelom osvjetljenja, struktura linija na testnoj slici bi postala neprimjetna smanjivanjem razmaka između linija ispod određene vrijednosti. Ukoliko bi testna kamera imala vrlo male senzorske tačke, ili ukoliko bi ekran imao vrlo ostru raspodjelu svjetlosti u tački (kao na primjer kvadratnu), Kellov faktor se određuje pojavom primjetnih artifakata pri smanjivanju razmaka između linija. Ovo je takođe neobjektivan kriterij.

Kell i drugi su objavljivali članke sa različitim teoretskim dokazima da opravdaju brojne vrijednosti ovog faktora, međutim opisana mjerenja su veoma slabo objašnjena pa se dovodi u pitanje njihova relevantnost. Takođe veliki raspon vrijednosti za k koje se dobiju tome ide u prilog. Iako Kellov faktor nije precizno određen, Kell je dao značajan doprinos u području televizije i s pravom ovaj efekat nosi njegovo ime.

Objašnjenje ovog efekta:

Kod video sistema, koji sadrži senzore, obradu signala i njegov prikaz, Kellov efekat se manifestuje kao smanjenje maksimalne moguće rezolucije u odnosu na vrijednost dobijenu Nikvistovim kriterijumom, i uzrokovan je prostornom raspodjelom osvjetljenja. U takvim sistemima potrebno je postići takvu raspodjelu osvjetljenja kod koje se neće primijetiti linijska struktura slike, a da pri tome ne dođe do prevelikog preklapanja između susjednih linija ili piksela slike, što bi dovelo do gubitka informacija u slici.

Kellov rad iz 1934. godine je razmatrao samo progresivno skeniranje. Sa razvojem skeniranja sa preplitanjem, postalo je jasno da će doći do twitter efekta pri jakim vertikalnim detaljima. Iz tog razloga bilo je potrebno smanjiti vertikalnu rezoluciju kod ovakvih sistema, pa je za istu veličinu tačke na ekranu, faktor k kod interlaced sistema manji u odnosu na progresivno skeniranje. Faktor k kod sistema koji koriste skeniranje sa preplitanjem mnogi su isto nazvali Kellov faktor, mada ima slučajeva da se koristi i naziv interlace faktor ili interlace koeficijent.

3.3. Rezolucija

Televizija standardne definicije (SDTV) formata 1280×720, i HDTV formata 1920×1080 imaju različit broj piksela. Kvalitet slike koji se dobija sa određenim brojem piksela zavisi od prirode informacija u slici (na primjer da li su podaci rasterski vezani ili filtrirani po Nyquistu), kao i od prirode displeja na kojem se prikazuje (na primjer da li je rekonstrukcija slike kvadratna ili po Gausovoj raspodjeli).

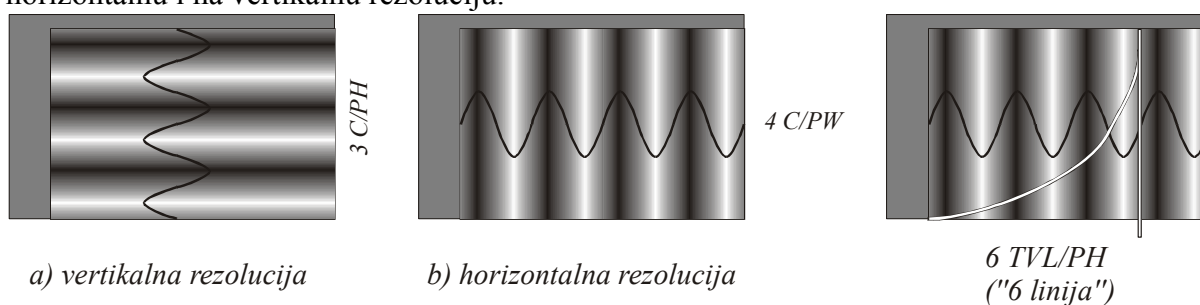
U računarstvu, nažalost, termin *rezolucija* je postao uobičajen prosto za broj piksela po vertikali i horizontali u pikselnoj matrici, ne uzimajući u obzir preklapanje pri snimanju ili pri prikazu slike. Za neki sistem se se može reći da ima "rezoluciju" 1152×864, ukupan broj piksela mu je oko milion (ili jedan megapiksel 1 Mpx). Kada se ovako interpretira, rezolucija ne zavisi od toga da li se pojedinačni pikseli mogu razlikovati na ekranu.

Rezolucija kod digitalnih sistema je ograničena brojem piksela duž širine i visine slike. Međutim, pošto se povećanjem frekvencije povećava broj detalja u slici, elektronski i optički efekti ih umanjuju, čak i sa ograničenjima dobijenih prilikom odmjeravanja. Kod video materijala, važna je rezolucija koja se dobija kod krajnjeg korisnika, odnosno gledaoca, a isto tako i propusni opseg pri snimanju, zapisivanju, obradi i prikazu slike. Kod videa, rezolucija se odnosi na maksimalan broj parova linija (ili ciklusa) koji se mogu razlučiti na ekranu. Ovo je subjektivan kriterij. Rezolucija se povezuje sa osjećajem oštine slike.

Rezolucija se često koristi kadse govori o prostornoj frekvenciji, čije su jedinice ciklusi po visini slike (C/PH) ili ciklusi po širini slike (C/PW), ili neke druge jedinice koje su povezane sa njima.

3.4. Rezolucija kod videa

Prostorna raspodjela osvjetljenja u ravni slike kod senzora za sliku ili kod uređaja za prikaz slike je faktor koji ograničava kako vertikalnu, tako i horizontalnu rezoluciju. Međutim, analogni sistemi za obradu, snimanje i prenos video signala imaju ograničen propusni opseg, pa u skladu s tim širina spektra signala ne smije biti prevelika. Sa druge strane, od širine spektra signala zavisi samo horizontalna rezolucija, pa se može reći da propusni opseg sistema koji se koristi za obradu, snimanje ili prenos video signala utiče samo na horizontalnu rezoluciju. Zbog toga se kod potrošačke elektronike termin *rezolucija* odnosi na horizontalnu rezoluciju. Ponovno odmjerenje po vertikali (vertical resampling) se često koristi kod ovakve opreme i ono može da utiče na vertikalnu rezoluciju. Kod različitih kompresija baziranih na transformacijama (kao što su JPEG, DV i MPEG), prilikom prikaza slike pojavljuje se rasipanje osvjetljenja u okolini piksela, i ono je uporedivo sa preklapanjem osvjetljenja koje je inače neophodno između dva susjedna spiksela. Ova pojava utiče i na horizontalnu i na vertikalnu rezoluciju.



Slika 3.2. Definisane horizontalne i vertikalne rezolucije

Slika 3.2. prikazuje definisanje horizontalne i vertikalne rezolucije. Za slučaj pod a) podaci na slici su takvi da imaju frekvenciju od tri ciklusa po visini slike. Pri tome se promjena osvjetljenja odvija po sinusnom zakonu i to po vertikalnom pravcu. Jedan ciklus podrazumjeva prostornu promjenu osvjetljenja između dve susjedne maksimalne, odnosno minimalne vrijednosti. Za slučaj pod b), promjena se dešava po horizontali, sa frekvencijom od četiri ciklusa po širini slike. Zbunjujuće je to što se u potrošačkoj televiziji horizontalna rezolucija izražava prema visini slike ("broj TV linija po visini slike"). Na prvi pogled jasno je da broj linija skeniranja, odnosno piksela po visini slike određuje vertikalnu rezoluciju. Međutim, kada znamo koji format slike se koristi on određuje i horizontalnu rezoluciju. Na Slici 3.2 pod c), dat je način definisanja horizontalne rezolucije u potrošačkoj televiziji. Uobičajeno je da se naziva "broj TV linija po visini slike" ili samo "broj TV linija".

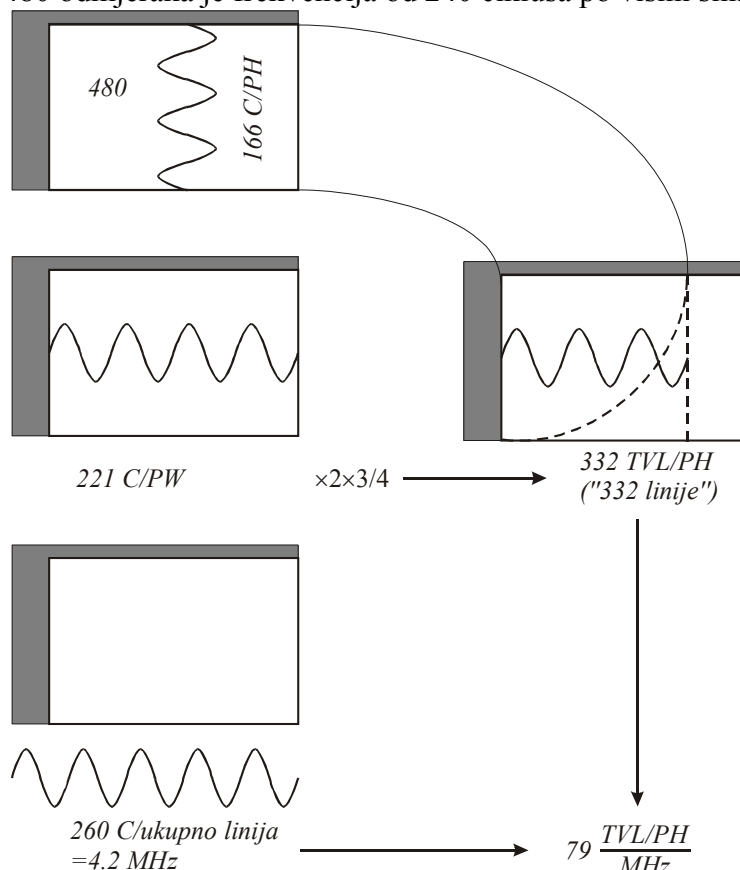
Kada se procijeni broj razlučivih linija slike, on mora biti korigovan za format slike. Da rezimiramo, rezolucija izražena u broju linija po visini slike jednaka je dvostrukoj horizontalnoj rezoluciji izražena u ciklusima po širini slike a zatim podijeljena sa formatom slike. Ovakva definicija omogućava korištenje iste kalibracione skale i testnog uzorka po horizontalnoj i vertikalnoj osi.

Kod analognog videa, signal duž svake linije skeniranja je kontinualan. Granica propusnog opsega daje gornju granicu horizontalne rezolucije. Međutim, čak i kod analognog videa, uzorci po linijama skeniranja su odmjereni u vertikalnom pravcu. Broj linija po vertikali zavisi od standarda koji se koristi, i od njega zavisi granica vertikalne rezolucije.

Kada je riječ o sistemima koji koriste skeniranje sa preplitanjem, kod njih vertikalna rezolucija podliježe kako Kellovom efektu, tako i interlace efektu koji na sličan način takođe smanjuje maksimalnu moguću rezoluciju. Smanjenje rezolucije zbog uticaja Kellovog efekta ima faktor 0.7, dok je faktor smanjenja zbog interlace efekta približno toliki. Kao krajnji rezultat kod ovih sistema imamo smanjenje maksimalne rezolucije sa faktorom koji je jednak

proizvodu ova dva, pri čemu ukupni faktor smanjenja rezolucije iznosi oko 0.5. Iz tog razloga maksimalna rezolucija koja se može postići je dvostruko manja. Kao posljedica ovoga, rani interlace sistemi nisu pokazivali nikakav napredak u odnosu na progresivne sisteme sa istim propusnim opsegom. Međutim, linije skeniranja su bile manje primjetne kod interlace sistema.

Da bismo lakše razumjeli vezu rezolucije i širine spektra signala, odnosno koliko se linija slike može prenijeti u zavisnosti od širine spektra signala odnosno propusnog opsega sistema, provešćemo analizu za standard 480i59.94. Slika se kod ovog standarda po visini sastoji od 480 linija. Prema teoriji odmjeravanja, maksimalna prostorna frekvencija koja se može prenijeti sa 480 odmjeraka je frekvencija od 240 ciklusa po visini slike.



Slika 3.3. Uticaj prostorne frekvencije i propusni opseg za 480i televiziju

Ako uzmemo u obzir Kellov faktor sa vrijednošću 0.7, oko $240 \cdot 0.7 = 166$ C/PH je maksimalna rezolucija po vertikali, i to je prikazano na Slici 3.3. Kod ovog standarda format slike je 4:3, pa stoga horizontalna rezolucija iznosi $(4:3) \cdot 166 = 221$ C/PW. Horizontalni blanking interval je oko 15% linijskog vremena, pa broj ciklusa po čitavoj liniji koja uključuje i blanking intervale iznosi $221 : 0.85 = 260$ ciklusa.

Kod ovog standarda slika se sastoji od 480 linija, pri čemu signal ima ukupno 525 linija a 480 sadrže sliku. Pošto standard koristi skeniranje sa preplitanjem, svako polje sadrži polovinu informacija o slici, to jest po $525 : 2 = 262.5$ linija. Svaka linija se ispisuje frekvencijom 59.94Hz pa je frekvencija ispisa jedne linije $262.5 \cdot 59.94 \text{ Hz} = 15.734 \text{ kHz}$. Pri frekvenciji linije od 15.734 kHz, i 260 ciklusa po liniji dobijamo da bi elektronska kola za obradu videa trebala bi imati propusni opseg od oko $260 \cdot 15.734 = 4.2 \text{ MHz}$. Ukoliko se radi o standardu 576i širina spektra signala je oko 4.7 MHz.

Kada je NTSC uvodio standard crno bijele televizije od ukupno 525 linija i 480 linija slike, bili su svjesni postojanja Kellovog faktora. Međutim, nigdje nije posebno naglašeno niti

postoji dokaz da su oni izveli proračune za taj standard, iako brojčane vrijednosti zadovoljavaju i vertikalnu i horizontalnu rezoluciju.

Relacija koja povezuje propusni opseg u MHz i horizontalnu rezoluciju, izraženu u TVL/PH, zavisi od blanking zaglavlja i formata slike. Za sisteme 480i dobijamo:

$$\frac{1\text{MHz}}{f_H} \cdot 2 \cdot \frac{1}{AR} \cdot \frac{S_{PW}}{S_{TL}} = \frac{1\text{MHz}}{15.734\text{kHz}} \cdot 2 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{711}{858} = 79 \frac{\text{TVL/PH}}{\text{MHz}}$$

Na osnovu ovoga vidimo da za 480i sisteme po jednom MHz propusnog opsega se prenosi 79TVL/PH. NTSC prenos je ograničen na 4.2MHz, pa je horizontalna rezolucija ograničena na 332 "TV linije". Kod sistema 576i, rezultat je 78 TVL/PH po megahercu videa. Većina PAL sistema za emitovanje sa 625 linija imaju oko 20% veću širinu opsega od NTSC, pa shodno tome potencijalno mogu imati i veću rezoluciju.

3.5. Osvrt na skeniranje sa preplitanjem

Osvrnimo se na parametre tehnike skeniranja sa preplitanjem. Pri tipičnoj luminansi i osvjetljenju ambijenta u kojem se nalazi TV prijemnik, brzina vertikalnog skeniranja može da bude 50 ili 60 Hz da bi se prevazišlo treperenje. Kao što je ranije napomenuto, pri praktičnim brzinama skeniranja, moguće je prikazivati ili osvježavati redove slika alternativno (svaki drugi) u alternativnim vertikalnim skeniranjima bez treperenja. To je suština interlace tehnike. Ovakav način skeniranja je moguć zahvaljujući tome što je vremenska osjetljivost vidnog sistema opada pri visokim prostornim frekvencijama.

Twitter efekat se pojavljuje kada se dimenzije vertikalnih detalja približavaju veličini razmaka između linija skeniranja. Twitter se može smanjiti smanjenjem vertikalnih detalja za faktor 0.7. Zbog toga bi se udaljenost gledanja u odnosu na slučaj progresivnog skeniranja povećala 1.4 puta.

Međutim, da bi se zadržao isti nivo oštine slike kao kod progresivnog skeniranja, sa istim kapacitetom prenosa i istim ostalim parametrima, kod interlace skeniranja se treba prenijeti samo polovina podataka iz slike za svako polje, odnosno period skeniranja. Za datu brzinu frejmova u sekundi, ovo omogućava dva puta veći broj piksela po frejmu.

Povećanje broja piksela po frejmu se može iskoristiti na tri načina: dupliranjem redova slike, dupliranjem kolona slike ili raspodjelom piksela po kolonama i redovima. Kod trećeg pristupa, povećanjem broja piksela dva puta dobijamo 1.4 puta više redova, i 1.4 puta više kolona čime se smanjuje udaljenost gledanja 0.7 puta u odnosu na progresivno skeniranje.

U idealnom slučaju, dodatne piksele ne bi trebalo ravnomjerno rasporediti po redovima i kolonama. Umjesto toga, broj kolona treba povećati 1.7 (1.4×1.2) puta, a broj redova 1.2 puta. Povećanje broja redova 1.4 puta smanjuje twitter, dok faktor povećanja 1.2 i kolona i redova dovodi do malog poboljšanja udaljenosti gledanja u odnosu na progresivne sisteme.

Skeniranje sa preplitanjem je bilo izabrano u početku razvoja televizije, skoro prije pedeset godina. Pri jednakim svim ostalim parametrima kao kod progresivnih sistema, kao što su brzina prenosa, brzina frejmova, veličina tačke i udaljenost gledanja, postoje različite prednosti interlace skeniranja.

Da rezimiramo:

- ◆ Ako se zanemari pojava twitter efekta, i ako se posmatra samo statička matrica piksela, interlace tehnika nudi dvostruko veću statičku rezoluciju za dati propusni opseg i brzinu frejmova,
- ◆ Za istu veličinu slike kod interlace i progresivnog skeniranja, koja se posmatra sa iste udaljenosti, to jest pod istim uglom gledanja, tehnika preplitanja povećava vidljivost linija skeniranja, što joj je nedostatak.

4. DIGITALNA TELEVIZIJA

Od 1939. godine kada je svjetskoj javnosti predstavljen prvi komercijalni TV prijemnik, televizija polako zamjenjuje radio kao osnovni izvor informacija. Tokom 40-tih i 50-tih godina razvijaju se crno-bijeli TV standardi (Iconoscope, Image Orthicon, Vidicon, Plubicon), a revolucija se događa krajem 1950-tih pojavom televizije u boji i video trake. Razvoj tranzistora i integriranih kola tokom 70-tih godina omogućava pretvaranje analognog u digitalni signal i tada se počinju javljati prve ideje o digitalnoj televiziji.



Slika 4.1. Digitalna i analogna televizija

Pionir u razvijanju tehnologije digitalne televizije je japanska državna institucija **NHK** koja se time bavi još od sedamdesetih godina prošlog vijeka. Poređenja radi, NHK je počela da se bavi digitalnom televizijom tri godine prije nego što je u Evropi počelo emitovanje TV programa u boji.

U posljednjih dvadesetak godina u svijetu telekomunikacija postoji tendencija da se postupci obrade i prenosa informacija izvršavaju u digitalnom domenu. Ovaj trend je prisutan i na području televizije, pa s toga i televizija postaje sve "digitalnija". Proizvođači profesionalne televizijske opreme ulažu mnogo novca u razvoj novih televizijskih sistema, ali i diktiraju standarde za sve novopridošle u ovu granu industrije (npr. Panasonic, Sony, Hitachi, Philips...). Razmotrimo li Sony Future Display Trinitron kao tipičan primjer savremenog hi-tech televizora uočavamo osnovne karakteristike današnjih televizora: ravan, širokoekranski (16:9), PC ulazi, SmartLink (dvostrana komunikacija između TV i videa),

Dolby Pro Logic i Sony Virtual Dolby surround sistemi za reprodukciju zvuka. Uz sve to pad cijena takvih uređaja omogućava njihovu pristupačnost sve većem broju ljudi.

4.1. Potpuni prelaz na digitalnu televiziju

U mnogim državama širom svijeta trenutno se vrši istovremeno emitovanje i analogne i digitalne televizije. Sa porastom popularnosti digitalne televizije, vrlo je vjerovatno da će se postojeće analogno emitovanje ukinuti. U nekim slučajevima to se već i desilo, pa su TV stanice ponudile određene pogodnosti gledaocima da bi ih ohrabрили da pređu na digitalni prijem. Za razliku od toga, negdje se potpuni prelaz na digitalno emitovanje desio bez obzira da li to gledaoci željeli ili ne. Vlade nekih zemalja su dale podršku u prelazu na digitalan način emitovanja, pogotovo kada se radi o zemaljskoj radiodifuziji. U skladu s tim, vlade su obezbjeđivale dodatno finansiranje da bi se omogućio potpuni prelaz na digitalan način emitovanja do određenog datuma kada će prestati analogno emitovanje.

U Velikoj Britaniji, prelaz na digitalno zemaljsko emitovanje počinje 2007. godine i to postepeno po regionima. Predviđa se da posljednji regioni pređu na ovakav način emitovanja do 2012. godine. Postojeće i digitalna zemaljska zamjena za analognu koja se naziva Freeview koja podržava DVB-T (Digital Video Broadcast - Terrestrial) standard. Ona će zajedno sa određenim uređajima omogućiti klasičnim analognim uređajima prijem TV signala.

U Sjedinjenim Američkim Državama, kao krajnji rok za potpuni prelaz na digitalno emitovanje je predviđen 17. februar 2009. godine. Ovakvu odluku je donio američki Kongres početkom 2006. godine. Trenutno u Americi sve stanice emituju signal i u digitalnoj i u analognoj formi, dok samo nekoliko koristi samo digitalni oblik emitovanja.

U Švedskoj, potpuni prelaz je predviđen da kraja 2007. godine i to postepeno po regijama, a prve regije su potpuno prešle na digitalno emitovanje krajem 2005. godine.

U Brazilu, digitalna radiodifuzija još uvijek nije počela sa radom, ali do 2016. godine sve stanice će morati da imaju obe vrste emitovanja.

U Finskoj, marta 2004. godine vlada je donijela odluku da analogno emitovanje bude završeno do avgusta 2007.

U našem okruženju Hrvatska i Slovenija su već započele sa eksperimentalnim digitalnim emitovanjem. Hrvatska je započela sa digitalnim emitovanjem 2005. godine, dok se potpuni prelaz na digitalno emitovanje očekuje do 2010. godine.

Radio Televizija Srbije je zahvaljujući grupi inženjera entuzijasta 01.07.2002., uz pomoć opreme koju im je ustupio proizvođač ELTI iz Slovenije, izvršeno prvo eksperimentalno zemaljsko emitovanje programa digitalnom tehnologijom. Tada je emitovan paket programa RTS-a (RTS1, RTS2, 3K i program iz razmjene sa Crnom Gorom) i to u okviru samo jednog UHF analognog kanala. Nedavno, Stankom TV je započela emitovanje u DVB-T formatu za područje Beograda, i to sa 6 TV kanala.

U Bosni i Hercegovini za ovu oblast je zadužena Regulatorna agencija za komunikacije. Prema Pravilu o planu korištenja radio frekvencijskog opsega 40.5-43.5GHz za fiksne bežične pristupne sisteme iz 2005. godine, predviđen je određen frekvencijski opseg za digitalno emitovanje televizijskog programa. Veliki broj evropskih zemalja jasno se odredio o krajnjim rokovima za prestanak analognog emitovanja. U Bosni i Hercegovini zasad ne postoji plan za potpuni prelazak na digitalno emitovanje, te je potrebno pokrenuti aktivnosti na izradi strategije o uvođenju digitalne televizije. Jedino čega se možemo držati je preporuka Evropske komisije kojom sve zemlje Evropske zajednice moraju do 2012. godine analognu televiziju u potpunosti zamjene digitalnom. Digitalno emitovanje u BiH još uvijek nije zaživjelo, ali već se pojavljuju investitori spremni da ulažu u ovu oblast.

4.2. Osnovne karakteristike digitalne televizije

Ono što je ipak najviše doprinijelo razvoju digitalne televizije je sam način emitovanja digitalnog signala. Upakovani digitalni zapis može se još više komprimirati, te emitovati do gledalaca u paketu koji istovremeno, na istom prostoru (odnosno kanalu) za emitovanje prenosi po nekoliko TV kanala, za razliku od analognog emitovanja gdje je svaka televizija morala da se emituje po posebnom kanalu. Mogućnosti koje su se korištenjem ove tehnologije otvorile zaista su veoma velike i one danas potpuno mijenjaju filozofiju i shvatanje televizije.

Komprimirani video signal, zajedno sa komprimiranim audio signalom i dodatnim podacima se multipleksira u jedan programski niz podataka (Programme stream). Jedan ili više programskih nizova se pakuje u MPEG-2 Transport Stream koji se dalje prenosi do digitalnih prijemnika. U zavisnosti od načina kodovanja i vrste modulacije koja se koristi za digitalni signal, u okviru jednog analognog televizijskog kanala (čiji je propusni opseg od 6 do 8MHz) može se postići protok od 5Mb/s do 32Mb/s. Tako se u okviru protoka od 32Mbit/s može emitovati i do sedam TV programa i nekoliko audio kanala kombinovanjem sa najrazličitijim multimedijalnim servisima.

Uvođenjem digitalnog emitovanja, neće se više dodijeljivati frekvencije već će se zakupljivati protok u okviru multipleksa. Tako se, na primjer, u prostor za emitovanje dva nacionalna kanala zemaljskom radiodifuzijom može smjestiti čak do 50 kanala.

• Standardi u digitalnoj televiziji

Digitalna televizija (DTV) je imala puno problema s standardizacijom, jer je uloženo puno novca u razvoj različitih standarda. Proizvođači televizijske opreme koji su taj novac uložili ne žele ga nepovratno izgubiti. Istorija razvoja DTV je dvadeset godina projektovanja, takmičenja oko standarda i zakonskih zavrzlama i otpora TV kuća. Sukob naglog tehničkog napretka i ekonomske opravdanosti njegove primjene na kraju je rezultovao sa velikim brojem standarda, od kojih je u Tabeli 4.1. izdvojeno 18 osnovnih koji se koriste.

Tabela 4.1. Standardi u digitalnoj televiziji

	<i>rezolucija</i>	<i>format slike</i>	<i>frame rate</i> <i>i - interlaced, p - progressive</i>
HDTV	1920×1080	16:9	24p, 30p, 60i
	1280×720	16:9	24p, 30p, 60i
SDTV	704×480	16:9	24p, 30p, 60i, 60p
	704×480	4:3	24p, 30p, 60i, 60p
	640×480	4:3	24p, 30p, 60i, 60p

Standardno definisana televizija (Standard Definition Television - SDTV) je vrsta digitalne televizije koja može da prenosi i proizvodi slike boljeg kvaliteta nego što se dobijaju standardnim analognim emitovanjem. SDTV je obično podrazumijeva 480i signal. Mada SDTV signal ne može po kvalitetu da bude kao HDTV-u, u poređenju sa konvencionalnom televizijom je superioran.

Postoji i EDTV (Enhanced DTV) standard koji nismo naveli u tabeli jer je on prelazni oblik između SDTV i HDTV. EDTV takođe može da se prenosi pomoću DTV, a vizuelno simulira HDTV kvalitet. EDTV funkcioniše kao 480p (gde 480 predstavlja vertikalnu rezoluciju, a slovo *p* predstavlja progresivno skeniranje). Da bi iskoristio prednosti 480p standarda, korisnik mora da koristi video izvor koji proizvodi taj signal (na primer, DVD plejer), a displej mora da ima mogućnost čitanja 480p ulaznog signala. EDTV takođe nudi

Dolby digital surround zvuk. Oba standarda, SDTV i EDTV, mogu se prikazivati u formatu širokog ekrana.

EDTV predstavlja glavni napredak u današnjoj televiziji. Dok je HDTV još uvek tehnologija koja tek dolazi, EDTV je dostupan sada i može da pruži sliku koja je po kvalitetu približna HDTV standardu.

HDTV je standard za digitalnu televiziju, gde emitovanje prenosi sliku širokog formata sa mnogo više detalja i boljim kvalitetom nego što se može naći u standardnoj analognoj televiziji ili digitalnoj televiziji. HDTV je vrsta DTV emitovanja i smatra se najkvalitetnijim dostupnim DTV formatom.

• **Mogućnosti koje donosi digitalna televizija**

Osnovna razlika današnje digitalne televizije (DTV) u odnosu na analognu je digitalni signal. Slika i zvuk se prilikom snimanja pretvaraju u digitalnu formu postupcima odmjerkavanja, zatim kvantovanja i kodovanja i u takvom obliku se prenose kroz medijum prenosa odnosno kanal. Prednosti ovakvog načina prenosa i zapisa signala su velike, a navešćemo samo neke od njih:

- teoretski, signal se može prenijeti na neograničenu udaljenost
- postoji mogućnost kompresije signala, a time i ekonomičnije korištenje resursa
- detekcija i korekcija grešaka
- smanjen uticaj šuma, itd.

Digitalni TV kanal ima propusnu moć od 5Mbit/s do 32Mb/s. Saobraćaj unutar tog kanala može biti realizovan na dva načina:

- ♦ cjelokupan kanal može biti posvećen emitovanju jednog programa
- ♦ kanal može biti podijeljen na više potkanala manjeg protoka, pri čemu svaki od njih može da prenosi različit program (recimo, kanali 2.1, 2.2, 2.3 su potkanali kanala 2).

Ovakva podjela je moguća zahvaljujući kompresiji signala kao što je na primjer MPEG-2 (*Motion Pictures Experts Group*). MPEG-2 kompresija se zasniva na bilježenju promjena trenutnog frejma u odnosu na ključni frejm. Iz tog razloga materijal sa puno pokreta (recimo akcioni film) zahtijeva veću propusnu moć od materijala sa puno statičnih scena (recimo spiker koji čita vijesti). Isto tako MPEG-2 kompresija omogućava i kompresiju u različitim rezolucijama, što takođe omogućava veću ili manju propusnu moć.

U samoj proizvodnji televizijskog programa, gdje je neophodno trajno snimiti neki događaj, a zatim ga reprodukovati i montirati, digitalnim zapisom se ne gubi na kvalitetu slike. Gubitak kvaliteta je karakterističan kod analognog presnimavanja sa trake na traku i pravljenjem generacija, gdje se na Beta SP formatu poslije pete generacije javljaju teški gubici u magnetnom zapisu. Mnoge druge intervencije u slici moguće su korištenjem računara, tako da se u snimljeni sadržaj mogu ubaciti sasvim novi sadržaji koji u vrijeme snimanja uopšte nisu bili prisutni. Gledalac ovu varku, ukoliko se ne radi o stvarima koje djeluju nerealno, ne može uočiti. Tako se razvila i posebna tehnika zasnovana na već poznatom televizijskom "hroma-ki" efektu, koja može u potpunosti da zamijeni čitavu scenografiju u studiju korištenjem kompjuterske zamjene dijelova slike ubačenih u pravi snimak. Tehnologija je poznata kao "virtuelni studio". Ovo otvara i mogućnost lažiranja sadržaja slike, pa se ta oblast mora adekvatno zakonski regulisati, pogotovo kad su u pitanju reklamni sadržaji.

Protok signala za digitalnu televiziju može biti i dvosmjernan. Tako i gledalac preko svog daljinskog upravljača može da se "umiješa" u emitovani signal. U tom slučaju, ne samo da se u paket koji se emituje može staviti više TV kanala, već i zahvaljujući "interaktivnoj televiziji" moguće je u prenosu nekog sportskog događaja koji pokriva istovremeno četiri ili

osam kamera, upakovati kadrove sa svake kamere posebno tako da gledalac sam putem daljinskog upravljača bira poziciju sa koje će da vidi događaj. Tako gledalac sam postaje video mikser ili režiser.

Kvizovi i igre na sreću, kao i direktno učešće u njima su takođe još jedna prednost korištenja digitalne televizije.



Slika 4.2. Kolaž digitalnih televizijskih programa

U zavisnosti od toga koju vrstu opreme korisnik ima, na raspolaganju su mu pored TV programa i posebni servisi kao telekupovina, mogućnost direktne veze sa bankom i obavljanje bankarskih transakcija putem "interaktivne televizije". Kolaž digitalnih televizijskih kanala zajedno sa navigacionim menijem je dat na Slici 5.2.

Kao pretplatnik kablovske televizije gledalac može imati i posebne zahtjeve, kao na primjer, da mu se u određeno vrijeme pusti neki od servisa (vremenska prognoza ili podaci o saobraćaju, stanju na berzi ili određeni film). Ova vrsta usluge naziva se "TV on demand" ili *TV na zahtjev*.

• Načini digitalnog emitovanja

Digitalno emitovanje se može vršiti zemaljskim putem preko digitalnih predajnika, preko kablovske mreže koja vodi direktno do korisnika, kao i preko satelita. Da bi krajnji korisnik mogao da gleda ovakav program, on mora i sam da ima određenu opremu za konvertovanje digitalnog paketa u sliku i ton, odnosno raspakivanje svakog pojedinog kanala. Za ovo se koristi poseban uređaj (set top box) ili dekodirer inegriran u TV prijemniku. Kutija može biti zajednička za sve stanare u zgradi koji su na istom antenskom priključku ili kablu.

Digitalno primljena slika je na ekranu savršena jer je sistem otporan na interference, impulsne smetnje i refleksije koje su karakteristične za analognu televiziju.

Borba za nacionalnu pokrivenost bi trebala postati prošlost, jer bi je mogli dobiti svi. Pokrivenost ne bi bila rezervisana samo za televiziju i radio (broadcasting), nego i za slanje podataka (datacasting), objedinjenih podataka (filecasting) po Internet protoku, kao i svih drugih vrsta telekomunikacija.

4.3. Televizija visoke definicije - HDTV

Gledajući unazad, termin televizija visoke definicije - HDTV, se prvo koristio za televizijski standard razvijen tridesetih godina prošlog vijeka koji se koristio kao zamjena za eksperimentalne sisteme sa samo dvanaest linija slike. Nedugo potom, Philo T. Farnsworth, John Logie Baird i Vladimir Zworykin svaki zasebno su razvili naprednije TV sisteme. Problem neadekvatne zaštite patenata i vlasništva nad njima je spriječio njihov dalji razvoj.

Britanski sistem sa 405 linija slike je bio prvi koji se promovisao kao televizija visoke definicije i koji je zaživio na širem području. Većina patenata na području televizije je isticala pred kraj drugog svjetskog rata što je dovelo do toga da nije bilo jedinstvenog standarda u televiziji. Zbog toga je tokom pola vijeka razvijeno više standarda, kao što su PAL, NTSC, SECAM itd.

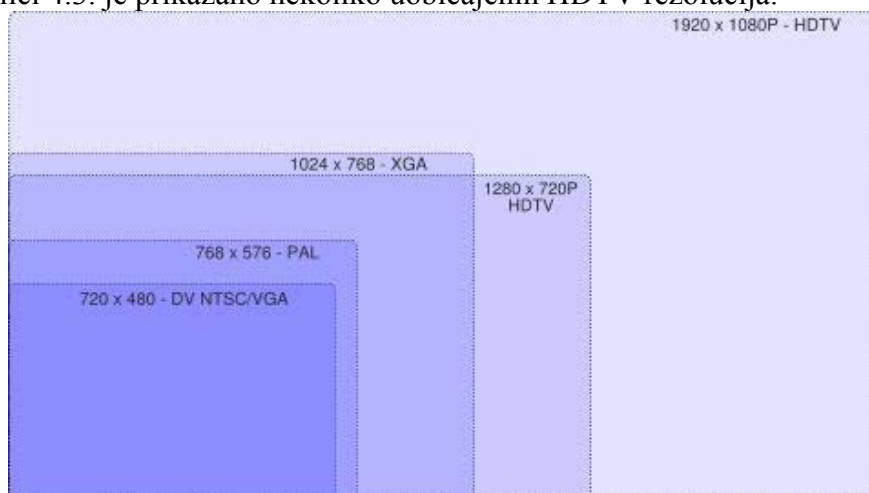
U Japanu je razvijen prvi analogni HDTV sistem koji je zaživio na tržištu, a dobio naziv MUSE (*Multiple sub-nyquist Sampling encoding system*). Ovaj sistem je počeo sa radiodifuznim emitovanjem ranim devedesetim godinama, a signal je obuhvatao rezolucije sa 1035 ili 1080 aktivnih linija (1035i) ili 1125 linija ukupno. Japanski sistem, koji je razvila NHK *Science and Technical Research Laboratories* osamdesetih godina koristio je određena rješenja sa filtriranjem da bi se smanjio potreban propusni opseg za prenos signala.

High Definition Television (HDTV) se odnosi na emitovanje televizijskog signala sa većom rezolucijom nego što to tradicionalni standardi (NTSC, SECAM, PAL) dozvoljavaju. Izuzev ranih analognih formata u Evropi i Japanu, HDTV se emituje digitalno, i zbog toga se uvođenje ove tehnologije donekle podudara sa uvođenjem digitalne televizije. Za područje Sjedinjenih Država ovu tehnologiju tokom devedesetih godina prošlog vijeka prvi put uvodi udruženje pod nazivom Digital HDTV Grand Alliance (čiji su članovi AT&T, General Instrument, MIT, Philips, Sarnoff, Thomson i Zenith).

HDTV se definiše kao signal čija slika sadrži 1080 aktivnih linija, sa formatom slike 16:9 prema preporuci ITU-R BT.709. Međutim, kod ATSC standarda koji se koriste u Sjedinjenim Državama, pod HDTV-om se smatra svaka rezolucija sa 720 ili više aktivnih linija pa se termin "visoke definicije" može odnositi i samo na rezoluciju.

- **Standardne rezolucije i brzine frejmova ili polja**

Na Slici 4.3. je prikazano nekoliko uobičajenih HDTV rezolucija.



Slika 4.3. HDTV rezolucije

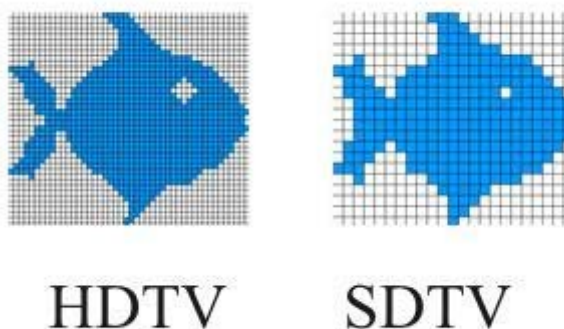
Treba naglasiti da NTSC standard koristi piksele koji su nešto uži (odnos širine i visine je 0.912), dok PAL koristi nešto šire piksele (odnos širine i visine je 1.094). Standardi su usklađeni sa preporukom CCIR 601 za digitalni video.

Standardne brzine ramova, odnosno polja su:

- ◆ 24p (kino film)
- ◆ 25p
- ◆ 30p
- ◆ 50p
- ◆ 60p
- ◆ 50i (PAL/SECAM)
- ◆ 60i (NTSC)

• Poređenje sa SDTV

HDTV ima najmanje dvostruko veću rezoluciju u odnosu na Standard Definition Television (SDTV), što omogućava veći broj detalja koji se mogu prikazati u odnosu na analognu televiziju ili kod standardnog DVD formata.



Slika 4.4. Poređenje rezolucije HDTV i SDTV

Takođe treba naglasiti da su standardi za emitovanje HDTV su prilagođeni formatu slike 16:9 i nema potrebe za letterbox formatom, koji inače smanjuje rezoluciju prikazane slike.

• Osvrt na različite formate

Optimalni format za emitovanje zavisi od vrste medijuma koji se koristi pri zapisu kao i od karakteristike sadržaja. Brzina frejmova i polja na prijemu bi trebala da se uskladi sa izvorom, kao i rezolucija. Sa druge strane, veoma velika rezolucija može zahtijevati veći propusni opseg od onog koji je dozvoljen pri prenosu bez gubitaka. Kompresija sa gubicima, koja se koristi u svim digitalnim HDTV sistemima za snimanje i prenos, će uzrokovati određena izobličenja slike u odnosu na nekomprimovanu.

Fotografski film namijenjen za kinematografiju ima visoku rezoluciju i snima se brzinom 24 frejma u sekundi. U zavisnosti od dozvoljenog propusnog opsega i veličine pokretnih detalja u slici, optimalni format za prenos ovakve slike je 720p24 ili 1080p24. Kada se prikazuje na televizijskim sistemima koji koriste PAL standard, film se mora konvertovati u brzinu od 25 frejmova u sekundi, ubrzavajući ga time za 4.1%. Ukoliko sistem koristi NTSC standard, (koji koristi 60 frejmova u sekundi), tehnika 3:2 *pulldown* se koristi. Jedan frejm se prikazuje na tri video polja (1/20 sekundi) a sljedeći frejm se prikazuje tokom dva video polja

(1/30 sekundi) pa se proces ponavlja, i tako se postiže tačna brzina kojom se frejmovi prikazuju tokom 1/12 sekundi.

HDTV sadržaji koji nisu namijenjeni kinima su snimljeni u 720*p* ili 1080*i* formatu. Format zavisi od toga da li je kompanija za emitovanje predviđena za emitovanje televizijskog programa ili ne. U drugim slučajevima format zavisi od mnogo faktora. Uopšteno govoreći, 720*p* je pogodniji za brze promjene slike pošto koristi progresivna polja, nasuprot tome 1080*i* može imati određeni nivo degradacije slike za brze promjene. Dodajmo tome, 720*p* se koristi za distribuciju HD videa preko interneta, pošto svi računarski monitori koriste progresivno skeniranje a i zato što grafičke kartice još uvijek ne mogu da rade deinterlacing u realnom vremenu. Za video su i manji zahtjevi za memorijom od 1080*i* ili 1080*p*, a mali broj ljudi posjeduje displeje sposobne za prikaz 1920×1080 rezolucije bez skaliranja. Format 720*p* se pojavljuje pri punoj rezoluciji na uobičajenom 1280×1024 LCD monitoru, čija cijena nije toliko visoka. Za razliku od njih, cijena LCD monitora koji mogu da prikažu rezoluciju 1080*p* je dosta viša.

U Sjevernoj Americi televizijske kuće Fox, ABC i ESPN (vlasnik ABC i ESPN je kompanija Disney) trenutno emituju 720*p* sadržaj. NBC, Universal HD (čiji je vlasnik General electric), CBS, HBO-HD, INHD, HDNet i TNT emituju 1080*i* sadržaj.

• Osvrt na tehničke zahtjeve

MPEG-2 je najčešće korišteni kodek za emitovanje HDTV sadržaja. Iako MPEG-2 podržava 4:2:2 YCbCr subsampling i kvantovanje sa 10 bita, HD emitovanje koristi subsampling 4:2:0 i 8 bitsko kvantovanje zbog uštede propusnog opsega. Neke tv kuće planiraju korištenje MPEG-4 standarda za kompresiju, dok isti standard zajedno sa DVB-S2 neke njemačke stanice već koriste (ProSieben, Sat1, Premiere). Već postoje prijemnici za ovakav signal, dok su proizvođači najavili i PCI kartice. Iako se MPEG 2 trenutno češće koristi, moguće je korištenje MPEG-4 u zemljama gdje još uvijek nije zaživjela digitalna televizija, kao što su Irska i Norveška koje razmatraju korištenje ovog standarda za SD Digital, kao i za zemaljsko emitovanje HDTV.

HDTV sadrži zvuk "kino kvaliteta", odnosno koristi Dolby Digital (AC3) format da bi se podržao "5.1" surround zvuk. Ovakav zvuk sadrži šest različitih audio kanala za prenos zvuka. Poređenja radi, dosad se koristio stereo zvuk, koji ima dva audio kanala ili mono zvuk sa samo jednim audio kanalom. Pet od šest kanala kod Dolby Digital formata su predviđeni za zvučnike sa opsegom frekvencija od 20Hz do 20kHz, koji raspoređenih u prostoru u grupe kao tri prednja (desni, lijevi i centralni), i dva zadnja (desni i lijevi). Šesti kanal je namijenjen za takozvani subwoofer zvučnik (bas) sa opsegom frekvencija od 20Hz do 120Hz, i njegova pozicija u prostoru može biti proizvoljna. Dolby Digital format je kompatibilan sa mono i stereo zvukom, tako da se za mono zvuk koristi samo prednji centralni kanal, za stereo se koriste prednji lijevi i desni a moguće su i druge varijante koje koriste 2, 3, 4 ili pet kanala.

Širina i visina piksela kod HD signala je jednaka, odnosno piksel je kvadratan. Novi HD formati za snimanje kao što su HDV koriste kvadratne piksele zbog efikasnije kompresije i da bi se omogućilo tržištu i snimanje u HD kvalitetu.

U televizijskim studijima i drugim produkcijskim ustanovama, koristi se standard HD-SDI SMPTE 292M za povezivanje (koji nominalno radi na 1.485 Gbita/s, sa 75Ω serijskim digitalnim interfejsom) i koristi se za prenos nekomprimovanog HDTV signala. Originalna brzina HDTV signala se ne može podržati kod televizijskih kanala za radiodifuzno emitovanje koji prenose signal standardne definicije, jer imaju propusni opseg od 6 do 8MHz, kao i u potrošačkoj opremi jer se od proizvođača potrošačke opreme zahtijeva da ta oprema ima zaštićene digitalne izlaze zbog video piraterije. Za posljednje generacije 4:4:4 kamera i

sistema snimanje (kao što je Sony HDC-F950 i Thomson Viper) potrebni su dual-link HD-SDI signali, pri čemu jedan link, odnosno koaksijalni kabl sadrži 4:2:2 YCbCr informacije, dok drugi link sadrži dodatne 0:2:2 CbCr informacije.

• Poboljšanja koja se očekuju od HDTV

U odnosu na klasičnu analognu televiziju, kao u odnosu na SDTV, HDTV donosi određene prednosti. Postoji sedam osnovnih stvari koje krajnji korisnici mogu da očekuju od ove tehnologije, a to su:

1. Sva komercijalna HDTV je digitalna, pa u skladu s tim slika takvog signala će biti savršena, sa primjetnom strukturom piksela ili neće biti slike uopšte. Slika koja snježi, uticaj interferencije, kao i vertikalno pomijeranje i drugi nepoželjni efekti kao kod analogne televizije će biti prošlost.
2. Većina HD programa kao i filmovi će se prikazivati u 16:9 formatu, ili *semi-widescreen* formatu (mada će za neki filmovi koji su snimljeni i u širem formatu od ovog i dalje ostati "letterbox" format), dok će se starije verzije filmova snimljene u 4:3 formatu prikazivati u "pillarbox" formatu. Takođe moguće je i povećati sliku da se popuni čitav ekran.
3. Boje će izgledati realnije zahvaljujući većem propusnom opsegu
4. Slika će imati od 2 do 5 puta više detalja. Praznine između linija skeniranja će biti manje ili nevidljive. Svi materijali snimljeni na 35mm filmsku traku će se moći prikazati na približno istoj rezoluciji na kojoj je materijal snimljen.
5. Nove tehnologije snimanja na optičke medije, koje podržavaju HDTV rezolucije, će biti dostupne. One su već i na tržištu. Tako HD DVD podržava 720p i 1080i dok Blu-ray podržava i 1080p. Svi novi uređaji za prikazivanje moraju biti kompatibilni sa prethodnom tehnologijom kao što je DVD, međutim formati ne moraju biti kompatibilni međusobno.
6. Povećana oštrina slike i veći broj detalja omogućavaju bolji prikaz na većim ekranima, koji postaju ugodniji za gledanje.
7. Bolji kvalitet slike prati i bolji kvalitet zvuka. Tako umjesto stereo zvučnog signala (dva zvučna kanala) uvodi se Dolby Digital 5.1 zvuk koji ima surround mogućnosti. Kod zvučnih efekata u filmovima biće mnogo jasniji dijalog u odnosu na dosadašnji pristup.

• Vrste HDTV prijemnika

Promjena načina emitovanja zahtijeva i promjenu načina prijema televizijskog signala. Da bi mogli da gledaju ovakav signal, gledaoci će morati da kupe nove uređaje koji podržavaju ovu tehnologiju. Moguće je i zadržati stare prijemnike uz kupovinu konvertora (set top box) za pretvaranje digitalnog signala u oblik pogodan klasičnim prijemnicima.



Slika 4.5. HD logo

U Evropi, kreiran je natpis "HD-ready" (Slika 4.5.), da bi se potrošači informisali o prednostima visoke definicije. Namjena ovog natpisa je da se pojednostavi kupovina ovakvih

uređaja. Uređaji sa ovakvim natpisom podržavaju sve postojeće SD i HD rezolucije pri brzinama 50 i 60 Hz, i pri tome podrazumijevaju minimalnu rezoluciju od 720 linija i format slike 16:9.

Jedna od činjenica koja vas može zbuniti je da vam kupovina HD televizora neće garantovati neposredni pristup HDTV programima. Kada kupujete HD televizor, moraćete da birate između integrisanih HDTV-a i onih koji se najčešće nazivaju “HDTV kompatibilni”. Da biste mogli da primite HDTV emisiju, potreban vam je HDTV birač (tuner) – uređaj za prijem i dekodiranje HDTV signala. HDTV birači mogu da budu samostalni uređaji ili mogu da budu integrisani u HDTV displej. HD televizor ili displej koji ima ugrađen HDTV birač se naziva “integrisani HDTV”, dok se termin “HDTV kompatibilan” odnosi na televizor koji nema integrisani HDTV birač, što znači da morate naknadno da ga kupite.

Postoji nekoliko vrsta televizijskih prijemnika koji podržavaju HDTV. Navešćemo četiri tipa koji se trenutno koriste:

- ♦ TV sa direktnim prikazom
- ♦ Plazma TV
- ♦ TV sa projekcijom na zadnjoj strani ekrana
- ♦ TV sa projekcijom na prednjoj strani ekrana

Televizior sa direktnim prikazom je vrsta koju svi poznajemo. Prijemnik sa direktnim prikazom koristi katodnu cijev (Cathode Ray Tubes - CRT) i elektronski “pištolj” za iscrtavanje slike na ekranu obloženom fosforom. Ovakve vrste prijemnika su sada dostupni u analognoj, digitalnoj i HDTV verziji.

Plazma TV stvara sliku od gasa (plazme) ispunjenog atomima ksenona i neona i milionima naelektrisanih atoma i elektrona koji se sudaraju kada uključite televizor. Energija koju ovo sudaranje osloboda povećava nivo energije u plazmi, a neon i ksenon oslobađaju fotone svetla (slično načinu na koji funkcioniše neonska lampa). Plazma TV nudi velike oblasti za prikazivanje (do 50 inča), ali su vrlo tanki. Mada je kvalitet slike izuzetan, plazma televizori su prilično skupi.

TV sa projekcijom na zadnjoj strani ekrana koristi projekcioni ekran umesto katodne cevi za prikazivanje slika. Ova vrsta TV-a nudi veću rezoluciju i jasnije boje, a noviji modeli koriste ekrane visokog kvaliteta koji omogućavaju veće uglove gledanja.

Projekcija na prednjoj strani ekrana funkcioniše slično kao projekcija na zadnjoj strani ekrana, osim što su katodne cevi ugrađene u posebnu jedinicu koja projektuje sliku na prednjoj strani TV ekrana. Ekran i projektor su odvojeni, tako da je veličina prikaza uglavnom ograničena na veličinu vaše sobe. Nešto skuplji projektori slike na prednjoj strani ekrana mogu da proizvedu jasniju sliku, ali to može da se vrši samo u zamračenoj sobi.



Slika 4.6. Ambilight tehnologija

Kao interesantan primjer dokle idu proizvođači TV prijemnika u njihovom razvoju je i kompanija Philips njena nova tehnologija nazvana ambilight. Ambient Light Technology je jedinstvena tehnologija osvjetljenja koja aktivno podešava jasnoću i boju u zavisnosti od sadržaja slike. Takođe sadrži i osvjetljenje pozadine iza televizora tako da se čitava slika sa

televizora bolje uklapa u okruženje. Ova tehnologija omogućava oku da vidi više detalja, boja i kontrasta uz smanjenje refleksija na ekranu za vrhunsko uživanje u slici.

Takođe treba napomenuti da u posljednje vrijeme i proizvođači mobilnih telefona nastoje da prošire njihove mogućnosti u pravcu televizije, pa već postoje modeli na tržištu koji podržavaju prijem digitalnog TV signala.

5. PROMJENA UČESTANOSTI ODABIRANJA

Kod obrade audio i video signala, često je potrebno od polaznog niza vrijednosti signala izračunati novi niz koji aproksimira vrijednosti koje bi se dobile ukoliko bi se učestanost ili faza odabiranja (odmjeravanja) promijenila. Ovaj postupak se naziva *resampling* (preodmjeravanje, ponovno odmjeravanje). Kod obrade slike u računarskoj terminologiji isti postupak je poznat pod imenom skaliranje (*scaling*). Resampling je osnovni postupak koji se koristi pri:

- ♦ chroma subsampling-u (na primjer iz 4:4:4 u 4:2:2)
- ♦ konverziji naniže (HDTV u SDTV) i naviše (SDTV u HDTV)
- ♦ konverziji između različitih formata slike (na primjer 4:3 u 16:9)
- ♦ konverziji između različitih brzina ispisa (na primjer f_{SC} u 4:2:2, 13.5MHz)
- ♦ promjena dimenzija slike u digitalnim video efektima (DVE) i slično.

Jednodimenzionalni resampling se primjenjuje direktno kod audio signala i to pri promjeni brzine uzoraka iz 48kHz u 44.1kHz. Kod video signala, jednodimenzionalni resampling se može proširiti na dvodimenzionalni vektor, odnosno matricu odmjeraka. Postoje dva pristupa u ovom slučaju. Jedan je da se u kaskadi (tandemu) primjeni prvo horizontalni, a zatim vertikalni filter. Drugo rješenje je da se izvrši dvodimenzionalna prostorna interpolacija direktno.

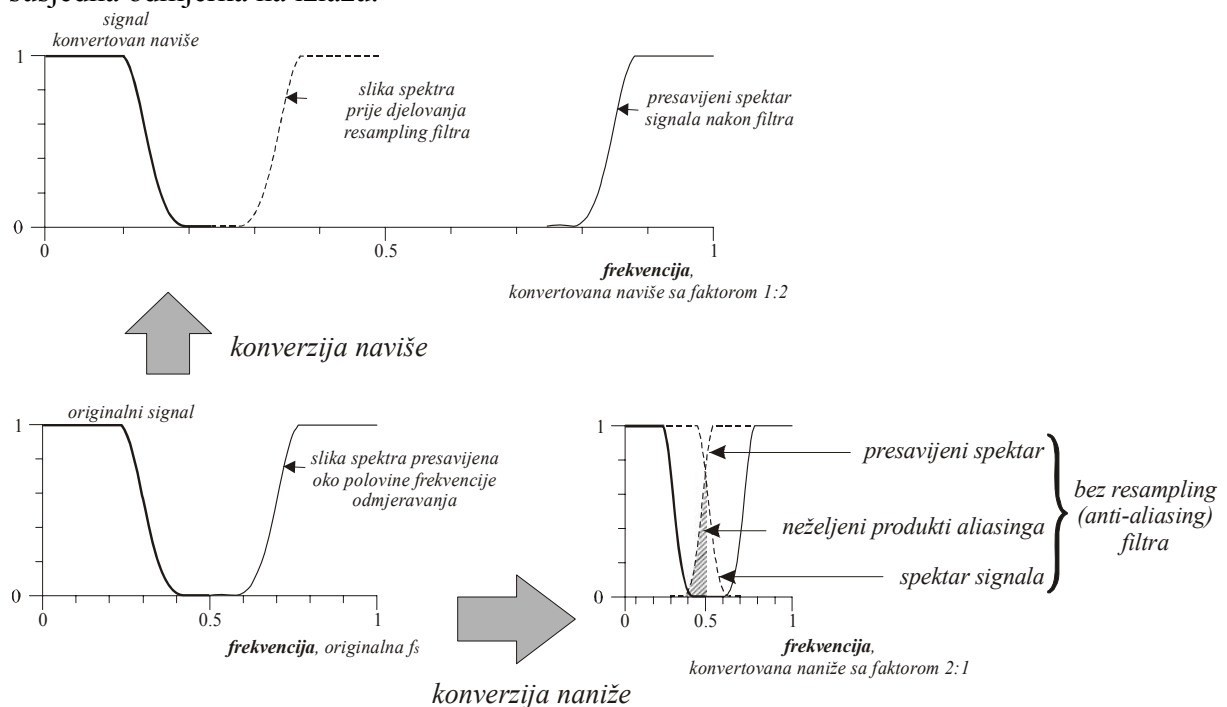
Upsampling ili *konverzija naviše* je postupak koji kao rezultat daje više izlaznih nego ulaznih vrijednosti. Kod audio signala, moguće je odrediti vrijednosti signala pri višoj frekvenciji odmjeravanja, odnosno odabiranja, kao na primjer pri konverziji signala sa 44.1kHz u signal sa 48kHz. Kod video signala, neophodna je konverzija naviše iz 1280×720 HDTV u 1920×1080 HDTV. Pri tome od signala sa 1280 vrijednosti po svakoj liniji dobijamo signal sa 1920 vrijednosti po svakoj liniji, i pri tome je faktor konverzije 2:3.

Jedan od načina da se postigne konverzija naviše sa faktorom konverzije $1:n$, gdje je n cijeli broj, je ubacivanje $n-1$ uzorka čija je vrijednost nula između svaka dva susjedna ulazna

odmjerka. Ovaj postupak izaziva ponavljanje spektra originalnog signala na multiplima originalne frekvencije odmjerenja. Novi spektri koji se dobijaju se nazivaju *slike* ili *aliasi* spektra. Termin nije baš adekvatan jer nema veze sa klasičnim pojmom slike, ali je zadržan jer je ranije korišten u analizi spektra signala. Ove slike se eliminišu, ili bar oslabe sa anti-imaging NF filtrom. Kod nekih struktura koje vrše upsampling, kao što je Lagrange-ov interpolator, koji ćemo opisati nešto kasnije, filtriranje i upsampling se prepliću.

Downsampling ili *konverzija naniže* daje manji broj vrijednosti na izlazu nego na ulazu. Kod audio signala, moguće je dobiti vrijednosti signala koje bi se dobile pri nižoj frekvenciji odmjerenja od ulazne. Kod video signala, konverzija naniže je neophodna pri prebacivanju iz $4f_{SC}$ NTSC digitalnog videa u digitalni video po preporuci 601 ("4:2:2"); od 910 vrijednosti na svakoj ulaznoj liniji dobijamo 858 vrijednosti, pri faktoru konverzije 35:33. To znači da za svakih 35 ulaznih vrijednosti dobijamo 33 izlazne vrijednosti.

Prema Nikvistovom kriteriju, frekvencija odmjerenja treba da bude dva puta veća od gornje frekvencije sadržaja signala. Drugim riječima, ako je frekvencija odmjerenja f_S sadržaj signala bi trebao biti unutar opsega od jednosmjerne komponente do frekvencije $0.5f_S$. Nakon konverzije naniže, nova frekvencija odmjerenja može biti niža od širine spektra signala, odnosno njegove najviše frekvencije u spektru. Sadržaj signala je opet ograničen Nikvistovim kriterijumom ali sad sa polovinom nove frekvencije odmjerenja. Ako smo recimo izvršili 4:1 downsampling, gornja granična frekvencija signala je 1/8 početne frekvencije odmjerenja. Da bi se spriječila pojava aliasinga, potrebno je izvršiti NF filtriranje prije ili zajedno sa konverzijom naniže. Gornja granična frekvencija zavisi od faktora konverzije, jer na primjer konverzija 4:1 zahtijeva gornju graničnu frekvenciju manju od $0.125f_S$. Konverzija naniže sa faktorom $n:1$ može se posmatrati kao filtriranje (antialias filtering) za novu frekvenciju odmjerenja, a zatim odbacivanje $n-1$ odmjeraka između dva susjedna odmjerka na izlazu.



Slika 5.1. Uticaj konverzije naviše i naniže na spektar signala

Na Slici 5.1. je prikazano šta se dešava sa spektrom signala pri konverziji naviše i naniže. U konkretnom slučaju su uzeti faktori konverzije 2:1 i 1:2 ali je princip isti i za druge vrijednosti ovog faktora.

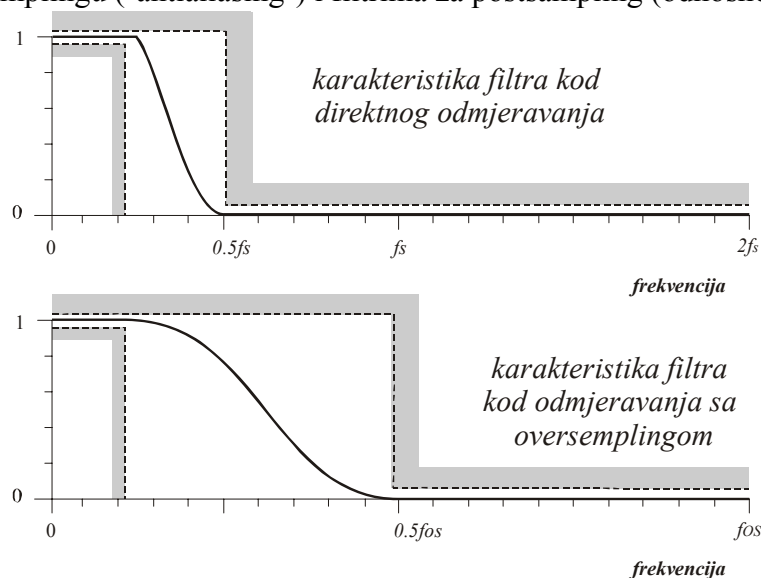
5.1. Konverzija naniže sa faktorom 2:1

Video signal u boji se dobija u $R'G'B'$ komponentama. Konverzija u $Y'CB'CR$ je neophodno ukoliko se signal koristi za potrebe studija. Konverzija uključuje uobličavanje u $Y'CB'CR$ u formu 4:4:4, a zatim chroma konverziju naniže u 4:2:2. Kroma pododmjeravanje zahtijeva konvertor naniže sa faktorom 2:1. Ako bi se konverzija vršila samo odbacivanjem svakog drugog odmjerk, bilo kakav sadržaj signala između $0.25f_S$ i $0.5f_S$ će izazvati izobličenje u rezultatu. Odbacivanje sadržaja signala iznad $0.25f_S$ je neophodno pa se koristi filtar. Obično se taj filtar realizuje kao FIR filtar sa gornjom graničnom frekvencijom nešto manjom od četvrtine originalne frekvencije odmjeravanja. Pošto se svaki drugi odmjerk odbacuje, njih nije ni potrebno obrađivati u filtru. Konvertori koriste ovu činjenicu prilikom konverzije C_B komponente slike tako što se na mjestu odmjerkaka koji se odbacuju ubace odmjerci C_R komponente. Tako možemo koristiti jedan digitalni filtar za filtriranje obe komponente.

Uzmimo slučaj vrlo jednostavanog NF filtra koji prosto usrednjava dva susjedna odmjerk, i sa gornjom graničnom frekvencijom $0.25f_S$. Neka on ima blagi prelaz iz propusnog opsega u nepropusni. Takav filtar ne bi mogao da se koristi kao resampling filtar, pošto je potrebno da red filtra bude veći od dva za studijske potrebe.

5.2. Preodmjeravanje

Pri A/D i D/A konverziji signala, filtriranje ima važnu ulogu i ono se vrši prije A/D i poslije D/A konverzije. Nekad su se filtri za ovu namjenu realizovali u analognom domenu, korištenjem kondenzatora i kalemova. U diskretnom obliku ove komponente su glomazne i prilično skupe, i teško je dobiti odgovarajuću tačnost njihovih vrijednosti u integrisanim kolima. Međutim A/D i D/A konvertori rade na sve višim frekvencijama, a uz to digitalna kola postaju sve jeftinija. U ovakvoj situaciji nameće se oversampling (preodmjeravanje, odmjeravanje sa učestanošću mnogo višom od Nikvistove) kao alternativa kompleksnom analognom presamplingu ("antialiasing") i filtrima za postsampling (odnosno rekonstrukciju).



Slika 5.2. Karakteristika oversampling filtra

Karakteristike konvencionalnog filtra za presampling su od presudnog značaja: slabljenje do frekvencije $0.4f_s$ mora biti dosta malo a iznad toga dosta veliko. Za studijski video slabljenje do 5.5MHz mora biti manje od 1dB, a iznad 6.75MHz preko 40 ili 50dB. Ovo je vrlo zahtjevan prelaz za odnos $\Delta\omega/\omega_s$. Na Slici 5.2. data je karakteristika konvencionalnog analognog filtra za presampling.

A/D konverter sa oversamplingom radi na višestruko većoj frekvenciji od optimalne frekvencije odmjeravanja, recimo na 27MHz, koja je dvostruko veća od preporuke 601 za video. Konvertoru prethodi jeftini filter koji slabi komponente iznad 13.5MHz i više. Međutim njegove karakteristike za opseg od 5.5MHz do 13.5MHz nisu od presudnog značaja. Zahtijevne karakteristike za taj dio su prepuštene digitalnom konvertoru naniže sa faktorom 2:1. Prelazni odnos $\Delta\omega/\omega_s$ analognog filtera u ovom slučaju je mnogo lakše realizovati u odnosu na direktnu konverziju. Sa današnjom tehnologijom, cijena koštanja digitalnog konvertora naniže je manja od razlike u cijeni koštanja između odličnog i srednjeg analognog filtra. Složenost je sada pomjerena iz analognog domena u digitalni, uz ekonomičniju realizaciju čitavog sistema.

Sa druge strane, postoji i D/A konvertor sa oversamplingom. D/A uređaj radi na frekvenciji 27MHz. Na njega dolazi niz podataka koji je prethodno konvertovan naviše sa faktorom 1:2. Za svaku ulaznu vrijednost oversampling filter daje dvije izlazne vrijednosti. Jedna vrijednost se nalazi na efektivnoj lokaciji ulazne vrijednosti, dok se druga nalazi na sredini između trenutne ulazne vrijednosti i sljedeće. Digitalni filter treba da slabi komponente između 6.75MHz i 13.5MHz, dok analogni filter treba samo da odbaci komponente iznad 13.5MHz. Kao i kod A/D konverzije, performanse analognog filtra u opsegu između 6.75MHz i 13.5MHz nisu od presudnog značaja.

5.3. Interpolacija

U matematici, *interpolacija* je postupak izračunavanja nepoznate vrijednosti neke funkcije za određenu vrijednost argumenta (x), i to na osnovu nekoliko vrijednosti funkcije (s_i) koje su poznate za određenu vrijednost argumenta (x_i). Poznate vrijednosti funkcije često se pišu kao uređeni par sa odgovarajućim argumentom u obliku (x_i, s_i). Postoji više različitih metoda koji se koriste za interpolaciju, a većina od njih koristi funkcije za interpolaciju.

Ako znamo dva para vrijednosti (x_0, s_0) i (x_1, s_1), tada linearna funkcija za interpolaciju glasi:

$$\tilde{g}(x) = s_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} (s_1 - s_0) \quad (5.1)$$

Funkciju za interpolaciju označili smo sa \tilde{g} jer sa f označavamo frekvenciju. Slovo g pišemo sa tildom da bi naglasili da se radi o aproksimaciji.

Linearnu funkciju za interpolaciju možemo zapisati kao težinsku sumu susjednih odmjeraka s_0 i s_1 :

$$\tilde{g}(x) = c_0(x) \cdot s_0 + c_1(x) \cdot s_1 \quad (5.2)$$

Težine zavise od koordinate x (odnosno t - vrijeme):

$$c_0(x) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} \quad c_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (5.3)$$

5.4. Lagranžova interpolacija

J.L. Lagrange (1736-1813) razvio je metod za interpolaciju korištenjem polinoma. Kubna interpolaciona funkcija je polinom sljedećeg oblika:

$$\tilde{g}(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (5.4)$$

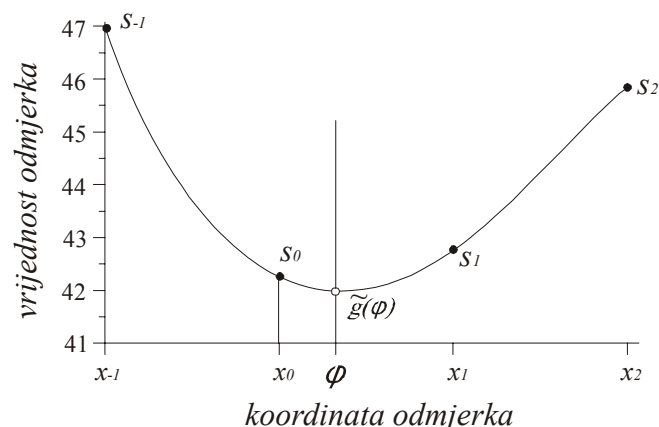
Interpolacija podrazumijeva računanje odgovarajućih koeficijenata a , b , c i d zasnovanih na poznavanju uređenih parova $[x_i, s_i]$. Lagranž je opisao jednostavan i elegantan način računanja ovih koeficijenata.

Linearna interpolacija je samo specijalan slučaj Lagranžove interpolacije prvog reda. Može se smatrati da je interpolacija korištenjem susjednog odmjerka interpolacija nultog reda. Postoji i interpolacija drugog reda (kvadratna), ali se ona rijetko koristi u obradi signala.

U matematici, pod interpolacijom se smatra postupak koji smo već opisali. Međutim, isti termin se koristi i kad interpolaciona funkcija ima istu vrijednost kao i uzorak koji se aproksimira. Lagranžova funkcija predstavlja ovakvu mogućnost. Moglo bi se zaključiti da svaka interpolaciona funkcija zadovoljava ovaj kriterij. Međutim, kod obrade signala ovo nije obavezno. Čak štaviše, interpolacione funkcije koje se koriste u obradi audio i video signala rijetko prolaze tačno kroz zadate tačke. Kao posljedica korištenja matematičke terminologije dobijamo paradoksalnu situaciju da interpolaciona funkcija obično ne interpolira!

U principu, kubna interpolacija može se uraditi i za bilo koji argument x , čak i za vrijednosti van opsega u kojem se nalaze ulazni odmjerki. Pri tome bi se za argumente van intervala $[x_{-1}, x_2]$ postupak nazivao ekstrapolacija. Kod obrade signala, argument x iz opsega između x_0 i x_1 , da bi aproksimirali signal između odmjeraka s_0 i s_1 . Da bi aproksimirali van ovog intervala, mijenjamo ulazne odmjerke $[s_{-1}, s_0, s_1, s_2]$ adekvatno, tako za aproksimaciju između s_1 i s_2 , pomijeramo ulazne odmjerke ulijevo za jedno mjesto.

Kod uniformnog odmjeravanja (kao kod konvencionalnog videa), kada interpoliramo između odmjeraka s_0 i s_1 , umjesto argumenta x može se uzeti fazni ofset, ili fazni pomjeraj (φ) pri kojoj se traži novi odmjerak. Fazni pomjeraj se računa u odnosu na prethodni argument za koji znamo vrijednost funkcije i na osnovu kojeg računamo odmjerak koji interpoliramo. Ako se radi o uniformnom odmjeravanju, vremenski razmak između dva susjedna odmjerka je T i tada je vremenski pomjeraj odmjerka koji interpoliramo jednak $\varphi \cdot T$. Teoretski, φ leži između 0 i 1, dok se u praktično u hardveru realizuje kao binaran broj ili razlomak. Kod videa, jednodimenzionalni interpolator je obično FIR filter čiji su koeficijenti (c_i) funkcije faznog ofseta.



Slika 5.3. Kubna interpolacija ili interpolacija trećeg reda

U obradi signala, kubna ili interpolacija trećeg reda se često koristi. Primjer takve interpolacije je dat na Slici 5.3. Za linearnu interpolaciju potrebna su nam dva susjedna

odmjerka, i to jedan sa lijeve a jedan sa desne strane. Kod kubne interpolacije, obično interpoliramo u centralni interval, korištenjem dva originalna odmjerka sa lijeve i dva sa desne strane željenog odmjerka.

Kubna funkcija za interpolaciju u centralnom intervalu ima oblik:

$$\tilde{g}(x) = c_{-1}(x) \cdot s_{-1} + c_0(x) \cdot s_0 + c_1(x) \cdot s_1 + c_2(x) \cdot s_2 \quad (5.5)$$

Kako je $x = x_0 + \varphi \cdot T$ kubna funkcija za interpolaciju se može napisati i u obliku:

$$\tilde{g}(\varphi) = c_{-1}(\varphi) \cdot s_{-1} + c_0(\varphi) \cdot s_0 + c_1(\varphi) \cdot s_1 + c_2(\varphi) \cdot s_2 \quad (5.6)$$

Funkcija uzima četiri odmjerka $[s_{-1}, s_0, s_1, s_2]$ koji okružuju interval od interesa, dok fazni ofset φ ima vrijednost od 0 do 1. Koeficijenti (c_i) su sada funkcija argumenta φ . Interpolator formira težinsku sumu od četiri odmjerka, gdje su težine funkcije parametra φ i daje kao rezultat procijenjenu vrijednost. U slučaju da su odmjerki u stvari vrijednost polinoma stepena manjeg ili jednakog tri, Lagranžov interpolator daje tačnu vrijednost tog polinoma sa tačnošću u okviru greške zaokruživanja.

Ukoliko vršimo interpolaciju vektora slike na koordinatama x i y , postoje dva pristupa u rješavanju ovog problema. Jedan je da se primijeni jednodimenzionalni filter duž jedne ose, a zatim duž druge. Ovakav pristup tretira dvodimenzionalnu interpolaciju kao separabilan postupak i kao vid separabilnog filtriranja. Iznenadujuće je i to što se ovakav postupak može koristiti i za rotiranje slike. Drugi način je da se matrica 2×2 (sa četiri odmjerka) može koristiti za linearnu interpolaciju u dvije dimenzije i to je *bilinearna* interpolacija. Sofisticiraniji postupak je korištenje matrice 4×4 (sa 16 odmjeraka) kao osnovu za interpolaciju trećeg reda u dve dimenzije i to je *bikubna* interpolacija. U matematici se to može uporediti sa jednodimenzionalnom interpolacijom petnaestog stepena.

5.5. Lagranžova interpolacija kao filtriranje

Kada bi umjesto četiri koraka imali pet, relacija 5.6 bi imala identičan oblik kao relacija koja opisuje Gausov filter sa 5 koraka. Lagranžova interpolacija se može posmatrati kao specijalan slučaj FIR filtriranja, a sva dalja analiza se može raditi kao da je riječ o filtriranju. Filtri su obično simetrični. Interpolacija daje odmjerke tačno na sredini između ulaznih odmjeraka, kao što je D/A konvertor sa dvostrukim oversamplingom, koji je također simetričan. Međutim treba naglasiti da većina interpolatora nije simetrična.

Postoji četiri osnovna razloga zašto polinomialna interpolacija generalno nije pogodna za video signale:

- ♦ polinomialna interpolacija ima nejednako talasanje u nepropusnom opsegu
- ♦ nule u nepropusnom opsegu leže na fiksiranim pozicijama
- ♦ interpolaciona funkcija teži beskonačnosti van centralnog intervala
- ♦ signali dovedeni na ulaz interpolatora sadrže šum.

O svakom od ovih problema ćemo reći ponešto.

Svaki Lagranžov interpolator ima takav frekvencijski odziv da postoji talasanje u nepropusnom opsegu, ono je čak i veoma izraženo. Ovo nije preporučljivo za bilo koju vrstu obrade signala, pa ni za obradu videa.

Lagranžov interpolator "interpolira" originalne odmjerke što uzrokuje pojavu periodičnih nula u frekvencijskom odzivu, i čije su frekvencije fiksne i određene redom interpolatora. Da bi se pri projektovanju filtera moglo kontrolisati slabljenje u nepropusnom opsegu, trebalo bi da se nule mogu podešavati proizvoljno. Ovo nije moguće kod Lagranžovog interpolatora.

U principu, interpolacija pokušava da relativno jednostavno modelira funkciju koja generiše odmjerkke. Oblik funkcije koju koristimo trebao bi biti zavisna i od procesa nastanka signala. Polinom trećeg stepena može dati dobre rezultate između dva centralna odmjerkka. Međutim, vrijednost polinoma naglo teži plus ili minus beskonačnosti pri argumentima van intervala ograničenog sa ta dva odmjerkka. Ta osobina se kosi sa osnovnim osobinama realnih signala, koji su uvijek ograničeni.

U obradi signala, uvijek postoji određena greška u odmjercima izazvana prisutnim šumom, bilo kvantizacionim šumom ili greškom zaokruživanja pri računanju u digitalnom domenu. Kada izvor podataka nije savršen, nerazumno je zahtijevati da interpolaciona funkcija bude savršena.

Ova četiri problema nagovještavaju da interpolacione funkcije u obradi signala ne dolaze iz klasične matematike. Umjesto toga, koriste se interpolacione funkcije sa *sinc* težinskom funkcijom. U obradi signala interpolacione funkcije obično ne "interpoliraju".

Idealna težinska funkcija *sinc* nema prepoznatljivih nula u svom frekvencijskom spektru. Kada se *sinc* funkcija prilagodi i optimizira za fizički moguć filter, u propusnom opsegu postoji konačan broj nula. Za razliku od Lagranžovog interpolatora, ove nule se mogu pomijerati. Pri projektovanju filtra nule se biraju tako da se dobije odgovarajući frekvencijski odziv.

5.6. Polifazni interpolatori

Kod obrade signala često je potrebno izvršiti konverzije sa jednostavnim (malim) faktorom konverzije. Na primjer konverzija iz 1280 S_{AL} u 1920 S_{AL} HDTV format zahtijev konvertor sa faktorom konverzije od 2:3. Izlazni odmjerk se računa na jednoj od tri moguće faze: u fazi sa ulaznim odmjerkom, na udaljenosti 1/3 ili 2/3 između odmjerkaka (odnosno faza može biti 0, 1/3 ili 2/3). Konvertor naviše može biti realizovan kao FIR filter sa samo tri seta koeficijenata, pri tome se koeficijentima može pristupiti preko lookup tabele, i adresiraju se preko faze φ .

Mnogi interpolatori imaju faktor konverzije mnogo složeniji od 2:3. Na primjer, konverzija iz $4f_{SC}$ NTSC u format po preporuci 601 (4:2:2) za 910 ulaznih vrijednosti daje 858 izlaznih vrijednosti. To podrazumijeva konverziju naniže sa faktorom 35:33. Uzastopni odmjerci na izlazu se računaju sa uvećanjem faze od 35/33. Svaki trideset treći izlazni odmjerk je u fazi sa ulaznim, dok je fazni pomjeraj ostalih redom:

$$1\frac{2}{33}, 2\frac{4}{33}, 3\frac{6}{33}, \dots, 16\frac{32}{33}, 18\frac{1}{33}, 19\frac{3}{33}, \dots, 31\frac{29}{33}, 32\frac{31}{33}$$

Brojač kola za adresiranje trebalo bi da se uvećava za 35/33 za svaki ulazni odmjerk i prilikom toga se gubi ulazni odmjerk na mjestu 17. Zahtijevane faze pri interpolaciji su razlomci $\varphi=0, 1/33, 2/33, 3/33, \dots, 32/33$ između ulaznih uzoraka.

Direktan pristup za projektovanje ovakvog hardvera za interpolaciju je upravljanje FIR filtrom sa ulaznom frekvencijom odmjerkavanja odnosno brzinom dolaska odmjerkaka. Sa svakim taktom te frekvencije ulazni odmjerk se pomijera kroz registre. Kola za adresiranje su realizovana kao brojač po modulu 33 da bi se znala faza i taj dio kola se naziva *fazni akumulator*. Sa svakim taktom se u filtru primjenjuju 33 različita kompleta koeficijenata. Pri tome svaki komplet koeficijenata se koristi za odgovarajući fazni pomak. U ovom slučaju samo 33 izlazne vrijednosti dobijamo za 35 taktova signala. Tokom dva takta od tih 35 nema izlaznih vrijednosti.

Ovakva struktura se naziva *polifazni filter*. Ovaj slučaj ilustruje 33 faze, međutim broj koraka je nezavisan od broja faza. Recimo predfilter za dvostruki oversampling ima samo dvije faze.

5.7. Broj polifaznih koraka i faza

Broj koraka koji se zahtijeva u filtru se određuje po stepenu kontrole koju projektant treba da izvještava na frekvencijskom odzivu, i koliko treba da budu precizni filtri jedan u odnosu na drugi sa aspekta faze. U mnogim primjenama za potrošačku video elektroniku, kubna interpolacija (sa četiri koraka) je dovoljna. Za studijsku opremu, dovoljno je osam ili više koraka u zavisnosti od zahtijeva.

Za konkretne primjene polifaznog FIR interpolatora broj faza se određuje računski uzimajući u obzir frekvenciju odmjeravanja ili brzinu dolazaka odmjeraka. Broj faza određuje broj različitih setova koeficijenata koji će se koristiti. Koeficijenti se obično izračunaju unaprijed i zapamte u ROM memoriji.

Kao ilustraciju polifaznih filtara naveli smo primjer filtra sa 33 faze. U nekim primjenama broj faza je prilično velik da bi se koristila direktna realizacija. To je slučaj kada imamo faktor konverzije 709379:540000 koji je potreban za konverziju 4f_{SC} PAL formata u format po preporuci 601 (4:2:2), i tada od 922 aktivna odmjerka po liniji imamo 702. U drugim primjenama, kao što su digitalni video efekti, broj faza je promjenljiv i nepoznat unaprijed. Ovakve primjene mogu sadržati interpolator čiji je broj faza prilagođen da bude jednak stepenu broja 2, na primjer 256. Faze se u ovom slučaju računaju sa određenim stepenom tačnosti, i aproksimirane su binarnim razlomkom (u ovom slučaju sa 8 bita) da bi se formirao fazni ofset ϕ koji se dovodi na interpolator.

Interpolator pomjeraj faze računa sa 8 bita pa izlazni odmjerak može da ima grešku u fazi od $\pm 1/512$ intervala između odmjeraka. Ovo je prihvatljivo za digitalni video. Međutim, ako fazni akumulator ima samo 8 bita za pamćenje faznog pomaka, greška u poziciji će se akumulirati duž linije slike. Za ovaj slučaj, sa 922 aktivnih odmjeraka po liniji, greška bi mogla dostići 3 ili 4 intervala između odmjeraka na desnom kraju linije. Ovo se baš nemože dozvoliti, pa se bira veći broj bita za pamćenje faznog pomaka. Za ovaj slučaj dovoljno je 13 bita, od kojih je samo 8 značajno za interpolator.

5.8. Primjena polifaznih interpolatora

Polifazna interpolacija je, kako smo već rekli, specijalan slučaj filtriranja FIR filtrima. Međutim, u primjeni postoje tri bitne razlike u odnosu na primjenu FIR filtara. Prvo, ulazna i izlazna brzina odmjeraka, odnosno frekvencija odmjeravanja kod tipičnih FIR filtara su jednake, dok su kod polifaznih interpolatora uglavnom različite. Drugo, FIR filtri obično imaju fiksirane koeficijente, dok kod polifaznih FIR interpolatora koeficijenti se mijenjaju od odmjerka do odmjerka. I treće, FIR filtri su obično simetrični dok polifazni interpolatori nisu.

Uopšteno govoreći, za mali broj faza (recimo osam ili manje), cijena koštanja interpolatora zavisi od broja operacija množenja, a one su proporcionalne broju koraka. Ukoliko je broj faza veći od 8, značajno se povećava cijena memorije za koeficijente. Cijena kola za adresiranje koeficijenata takođe zavisi od broja faza.

Za slučaj konvertora naniže sa faktorom 35:33, razmatrali smo strukturu čije je upravljanje bilo na bazi ulazne frekvencije odmjeravanja. Uzmimo slučaj da hardver zahtijeva vanjski takt signal. Za 31 takt od 33 izlazna takta, po jedan ulazni odmjerak se koristi. Međutim, u toku dva takta, po dva ulazna odmjerka se koriste. Ovo predstavlja ograničenje za projektovanje memorije, jer se mora pristupiti memoriji dva puta u toku jednog takta. Rješenje je ili realizacija dvostrukog pristupa memoriji, ili pristup do dodatnih 44 odmjerka tokom blanking intervala, koji su smješteni u dodatnom baferu. Odavde se može zaključiti da je upravljanje interpolatorom pomoću ulaznog takta jednostavnije.

Razmotrimo i slučaj kada imamo konvertor naviše sa faktorom 33:35. Ako se sa ovakvim interpolatorom upravlja sa izlazne strane, interpolator daje na izlazu jedan odmjerak po taktu, i koristi najviše jedan ulazni odmjerak po taktu. Međutim kod njega za dva takta od 35 ulaznih se desi da nema ulaznih odmjeraka, što stvara dodatne probleme u projektovanju FIR filtra na izlaznoj strani i vanjskoj memoriji.

Poenta svega ovoga leži u tome da se struktura polifaznih filtara pojednostavljuje ako se njim upravlja sa one strane na kojoj je veća frekvencija odmjeraka.

5.9. Decimacija

Kod Lagranžove interpolacije nije uzeto u obzir da li interpolacija daje više ili manje odmjeraka od broja ulaznih odmjeraka. Kod obrade signala postoji bitna razlika između konverzije naniže, gdje je neophodno NF filtriranje da bi se spriječio aliasing, i konverzije naviše, gdje je potrebno NF filtriranje da bi se potisnule slike spektra. Pod terminom interpolacija u obradi signala se obično podrazumijeva konverzija naviše, odnosno resampling sa faktorom jedan ili više. Termin interpolacija takođe opisuje pomijeranje faze bez promjene frekvencije, što je specijalan slučaj konverzije sa faktorom 1:1

Decimacija ili konverzija naniže sa faktorom 10:1 je analogna terminu koji se koristio u Rimsko doba (u našem jeziku "desetkovanje"), što je značilo da devet od deset vojnika pogine tokom bitke. Termin *decimacija* je dobio uopšteno značenje konverzije naniže.

5.10. NF filtriranje kod decimacije

Ranije u ovom poglavlju, vidjeli smo da je konverzija hrominentne komponente u stvari decimacija sa faktorom 2:1. U decimatoru odmjeraci su filtrirani NF filtrom da bi se oslabile komponente na polovici nove frekvencije odmjeravanja ili iznad nje, a zatim se odmjeraci odbacuju. Očigledno odmjeraci koji se odbacuju ne moraju da se računaju. Uobičajeno je da se odbacivanje odmjeraka i filtriranje realizuju u jednom kolu.

U primjeru decimacije kod hroma subsamplinga objasnili smo razlog NF filtriranja do $0.25f_s$. Kada se radi o konverziji $4f_{SC}$ PAL formata u format po preporuci 601 (4:2:2) ulazni i izlazne frekvencije su bile slične pa nije bilo potrebe obraćati posebnu pažnju na propusni opseg na izlazu. Ukoliko se radi konverzija naniže čiji je faktor mnogo manji od jedan, recimo 5:4 ili veći tada impulsni odziv mora da sadrži NF filtriranje (predfiltriranje, ili antialiasing) kao i fazni pomjeraj. Da bi se izbjegao aliasing, granična frekvencija mora biti skalirana sa faktorom konverzije. Ovakav slučaj može zahtijevati nekoliko setova koeficijenata za filter sa različitim graničnim frekvencijama.

6. PRAKTIČNI DIO

Oblast višefrekvencijske digitalne obrade signala (multirate processing) je primjer naučne discipline koja nema svoj ekvivalent u analognoj obradi signala. Linearni vremenski invarijantni digitalni filtri obavljaju iste ili slične funkcije koje obavljaju analogni filtri. Međutim, multirate processing donosi specifične prednosti u obradi diskretnih signala i obradi signala uopšte. Određene operacije filtriranja se mogu mnogo efikasnije primijeniti koristeći ovakav način obrade signala. Na primjer, NF filtriranje se može razdvojiti na dve kaskade kod koje je svaka NF filter. Imajući u vidu da signal sa izlaza prvog NF filtra ima manju širinu spektra od ulaznog signala, frekvencija odmjerenja se može sniziti, a time dobijamo manji broj odmjerača koje je potrebno obrađivati, samim tim smanjujemo broj operacija koje izvršavamo pri računanju. Osnovna ideja koja se koristi pri multirate processingu je da se cjelokupno računanje izvršava pri najmanjoj mogućoj frekvenciji odmjerenja. Ukoliko je potrebno prikazati signal pri većoj frekvenciji odmjerenja koristi se interpolacija.

Oblast multirate processinga je veoma široka i sadrži osnovne postupke kao što su decimacija i interpolacija, zatim nešto složenije kao što su banke filtera za savršenu rekonstrukciju, wavelet-i itd.

Mi ćemo se zadržati samo na osnovnim postupcima koji se koriste kod digitalne obrade slike, kao i na nekim konkretnim primjenama u digitalnoj televiziji.

6.1. Korištenje funkcija Matlaba

U primjerima koji slijede koristićemo neke funkcije Matlaba, kako iz Image Processing Toolbox-a, tako i iz Signal Processing Toolbox-a. Nećemo navoditi sve jer je njihov broj veoma veliki, a osvrnućemo se na one koje su interesantne za primjenu ovoj oblasti, uz kratak opis šta one konkretno rade.

◆ **decimate**

Snižava frekvenciju odmjerenja ulaznog niza pri čemu je originalna frekvencija odmjerenja predstavlja cjelobrojan umnožak nove frekvencije odmjerenja.

Sintaksa

$$y = \text{decimate}(x,r)$$

$$y = \text{decimate}(x,r,n)$$

$$y = \text{decimate}(x,r,'fir')$$

$$y = \text{decimate}(x,r,n,'fir')$$

Opis funkcije

Snižava frekvenciju odmjerenja ulaznog niza podataka i obavlja operaciju suprotnu interpolaciji. Proces počinje filtriranjem ulaznih podataka NF filtrom a zatim snižavanjem frekvencije odmjerenja. Rezultat je signal sa manjim brojem odmjeraka.

$y = \text{decimate}(x,r)$ snižava frekvenciju odmjerenja faktorom r . Izlazni niz y je r puta kraći od ulaznog niza x . Početna postavka koristi Čebiševljevi filter prvog tipa i osmog reda, koji filtrira ulazni niz unaprijed i unazad da bi se uklonilo izobličenje faze što kao rezultat ima kao da smo koristili filter dvostruko većeg reda.

$y = \text{decimate}(x,r,n)$ koristi Čebiševljevi filter n -tog reda. Ipak ne preporučuje se korištenje filtera sa redom višim od trinaest zbog nestabilnosti pri povećanom broju operacija pri računanju. U ovom slučaju će Matlab ispisati upozorenje.

$y = \text{decimate}(x,r,'fir')$ koristi FIR filter sa 30 koeficijenata umjesto Čebiševljevog IIR filtera, i pri tome se filtriranje vrši samo u jednom pravcu. Ovakva tehnika omogućava uštedu memorije i praktična je pri radu sa dužim nizovima.

$y = \text{decimate}(x,r,n,'fir')$ koristi FIR filter dužine n .

◆ **interp**

Povećava vrijednost frekvencije odmjerenja (interpolira signal) tako da je nova frekvencija odmjerenja umnožak cijelog broja i originalne frekvencije odmjerenja.

Sintaksa

$$y = \text{interp}(x,r)$$

$$y = \text{interp}(x,r,l,alpha)$$

$$[y,b] = \text{interp}(x,r,l,alpha)$$

Opis funkcije

Interpolacija povećava originalnu frekvenciju odmjerenja. Ova funkcija vrši ubacivanje nultih odmjeraka a zatim primjenjuje specijalan NF filter.

$y = \text{interp}(x,r)$ povećava frekvenciju tako da je nova frekvencija odmjerenja veća od originalne r puta, pri čemu je r cijeli broj. Interpolirani niz y je r puta duži od ulaznog niza x .

$y = \text{interp}(x,r,l,alpha)$ specificira l (dužina filtera) i $alpha$ (frekvencija odsijecanja filtera). Početna vrijednost za l je 4 a za $alpha$ je 0.5.

$[y,b] = \text{interp}(x,r,l,alpha)$ u ovakvom slučaju kao rezultat dobijamo i vektor b koji predstavlja koeficijente filtera koji se koristi pri interpolaciji.

◆ **resample**

Vrši funkciju promjene frekvencije odmjerenja naviše ili naniže, pri čemu je nova frekvencija umnožak nekog racionalnog faktora i originalne frekvencije.

Sintaksa

$$y = \text{resample}(x,p,q)$$

$$y = \text{resample}(x,p,q,n)$$

$$y = \text{resample}(x,p,q,n,beta)$$

$$y = \text{resample}(x,p,q,b)$$

$$[y,b] = \text{resample}(x,p,q)$$

Opis funkcije

$y = \text{resample}(x,p,q)$ mijenja frekvenciju odmjerenja tako da je nova frekvencija umnožak faktora p/q i originalne frekvencije. Pri tome se koriste polifazni filtri, dok su p i q moraju biti pozitivne cjelobrojne vrijednosti. Dužina izlaznog niza y je jednaka dužini ulaznog niza pomnoženo sa faktorom p/q a zatim zaokruženo na prvu veću cijelu vrijednost. Ukoliko je x matrica, ova funkcija radi sa kolonama te matrice. Ova funkcija također primjenjuje anti-aliasing NF FIR filter tokom procesa resamplinga. FIR filter koji se koristi je *firls* (least square linear phase FIR filter odnosno FIR filter sa linearnom fazom i metodom najmanjih kvadrata) i to sa Kaiser prozorom.

$y = \text{resample}(x,p,q,n)$ koristi n odmjeraka sa obe strane trenutnog odmjerka pri računanju novih odmjeraka. Dužina FIR filtra je proporcionalna n , ukoliko koristimo veće vrijednosti n dobijamo veću tačnost, međutim povećava se vrijeme potrebno za računanje. Početna vrijednost je 10. Ako stavimo da je $n=0$ dobijamo interpolaciju na osnovu najbližeg susjeda.

$y = \text{resample}(x,p,q,n,beta)$ koristi $beta$ kao parametar pri dizajniranju Kaiserovog prozora koji se koristi pri u toku resamplinga. Početna vrijednost za $beta$ je 5.

$y = \text{resample}(x,p,q,b)$ filtrira niz x koristeći koeficijente filtra date u vektoru b .

$[y,b] = \text{resample}(x,p,q)$ kao rezultat pored izlaznog niza y vraća i vektor b koji predstavlja koeficijente filtra koji se koristi tokom procesa resamplinga.

♦ upfirdn

Vrši tri operacije, prvo konverziju naviše, zatim primjenjuje FIR filter i na kraju konverziju naniže. Kaskada ove tri operacije se primjenjuje kroz tehnike polifaznog filtriranja, a to je glavna tehnika u multirate filtriranju. Pri tome kvalitet resamplinga zavisi od kvaliteta primjenjenog FIR filtra.

Sintaksa

$yout = \text{upfirdn}(xin,h)$

$yout = \text{upfirdn}(xin,h,p)$

$yout = \text{upfirdn}(xin,h,p,q)$

$[yout,zf] = \text{upfirdn}(xin,h,...,zi)$

Opis funkcije

Ova funkcija vrši tri operacije jednu za drugom:

- Konverziju naviše ulaznih podataka sa faktorom p (ubacivanje nultih odmjeraka)
- FIR filtriranje ovakvog signala sa filtrom čiji je impulsni odziv dat vektorom h
- Konverziju naniže sa faktorom q (odbacivanje odmjeraka)

Ova funkcija je realizovana kao MEX fajl da bi se dobila maksimalna brzina izvršavanja tako da je potrebno obrađivati samo one odmjerke koji će se naći na izlazu. FIR filter koji se koristi je obično NF filter, i on se mora prethodno projektovati koristeći funkcije *remez* ili *firl*.

$yout = \text{upfirdn}(xin,h)$ filtrira ulazni signal xin korištenjem FIR filtra sa impulsnim odzivom datim sa vektorom h . Ukoliko je ulazni signal vektor, on se posmatra kao jedan signa. Međutim, ako je ulazni signal matrica, svaka kolona se posmatra kao drugi signal i zasebno se filtrira. Ako je h vektor, tada on predstavlja jedan FIR filter. Ukoliko je on matrica, svaka kolona predstavlja poseban filter.

$yout = \text{upfirdn}(xin,h,p)$ koristi faktor konverzije naviše p , početna vrijednost mu je 1.

$yout = \text{upfirdn}(xin,h,p,q)$ faktor konverzije naniže q početna vrijednost mu je 1.

$[yout,zf] = \text{upfirdn}(xin,h,...,zi)$ određuje početne uslove za vektor zi . Pri tome dužina vektora početnih uslova mora biti niža za jedan od dužine vektora h .

Napomena:

Funkcija *resample* izvršava projektovanje FIR filtra korištenjem *firls*, zatim konverziju frekvencije odmjera vanja korištenjem funkcije *upfirdn*.

♦ **imresize**

Vrši promjenu dimenzija slike

Sintaksa

$$B = \text{imresize}(A, m, \text{method})$$

$$B = \text{imresize}(A, [\text{mrows } \text{ncols}], \text{method})$$

$$B = \text{imresize}(\dots, \text{method}, n)$$

$$B = \text{imresize}(\dots, \text{method}, h)$$
Opis funkcije

Ova funkcija vrši promjenu dimenzija slike bilo kog tipa koristeći specificirani metod interpolacije. Metod interpolacije može imati jednu od sljedećih vrijednosti:

'nearest' - (koji je početni) koristi metod interpolacije putem najbližeg susjednog odmjerka,

'bilinear' - koristi bilinearnu interpolaciju,

'bicubic' - koristi bikubnu interpolaciju.

Ukoliko se ovaj argument ne navede, koristi se metod 'nearest'.

$B = \text{imresize}(A, m, \text{method})$ kao rezultat vraća sliku koja je m puta veća ili manja od početne slike. Ukoliko je m između 0 i 1, izlazna slika je manja od originalne, a ako je m veće od 1, slika je m puta veća od originalne.

$B = \text{imresize}(A, [\text{mrows } \text{ncols}], \text{method})$ kao rezultat daje sliku veličine $m \times n$ piksela. Pri tome treba imati u vidu da odnos širine i visine originalne i izlazne slike ne mora biti isti. Ukoliko je to slučaj, izlazna slika će biti deformisana (skupljena ili raširena).

Kada je navedena veličina izlazne slike manja od originalne, i pri tome se koristi bilinearni ili bikubni metod interpolacije, funkcija *imresize* vrši prvo NF filtriranje pa onda interpolaciju da bi se izbjegli produkti aliasinga. Početni filter koji se koristi je dimenzija 11 puta 11 piksela. Može se i navesti druga veličina filtra u vidu:

$$[\dots] = \text{imresize}(\dots, \text{method}, n)$$

gdje je n skalarna veličina i cjelobrojna vrijednost koja određuje veličinu dvodimenzionalnog filtra ($n \times n$). Ako je $n=0$ ova funkcija izostavlja filtriranje.

Takođe je moguće i koristiti bilo koji dvodimenzionalni filter određen sa njegovim koeficijentima h . Tada je oblik naredbe:

$$[\dots] = \text{imresize}(\dots, \text{method}, h)$$

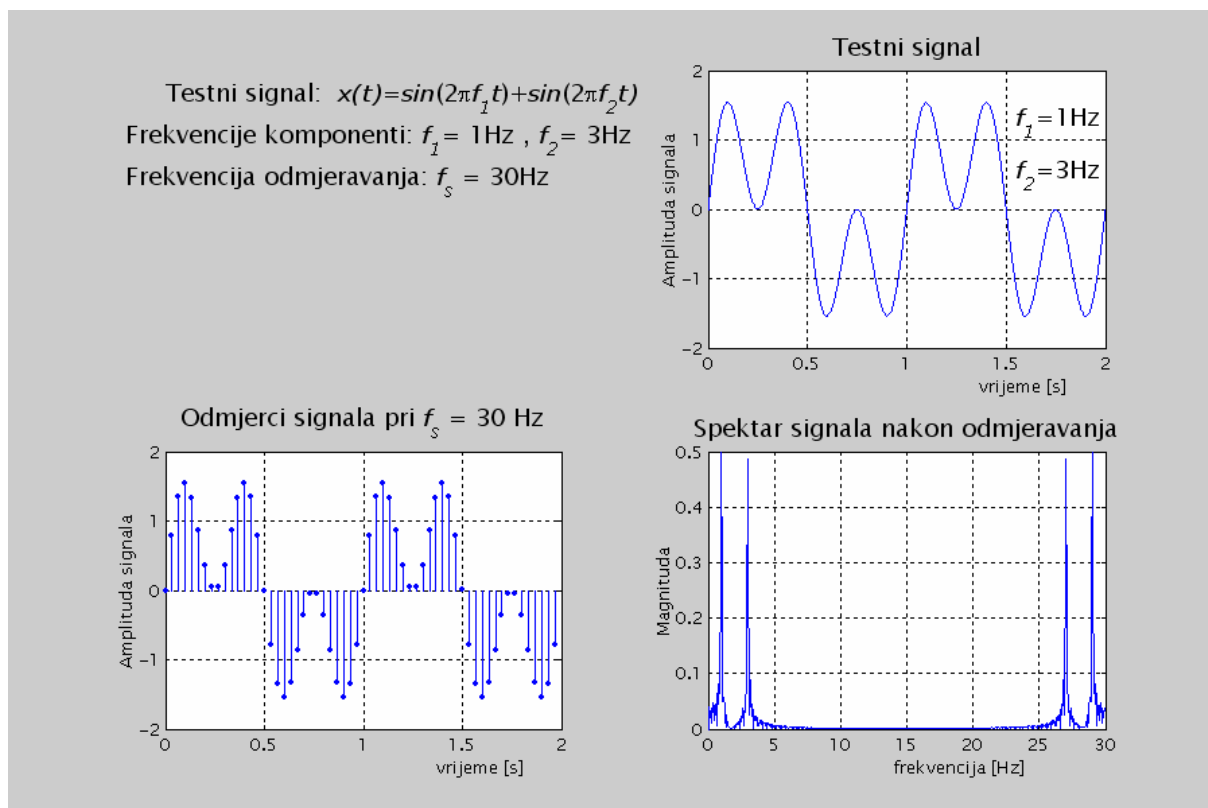
6.2. Primjer br. 1: Konverzija naniže sa faktorom 2:1

Postupak konverzije naniže sastoji se od dva koraka: filtriranja signala i odbacivanja odmjeraka. Ovakvu vrstu konverzije možemo izvršiti pomoću funkcije *decimate*. Programski kod u Matlabu za ovaj primjer je dat kao m-fajl, i u prilogu pod nazivom *Primjer1.m*.

Posmatrajmo ulazni signal koji se sastoji od dvije komponente i to osnovne komponente i trećeg harmonika, koji je dat je relacijom:

$$y(x) = \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot x) + \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot x)$$

Brojčane vrijednosti frekvencije odmjeravanja signala f_s , kao i frekvencije komponenti signala f_1 i f_2 mogu se mijenjati, a naznačene su na Slici 6.1.



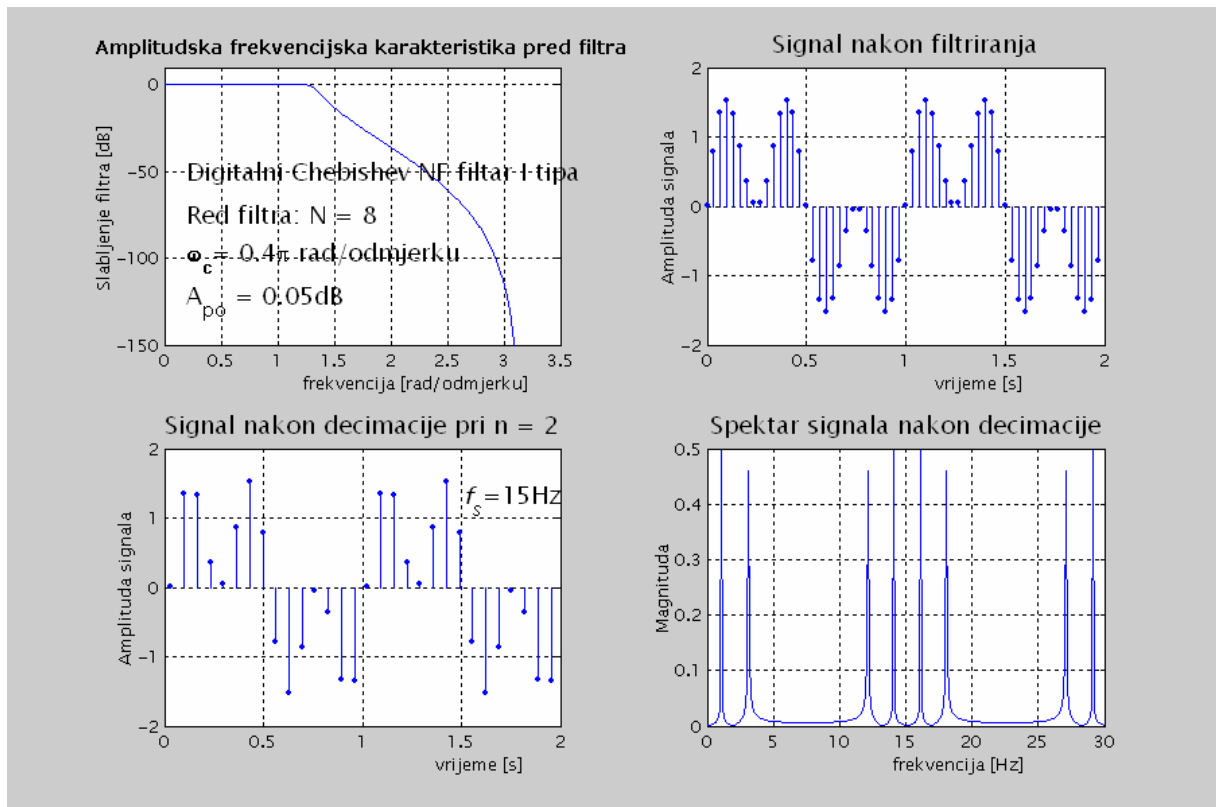
Slika 6.1. Testni signal i njegov spektar nakon odmjerenja

Diskretni signal dobijamo nakon odmjerenja, a izgled takvog signala kao i njegov spektar su dati na Slici 6.1. Odmjeravanje signala izaziva pojavu ponavljanja spektra na frekvencijama koje se nalaze simetrično u odnosu na polovinu frekvencije odmjeravanja. Zbog snižavanja frekvencije odmjeravanja, prije decimacije je neophodno odbaciti komponente signala koje se nalaze iznad polovine nove frekvencije odmjeravanja. U ovom slučaju početna frekvencija odmjeravanja je 30 Hz, nova frekvencija odmjeravanja je 15 Hz, pa treba oslabiti komponente iznad 7.5 Hz. Prevedeno u digitalni domen, digitalni filter treba da slabi komponente iznad frekvencije $\pi/2$ rad/odmjerku, odnosno ako govorimo o normalizovanoj frekvenciji odsijecanja filtra, onda je njena vrijednost 0.5. Ako vršimo decimaciju sa faktorom $n:1$, normalizovana frekvencija odsijecanja je $1/n$ radiana/odmjerku. U sklopu funkcije *decimate* može se koristiti Čebiševljev ili FIR filter. U ovom slučaju korist ćemo početnu postavku ove funkcije, što podrazumijeva Čebiševljev filter I tipa i pri

čemu je red filtra $N=8$, sa frekvencijom odsijecanja 0.4π i slabljenjem u propusnom opsegu od 0.05dB .

Filtriranje se vrši unaprijed i unazad da bi se eliminisalo fazno kašnjenje. Red filtra koji se koristi može biti proizvoljan, a ako se ne navede, koristi se filter osmog reda. Prilikom filtriranja, signal se sa lijeve i desne strane dopunjava signalom koji izgleda kao slika u ogledalu. To se radi da bi se izbjeglo korištenje nultih odmjerača koji su potrebni prilikom filtriranja, i koji izazivaju izobličenja signala nakon filtriranja.

Konačan rezultat snižavanja frekvencije odmjeračavanja signala sa faktorom dva dobija se nakon odbacivanja svakog drugog odmjerača filtriranog signala, i dat je na Slici 6.2., na kojoj je prikazan i spektar tako dobijenog signala.



Slika 6.2. Rezultat snižavanja frekvencije odmjeračavanja pomoću decimacije

Posljedica decimacije je pomijeranje slike spektra signala naniže, odnosno pomijeranje naniže njegovog odraza dobijenog kada spektar "presavijemo" preko polovine frekvencije odmjeračavanja. Treba naglasiti da je konverzija naniže sa faktorom 2:1 samo specijalan slučaj. U datom programu vrijednosti se mogu mijenjati, ali pri tom treba obratiti pažnju na sljedeća ograničenja:

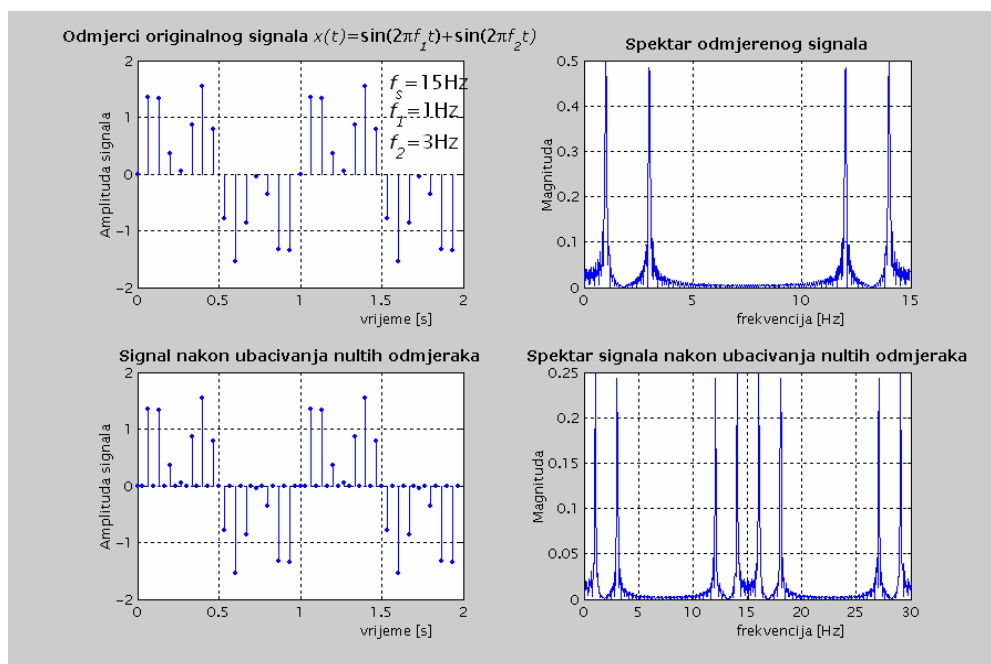
- frekvencija odmjeračavanja mora zadovoljiti Nikvistov kriterijum, inače dobijamo izobličenja signala
- broj odmjerača koji se dobija na izlazu ne može biti manji od reda filtra koji Matlab koristi u toku decimacije

6.3. Primjer br. 2: Konverzija naviše kao filtriranje

Jedan od načina konverzije naviše sa faktorom 1:n je sljedeći:

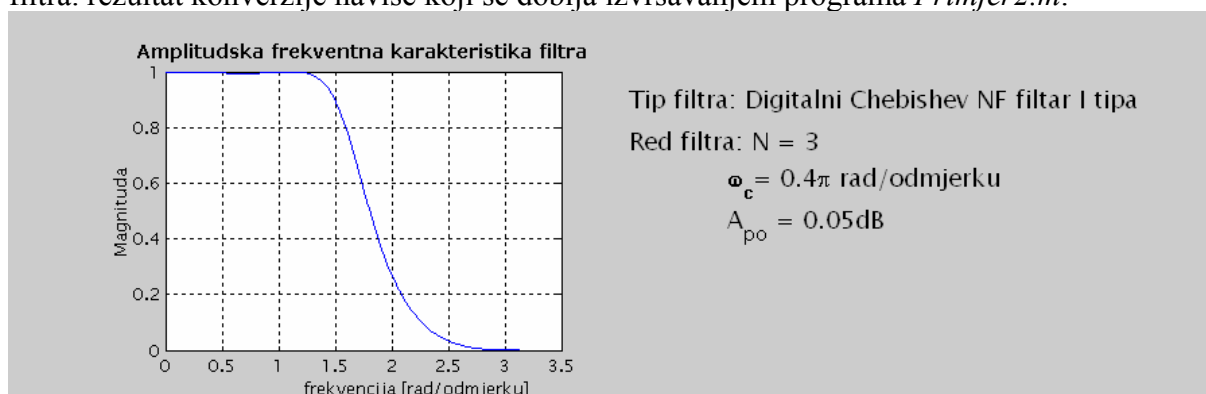
1. Ubacivanje n-1 nultih odmjerača između svaka dva susjedna odmjjerka
2. Filtriranje tako dobijenog signala digitalnim filtrom

Postupak konverzije naviše ili interpolacije na ovaj način ilustruje m-fajl pod nazivom *Primjer2.m* koji je dat u prilogu. Ovakav način interpolacije koristi Matlabova funkcija *interp*, a cilj ovog primjera je da prikaže pojedine korake u tom procesu. U ovom slučaju ćemo koristiti signal kao iz prethodnog primjera, s tim da je početna frekvencija odmjeravanja 15Hz.



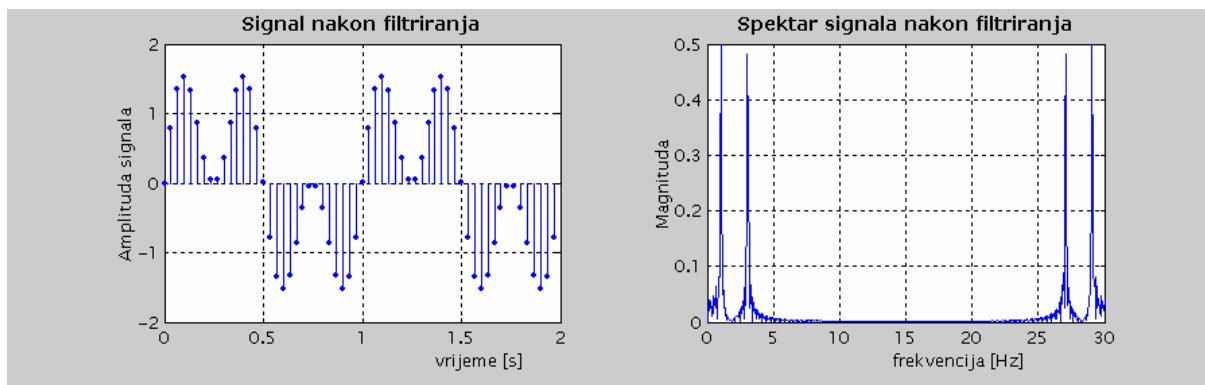
Slika 6.3. Interpolacija nultih odmjerača

Posljedica ubacivanja nultih odmjerača je da magnituda komponenti u spektru signala dvostruko manja. Iz tog razloga je potrebno realizovati pojačanje signala sa koeficijentom pojačanja 2. Nakon toga, potrebno je filtrirati signal da bi se potisnule slike spektra signala dobijene snižavanjem frekvencije odmjeravanja. Za ovu namjenu je moguće korištenje različitih tipova filtara, međutim, mi ćemo koristiti isti tip filtra kao u prethodnom primjeru. Na Slici 6.4. je data frekvencijska karakteristika upotrebljenog filtra zajedno sa zahtjevima filtra. rezultat konverzije naviše koji se dobija izvršavanjem programa *Primjer2.m*.



Slika 6.4 Karakteristike korištenog filtra

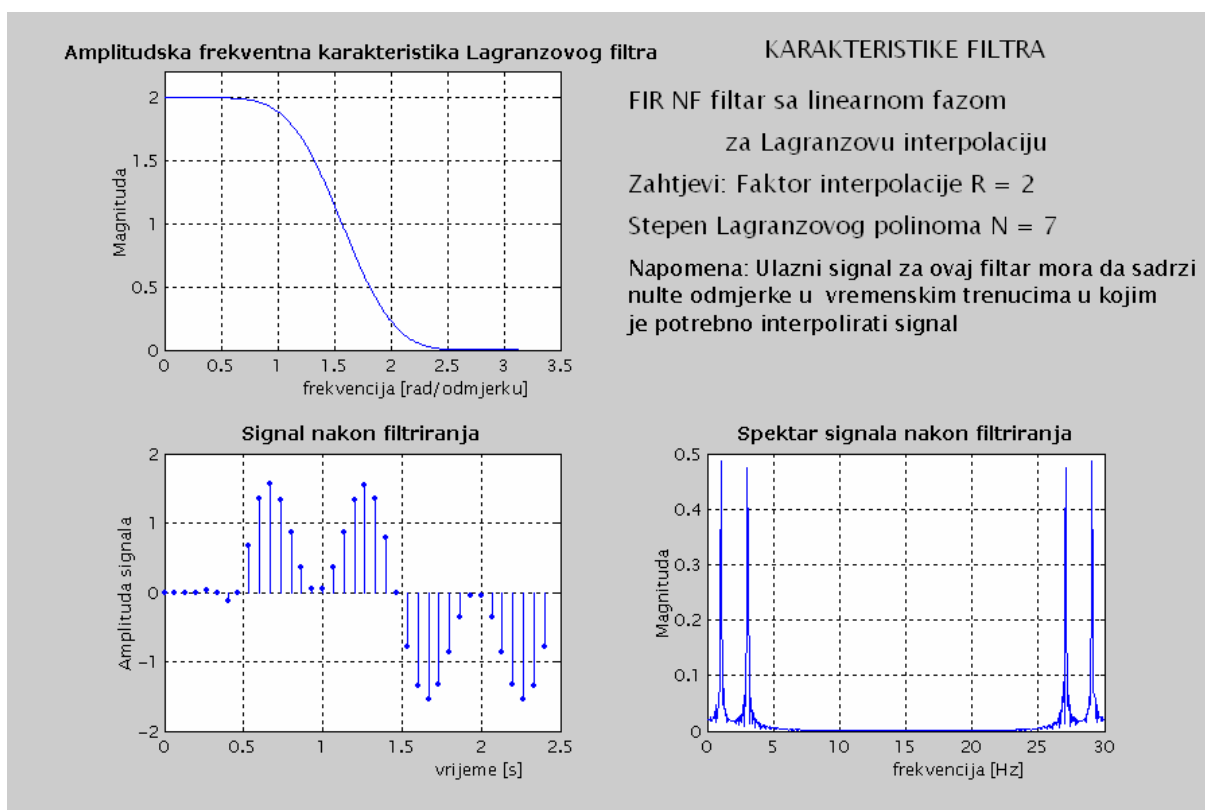
Kao krajni rezultat interpolacije na ovaj način dobijamo signal kao na Slici 6.5.



Slika 6.5. Signal nakon interpolacije

Frekvencija odmjerenja ovakvog signala je sada 30Hz.

Interpolaciju je moguće izvršiti i Lagranžovim filtrom, koji vrši "idealnu" interpolaciju. Funkcija koja se koristi za aproksimaciju pri "idealnoj" interpolaciji prolazi kroz vrijednosti signala koje su poznate. Lagranžova interpolacija koristi polinome za aproksimaciju signala, a interpolacija n-tog reda podrazumijeva da se za interpolaciju koristi Lagranžov polinom n-tog stepena. Na Slici 6.6. je data frekventijska karakteristika Lagranžovog filtra za interpolaciju, kao i signal nakon filtriranja ovakvim filtrom.



Slika 6.6. Lagranžova interpolacija

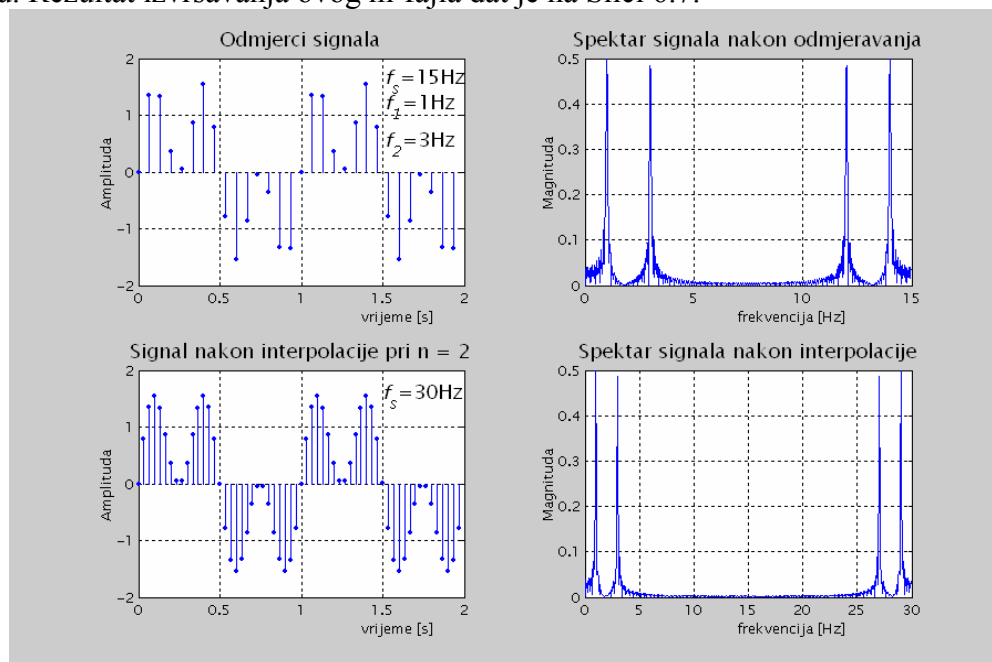
Sa Slike 6.6. vidimo da je u Lagranžovom filteru već realizovano pojačanje signala koje je potrebno da bi se eliminisalo slabljenje koje nastaje prilikom ubacivanja nultih odmjeraka. Lagranžov filter se može dobiti funkcijom *intfilt* u obliku:

$$\text{intfilt}(r,n,\text{'Lagrange'})$$

gdje je r faktor interpolacije a n stepen Lagranžovog polinoma.

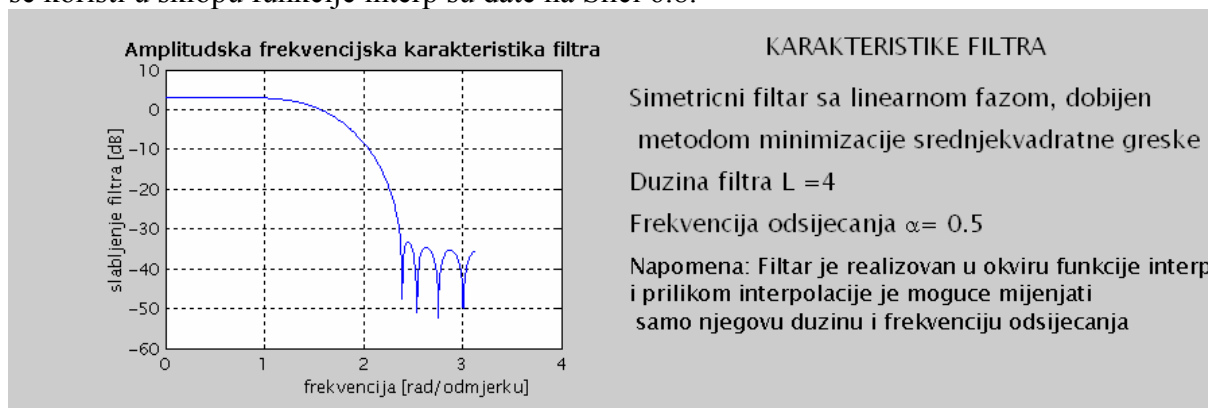
6.4. Primjer br. 3: Konverzija naviše sa faktorom 1:2

U ovom slučaju koristićemo funkciju *interp*. Programski kod ovog primjera je dat kao m-fajl i u prilogu pod nazivom *Primjer3.m*. Koristili smo isti ulazni signal kao i u prethodnom primjeru. Rezultat izvršavanja ovog m-fajla dat je na Slici 6.7.



Slika 6.7. Konverzija naviše sa faktorom 2:1

Slika spektra presavijenog oko polovine frekvencije odmjerenja je sada pomjeren naviše. Nakon interpolacije je potrebno je filtrirati dobijeni signal, a karakteristike filtra koji se koristi u sklopu funkcije *interp* su date na Slici 6.8.



Slika 6.8 Karakteristike filtra u sklopu funkcije *interp*

Filtar koji koristi funkcija *interp* je specijalni simetrični NF FIR filtar koji koristi algoritam 8.1 za NF interpolaciju (opisan u Program for Digital Signal Processing, IEEE Press, New York, 1979, Algorithm 8.1.). Ovaj filtar je projektovan tako da propusti odmjerke ulaznog signala nepromjenjene, dok se interpolacija vrši tako da se minimizira srednjekvadratna greška. Ukoliko se koristi sintaksa:

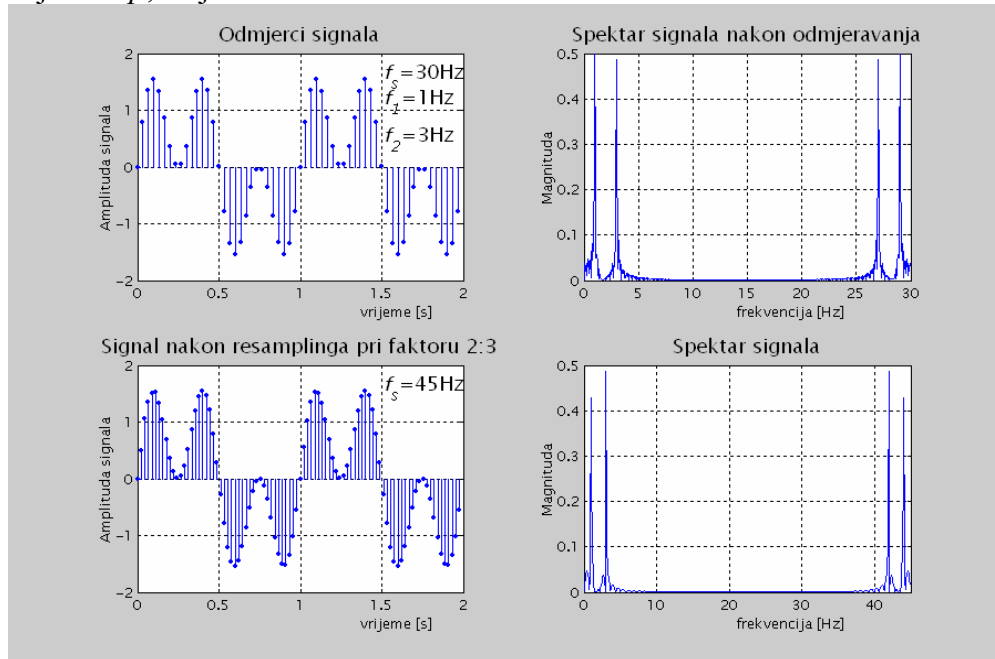
$$[y,b]=interp(x,r,l,alpha)$$

gdje je r faktor interpolacije, a broj koeficijenata korištenog filtra je $2 \cdot r \cdot l + 1$.

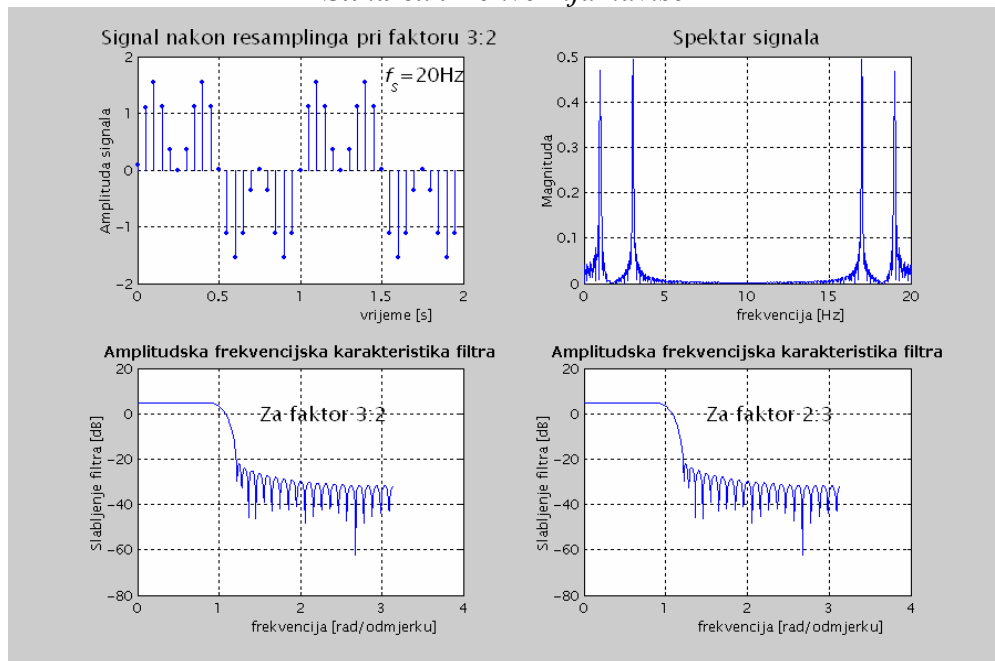
Nedostatak funkcija *interp* i *decimate* se ogleda u tome što je faktor konverzije $1:n$ odnosno $n:1$, pri čemu n mora biti cijeli broj. Međutim, primjenom jedne pa druge funkcije u kaskadi može se dobiti i konverzija sa faktorom koji je racionalan broj.

6.5. Primjer br. 4: Konverzija frekvencije odmjerenja sa faktorom p/q

Korištenjem funkcije resample možemo izvršiti upsampling i downsampling sa bilo kojim faktorom. Promjenom parametara p i q, odnosno p_2 i q_2 u m-fajlu *Primjer4.m* možemo mijenjati faktor konverzije proizvoljno. Nakon izvršavanja ovog programa dobijamo rezultat kao na Slikama 6.9. i 6.10. Filtri koje funkcija *resample* koristi u toku konverzije su isti kao kod funkcije *interp*, a njihove frekventne karakteristike su date na Slici 6.10.



Slika 6.9. Konverzija naviše

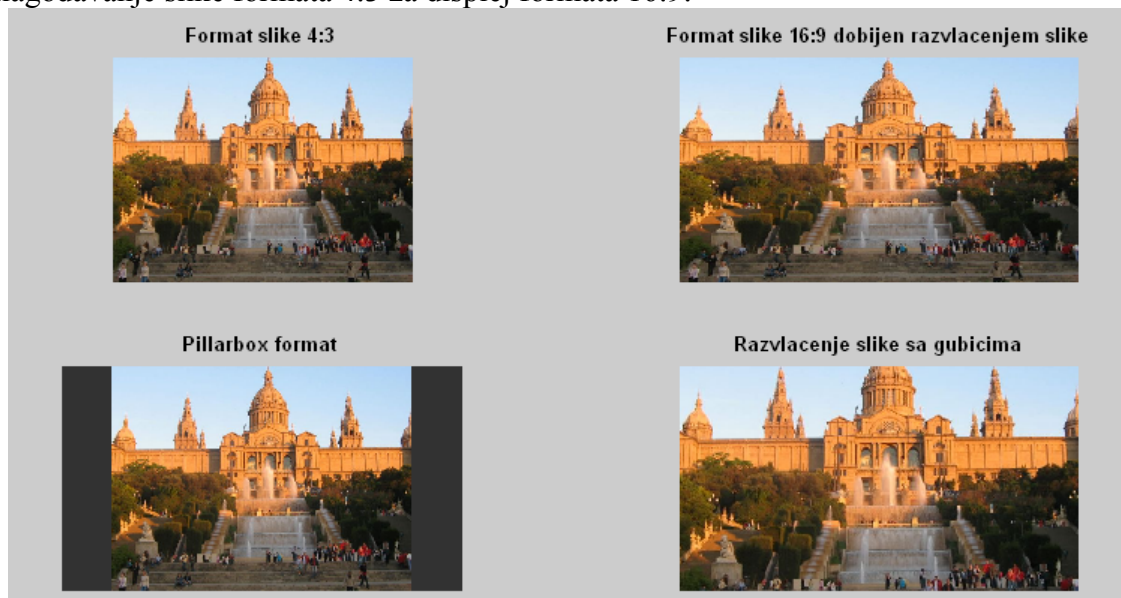


Slika 6.10. Rezultat konverzije naniže i karakteristike korištenih filtara

Funkcija resample omogućava rad i sa mnogo složenijim faktorima konverzije, kao što je na primjer konverzija zvuka iz 48kHz u 44.1kHz i obrnuto. Radi uštede u računanju p/q bi trebao biti prost razlomak, pa je u programu izvršeno njegovo skraćivanje ukoliko to nije slučaj. Podrazumijeva se da su p i q pozitivni cijeli brojevi.

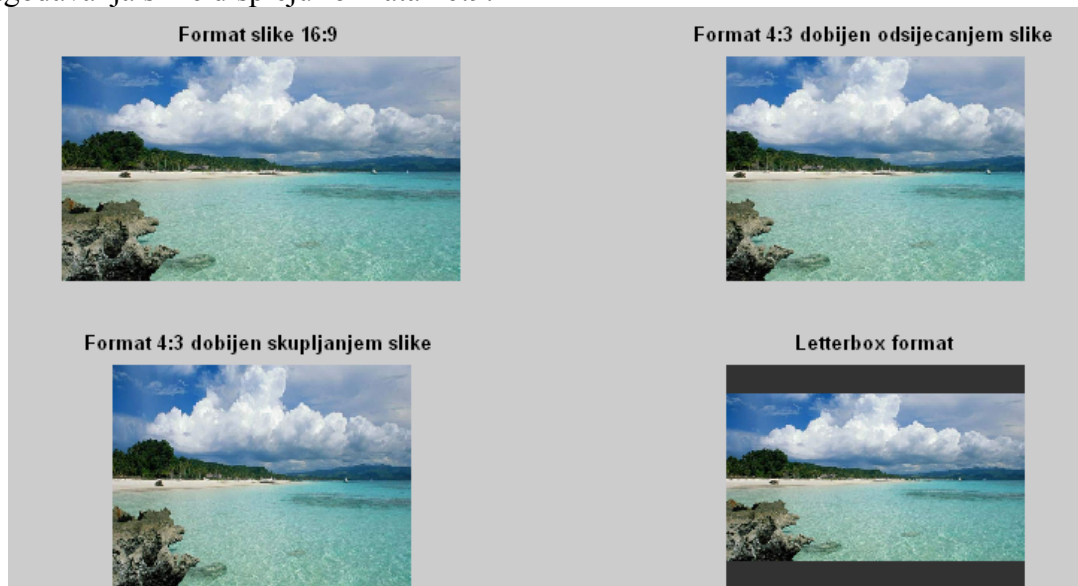
6.6. Primjer br. 5: Konverzija formata

Zbog postojanja različitih formata slike (4:3 i 16:9), i rezolucija (640×480, 1280×720, 1080×1920) često je potrebno izvršiti prilagođenje slike vrsti displeja. U prilogu je dat m-fajl pod nazivom *Primjer5.m* čijim se izvršavanjem ilustruje konverzija formata. Rezultat izvršavanja prvog dijela ovog programa je prikazan na Slici 6.8. Njegova funkcija je prilagođavanje slike formata 4:3 za displej formata 16:9.



Slika 6.8. Konverzija iz 4:3 u 16:9

Slika u gornjem desnom uglu je originalna slika a ostale tri su mogući načini prilagođavanja slike displeju formata 16:9.



Slika 6.9. Konverzija iz 16:9 u 4:3

Na slici 6.5., dat je obrnut postupak, koji je rezultat izvršavanja drugog dijela istog programa. Promjena dimenzija slike je izvršena funkcijom *imresize*, korištenjem dvodimenzionalne interpolacije "nearest" metodom, odnosno metodom najbližeg susjednog odmjerka.

6.7. Primjer br. 6: Dvodimenzionalna interpolacija

Prethodni primjer je realizovan korištenjem funkcije *imresize*. Ova funkcija vrši dvodimenzionalnu interpolaciju slike. U zavisnosti da li se koristi interpolacija na osnovu najbližeg susjednog odmjerka, bilinearna ili bikubna interpolacija dobićemo i različit kvalitet izlazne slike. Pošto računarski monitor nema mogućnosti da prikaže sliku dimenzija 1080×1920 u punoj rezoluciji, ilustraciju interpolacije višeg reda ćemo prikazati na slici nešto manje rezolucije. Veličina slike je proizvoljno odabrana da bi se uočile razlike pri interpolaciji.

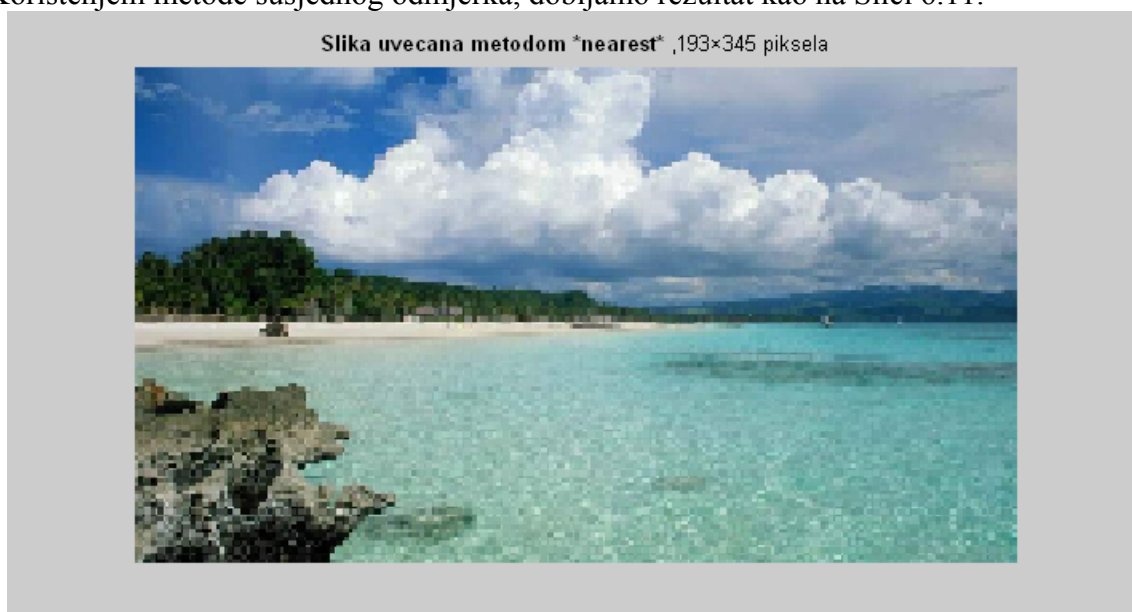


Slika 6.10. Originalna slika

Na Slici 6.10. je data originalna slika, koju ćemo uvećati korištenjem funkcije *imresize*, pri faktoru uvećanja $m = 1.5$ (kao iz 720×1280 u 1080×1920), i to različitim metodama interpolacije.

M-fajl koji izvršava uvećavanje slike sa različitim metodama je dat pod nazivom *Primjer6.m*.

Korištenjem metode susjednog odmjerka, dobijamo rezultat kao na Slici 6.11.



Slika 6.11. Slika uvećana metodom "nearest"

Korištenjem metoda *bilinear* i *bicubic* za uvećanje slike dobijamo rezultat kao na Slici 6.12. i 6.13.



Slika 6.12. Slika uvećana metodom "bilinear"



Slika 6.13. Slika uvećana metodom "bicubic"

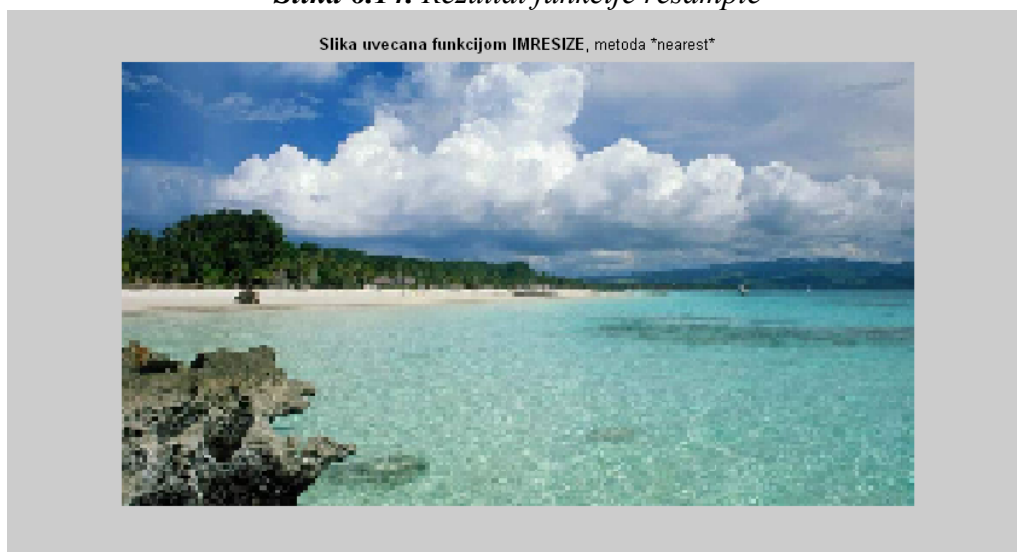
Kao što vidimo sa dobijenih slika, najlošije rezultate daje interpolacija metodom najbližeg susjednog odmjerka ili interpolacija nultog reda u 2D prostoru. Dosta bolje rezultate daju bilinearna i bikubna interpolacija (interpolacija prvog i drugog reda u 2D prostoru). Bikubna interpolacija daje nešto bolje rezultate od bilinearne ali razlike između njih nisu toliko velike. Bikubna interpolacija je pokazala dobre rezultate i kod primjene u deinterlacingu.

6.8. Primjer br. 7: 2D interpolacija pomoću funkcije resample

Interpolaciju slike možemo posmatrati i kao separabilnu operaciju. To znači da možemo izvršiti interpolaciju po kolonama, a zatim interpolaciju po vrstama slike. Ukoliko se radi o RGB slici, postupak radimo na svakoj komponenti slike. M-fajl *Primjer7.m* ilustruje ovakav način interpolacije, i sliku uvećanu korištenjem funkcije *imresize*.



Slika 6.14. Rezultat funkcije *resample*



Slika 6.15. Rezultat funkcije *imresize*

Može se primijetiti da filtriranje koje već sadrži funkcija *resample* izaziva pojavu takozvanog zvonjenja ili razlijevanja spektra. To se dešava kada kroz filter prolazi signal sa naglim skokovima u amplitudi. Ova pojava je izražena blizu ivica slike, i njeni efekti su veći što je veći red filtra koji se koristi. Iz tog razloga je potrebno sliku proširiti dodatnim odmjercima. Obično su dodatni odmjerci van ivica slike jednaki krajnjim odmjercima. Treba napomenuti da pri izboru filtra nultog reda kod funkcije *resample* (slučaj dat na slici), ova funkcija daje čak i bolje rezultate nego funkcija *imresize* sa metodom *nearest*, dok su rezultati približno jednaki kada se koristi metoda *bilinear* ili *bicubic*.

7. ZAKLJUČAK

Tokom nešto više od pola vijeka komercijalnog emitovanja televizije, malo je bilo promjena koje su uticale na njen rad toliko koliko prelaz sa analognih standarda na digitalne. Ova promjena je obezbijedila da televizijski sistem u cjelosti bude digitalan, počev od snimanja, obrade pa sve do isporuke signala krajnjem korisniku. Ovakav vid prenosa signala omogućava nove tipove usluga koje se mogu pružiti korisniku kao što su video-on-demand ili prenos različitih podataka. Mreže digitalne televizije sada postaju jedan od načina prenosa podataka koji podržava različite primjene.

Istovremeno, kod televizijskog emitovanja rastu zahtjevi za sve veći broj kanala, a broj usluga koje televizija omogućava takođe raste. U skladu s tim, oblast digitalnog emitovanja treba regulisati dugoročnim planom koji sadrži standarde, puteve razvoja i omogućava kompatibilnost sa prethodnim tehnologijama.

Ubrzan razvoj računarske i telekomunikacione industrije je doveo do toga da brzine prenosa podataka, kao i kapaciteti memorija za zapisivanje postanu dovoljno veliki i za digitalni video. Međutim, digitalizacija video materijala ne predstavlja samo jedan proces kao što je prebacivanje videa u digitalnu formu. Postizanje najboljeg mogućeg kvaliteta slike, boje, pokreta u slici i slično, zahtijeva razumijevanje određenih postupaka kao što su način dobijanja, kodovanja, obrade i prikaza slike. Cilj ovog rada je bio da ukaže na osnovne postupke koji se koriste u obradi slike u digitalnoj televiziji, sa osvrtom na postojeće standarde u toj oblasti.

Mogućnosti primjene Matlaba u oblasti digitalne obrade signala uopšte, kao i obrade slike su veoma velike. Analiza postupaka, proračun potrebnog vremena za obradu, kao i već ugrađene funkcije u njemu su veoma značajne za razvoj novih, poboljšanje starih rješenja i slično. Par ilustrativnih primjera u Matlabu korištenih ovom radu je pregled nekih osnovnih funkcija u obradi slike. Promjena frekvencije odmjerenja, na kojoj se ove operacije zasnivaju, takođe donosi određene prednosti u ovoj oblasti. Ovaj postupak omogućava

efikasnije filtriranje signala, i to u digitalnom domenu. Promjena dimenzija slike se takođe može posmatrati kao promjena frekvencije odmjeraavanja. Primjeri konverzije naviše i naniže u ovom radu su dati kako za slučaj jednodimenzionalnog signala, kao i za promjenu dimenzija slike. Međutim, u digitalnoj televiziji je nekad potrebno promijeniti frekvenciju osvježavanja, i taj postupak takođe podrazumijeva ove dvije konverzije. Isto tako, promjena formata slike je neophodna da bi prikazana slika bila što kvalitetnija. Svi ovi postupci se koriste pri konverziji između različitih standarda u digitalnoj televiziji.

Digitalna televizija predstavlja jednu novu tehnologiju koja se polako probija i na naše tržište. Kao i svaka nova tehnologija i ona nailazi na već uobičajene probleme kod uvođenja kao što su ekonomska isplativost, donošenje zakonske regulative koja će regulisati tu oblast i slično. Činjenica da je HDTV u sadašnjem trenutku predstavlja maksimum koji televizija uopšte može da pruži donekle predstavlja i ograničenje njenog uvođenja jer niko ne garantuje njen uspjeh na tržištu. Pa ipak postoje TV stanice koje su je već uvele, i uveliko je primjenjuju. Najveći komercijalni uspjeh HDTV i digitalna televizija uopšte ima pri emitovanju putem satelita i preko kablovskih operatera, kao i kroz formiranje specijalizovanih programskih paketa (sport, filmovi, muzika, vijesti itd.). Ovo je činjenica koju treba imati u vidu prilikom uvođenja ovakve vrste televizije na našem području.

Potpuni prelaz sa analognog na digitalni način emitovanja televizije je takođe jedna od značajnih stvari na koje treba obratiti pažnju kod uvođenja digitalnog emitovanja. Državne institucije koje upravljaju ovom oblasti trebale bi na neki način stimulisati TV stanice u cilju bržeg prelaza na novi način emitovanja, kao što su to pojedine države već uradile. Ne treba zaboraviti i na krajnje korisnike kojima treba omogućiti gledanje ovako emitovanog signala tv programa i na klasičnim tv prijemnicima, ukoliko se u potpunosti prestane sa analognim emitovanjem.

Integracija svih vrsta telekomunikacionih sistema, pa i televizije, u jedan jedinstven sistem predstavlja našu realnost. Moguće je da će u nekoj bližoj ili daljoj budućnosti korisnici moći putem samo jednog priključka, i korištenjem samo jednog univerzalnog pristupnog uređaja, ostvariti pristup svim vrstama telekomunikacionih usluga kao što su telefon, faks, internet, digitalna televizija, elektronska pošta, telekupovina, daljinsko upravljanje i da ne nabrajamo dalje. Na kraju krajeva, već postoje mobilni telefoni koji mogu da obavljaju takve funkcije.

Dalji razvoj televizije, odnosno HDTV, svakako nije zaustavljen. Inženjeri japanskog NHK instituta već rade na novim tehnologijama. Prošle godine su javnosti predstavili UHDTV (Ultra High Definition Video) odnosno Super Hi-Vision. Na platnu dimenzija 4×7 metara projektovana slika sa 4000 horizontalnih linija, što znači da se radi o 16 puta većoj rezoluciji u odnosu na HDTV. Za snimanje materijala dugog 18 minuta upotrebjeno je 16 HDTV snimača ukupnog kapaciteta 3.5 Tbyte (3500 Gb). Snimak vožnje po ulicama koji je prikazan je bio toliko realističan da su pojedini gledaoci iz publike osjetili mučninu nakon gledanja. Naravno, ovdje se radi o eksperimentalnoj tehnologiji koja iz očiglednih razloga još nema praktičnu primjenu.

8. Prilog

◆ Primjer1.m

```

close all
clear all
f1=1;          %   FREKVENCIJA OSNOVNE KOMPONENTE
f2=3;          %   FREKVENCIJA VISEG HARMONIKA
fs=30;         %   FREKVENCIJA ODMJERAVANJA
x=[0:1/fs:10]; %   VRIJEME
y=sin(2*pi*f1*x)+sin(2*pi*f2*x) ; %SIGNAL
x1=[0:0.01/fs:10];
y1=sin(2*pi*f1*x1)+sin(2*pi*f2*x1);
fmax=min(f1,f2);
T=find(x1<=2/fmax);
subplot(222)
plot(x1(T),y1(T))
grid on

title('Testni signal','FontSize',14)
xlabel('                                vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
text(1.55,1.25,['{\itf_1}=',num2str(f1),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.55,0.5,['{\itf_2}=',num2str(f2),'Hz'],'FontSize',14)

subplot(221)
axis off
text(0,0.9,'Testni signal:
{\itx(t)}={\itsin}(2\pi{\itf_1t})+{\itsin}(2\pi{\itf_2t})','FontSize',14)
text(-0.1,0.75,['Frekvencije komponenti: {\itf_1}= ',num2str(f1),'Hz ',
', '\itf_2}= ',num2str(f2),'Hz'],'FontSize',14)
text(-0.1,0.6,['Frekvencija odmjeravanja: {\itf_s} =
',num2str(fs),'Hz'],'FontSize',14)

subplot(223)
stem(x(1:2*fs),y(1:2*fs),'.')          %   IZGLED SIGNALA

title(['Odmjerci signala pri {\itf_s} = ',num2str(fs),'
Hz'],'FontSize',14)
xlabel('                                vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
grid on

w=fft(y,512);          %   RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
l=length(y);
Pyy = abs(w)/l;
fyy =fs*(0:511)/512;   %   NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE

subplot(224)
plot(fyy,Pyy(1:512))   %   IZGLED SPEKTRA

title('Spektar signala nakon odmjeravanja','FontSize',14)
xlabel('                                frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on
set(figure(1),'Position',[70 60 900 600],'Name','DECIMACIJA')

```

```

n=2;      % Faktor decimacije
%***** Realizacija filtra koristenog u funkciji decimate *****
redf=8;   % Red filtra
Apo=0.05; % Slabljenje u PO u dB
omega=0.8; % granicna frekvencija
[b,a]=cheby1(redf, Apo,omega/n);
[h w]=freqz(b,a);

figure
subplot(221)
plot(w,10*log10(abs(h)))

axis([0 3.5 -150 10])
title('Frekvencijska karakteristika pred filtra','FontSize',14)
xlabel('          frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Slabljenje filtra [dB]')
text(0.2, -50,'Digitalni Chebishev NF filter I tipa','FontSize',14)
text(0.2,-75,['Red filtra: N = ',num2str(redf)],'FontSize',14)
text(0.2,-100,['{\bf{\omega}}_c= ',num2str(omega/n),'{\pi}','
rad/odmjerku'],'FontSize',14)
text(0.2,-125,['A_p_o = ',num2str(Apo),'dB'],'FontSize',14)

grid on

c=filtfilt(b,a,y);
subplot(222)
stem(x(1:2*fs),c(1:2*fs),'.')
title('Signal nakon filtriranja','FontSize',14)
xlabel('          vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
grid on

z=decimate(y,n);
xl=10*[0.5:1:length(z)-0.5]/length(z);

subplot(223)
stem(xl(1:fs),z(1:fs),'.')
xlabel('          vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
title(['Signal nakon decimacije pri n = ',int2str(n)],'FontSize',14)
text(1.52,1.25,['{\itf_s}= ',num2str(fs/n),'Hz'],'FontSize',14)
grid on

w1=fft(z,512);          % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
L1=length(z);
Pyy1 = abs(fft(z))/L1;
Pyy1=[Pyy1,Pyy1];

subplot(224)
plot([1:length(Pyy1)]*fs/(length(Pyy1)),Pyy1)

title('Spektar signala nakon decimacije','FontSize',14)
xlabel('          frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on
set(figure(2),'Position',[70 60 900 600],'Name','DECIMACIJA')

```

◆ *Primjer2.m*

```

clear all
close all
f1=1;           % FREKVENCIJA OSNOVNE KOMPONENTE
f2=3;           % FREKVENCIJA VISEG HARMONIKA
fs=15;         % FREKVENCIJA ODMJERAVANJA

x=[0:1/fs:10]; % VRIJEME
y=sin(2*pi*f1*x)+sin(2*pi*f2*x) ; %SIGNAL

Pin = abs(fft(y))/length(y); % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
fin =fs*(0:255)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE

x1=[0:1/fs:10];
y1=sin(2*pi*f1*x1)+sin(2*pi*f2*x1) ; %ODMJERENI SIGNAL
subplot(221)
stem(x1(1:2*fs),y1(1:2*fs),'.') % IZGLED SIGNALA
title('Odmjerci signala
{\itx(t)}=sin(2\pi{\itf_1t})+sin(2\pi{\itf_2t}','FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
text(1.55,1.55,['{\itf_s}=',num2str(fs),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.55,1.05,['{\itf_1}=',num2str(f1),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.55,0.5,['{\itf_2}=',num2str(f2),'Hz'],'FontSize',14)
grid on
grid on

w=fft(y1,512); % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pyy = abs(w)/length(y1);
fyy =fs*(0:511)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE
subplot(222)
plot(fyy,Pyy(1:512)) % IZGLED SPEKTRA DIGITALNOG SIGNALA
title('Spektar signala nakon odmjeravanja','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on
set(figure(1),'Position',[70 60 900 600],'Name','INTERPOLACIJA KAO
FILTRIRANJE')
% *****Interpolacija nultih odmjeraka*****
% Sa 'n' mijenjamo faktor konverzije,
% n=1=> konverzija navise 1:2
% n=2=> konverzija 1:3
% povecavamo frekvenciju odmjeravanja (n+1)puta
n=1;
k=length(y1);
y2(1:(n+1)*(k-1))=0;
y2(1)=y1(1);
for i=2:k
    y2((n+1)*(i-1)+1)=y1(i);
end

subplot(223)
stem(x1(1:4*fs)/(n+1),y2(1:4*fs),'.')
title('Signal nakon ubacivanja nultih odmjeraka','FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')

```

```

ylabel('Amplituda signala')
grid on

w1=fft(y2,512);           %   RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA NAKON
INTERPOLACIJE

Pyy1 = abs(w1)/length(y2);
fyy1=(n+1)*fs*[1:512]/512;
subplot(224)
plot(fyy1,Pyy1(1:512))    %   IZGLEDED SPEKTRA DISKRETNOG SIGNALA
title('Spektar signala','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

%***** Filtriranje FIR filtrom*****
red=3; %   Red filtra
Wn=0.8/(n+1); %   Granicna frekvencija digitalnog filtra, 0<Wn<1,
                %   pri cemu Wn=1 odgovara polovini frekvencije odmjeravanja
Ap=0.05;
[b a]=cheby1(red,Ap,Wn);
[h w]=freqz(b,a);
figure
set(figure(2),'Position',[70 60 900 600],'Name','INTERPOLACIJA KAO
FILTRIRANJE')
subplot(221)
plot(w,abs(h))
axis([0 3.5 0 1])
title('Frekvencijska karakteristika filtra','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Magnituda')
grid on
subplot(222)
axis off
text(-0.2, 0.9,'Tip filtra: Digitalni Chebishev NF filter I
tipa','FontSize',14)
text(-0.2,0.75,['Red filtra: N = ',num2str(red)],'FontSize',14)
text(0.05,0.6,['{\bf{\omega}_c}= ',num2str(Wn),'{\pi}','
rad/odmjerku'],'FontSize',14)
text(0.05,0.45,['A_p_o = ',num2str(Ap),'dB'],'FontSize',14)

y21=2*y2;
y3=filtfilt(b,a,y21);
%y3=y3*max(y)/max(y3);
subplot(223)
stem(x1(1:2*fs),y3(1:2*fs),'.')
title('Signal nakon filtriranja','FontSize',14)
xlabel('                vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
% text(1.51,1.55,['{itf_s}=',num2str((n+1)*fs),'Hz'],'FontSize',14)
grid on
w2=abs(fft(y3,512))/length(y3);

subplot(224)
plot(fyy1,w2)
title('Spektar signala nakon filtriranja','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

```

```

r=n+1;
n_l=7; % red Lagranzovog polinoma
b_l=intfilt(r,n_l,'Lagrange');
[h_l,w_l]=freqz(b_l,1);

y_l=filter(b_l,1,y2);

figure
set(figure(3),'Position',[70 60 900 600],'Name','LAGRANZOVA
INTERPOLACIJA')

subplot(221)
plot(w_l,abs(h_l))
axis([0 3.5 0 2.2])
title('Frekvencijska karakteristika Lagranzovog filtra','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Magnituda')
grid on

subplot(222)
axis off
title('KARAKTERISTIKE FILTRA','FontSize',14)
text(-0.2, 0.9,'FIR NF filter sa linearnom fazom','FontSize',14)
text(-0.2, 0.75,'                za Lagranzovu
interpolaciju','FontSize',14)
text(-0.2,0.6,['Zahtjevi: Faktor interpolacije R =
',num2str(r)],'FontSize',14)
text(-0.2,0.45,['Stepen Lagranzovog polinoma N =
',num2str(n_l)],'FontSize',14)
text(-0.2,0.3,'Napomena: Ulazni signal za ovaj filter mora da
sadrzi','FontSize',12)
text(-0.2,0.2,'nulte odmjerke u vremenskim trenucima u kojim
','FontSize',12)
text(-0.2,0.1,'je potrebno interpolirati signal','FontSize',12)

% plot(w_l,angle(h_l))
% title('Fazna karakteristika Lagranzovog filtra','FontSize',14)
% xlabel('                frekvencija [Hz]')
% ylabel('Fazno kasnjenje filtra [rad]')
% grid on

subplot(223)
stem(xl(1:2*fs+n_l),y_l(1:2*fs+n_l),'.')
title('Signal nakon filtriranja','FontSize',14)
xlabel('                vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
grid on

P_l=abs(fft(y_l,512))/length(y_l);
subplot(224)
plot(fyy1,P_l(1:512))
title('Spektar signala nakon filtriranja','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

```

♦ *Primjer3.m*

```

clear all
close all
f1=1;           % FREKVENCIJA OSNOVNE KOMPONENTE
f2=3;           % FREKVENCIJA VISEG HARMONIKA
fs=15;          % FREKVENCIJA ODMJERAVANJA

x=[0:1/fs:10]; % VRIJEME
y=sin(2*pi*f1*x)+sin(2*pi*f2*x) ; %SIGNAL

% RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pin = abs(fft(y,512))/length(y);
fin =fs*(0:255)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE

y1=sin(2*pi*f1*x)+sin(2*pi*f2*x) ; %ODMJERENI SIGNAL
subplot(221)
stem(x(1:2*fs),y1(1:2*fs),'.') % IZGLED SIGNALA
title('Odmjerci signala','FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
text(1.52,1.6,['\itf_s','=',num2str(fs),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.52,1.15,['\itf_1','=',num2str(f1),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.52,0.5,['\itf_2','=',num2str(f2),'Hz'],'FontSize',14)
ylabel('Amplituda')
grid on

% RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pyy =abs(fft(y1,512))/length(y1);
fyy =fs*(0:511)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE
subplot(222)
plot(fyy,Pyy(1:512)) % IZGLED SPEKTRA DISKRETNOG SIGNALA
title('Spektar signala nakon odmjeravanja','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')

grid on

n=2;
p=n;
q=1;
l=4; %%DUZINA FILTRA
alpha=0.5; %FREKVENCIJA ODSIJEKANJA
[z,b]=interp(y1,n,l,alpha);
x2=[0:1/(n*fs):10];
subplot(223)
stem(x2(1:4*fs),z(1:4*fs),'.')
title(['Signal nakon interpolacije pri n = ',int2str(n)],'FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda')
text(1.51,1.55,['\itf_s','=',num2str(fs*n),'Hz'],'FontSize',14)

grid on

% RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pyy1 = abs(fft(z,512))/length(z);

fyy1 =(p/q)*(0:511+(ceil(q/p)-1)*512)/512; % NORMALIZOVANJE
FREKVENCIJE + periodicnost spektra
for i=0:ceil(q/p)-1
    Pyy2(512*i+1:512*(i+1))=Pyy1;
end

```

```

a=find(fyy1<=2);
subplot(224)
plot(fs*fyy1(a),Pyy2(a))
title('Spektar signala nakon interpolacije','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')

grid on
set(figure(1),'Position',[70 60 900 600],'Name','Interpolacija
koristenjem f-je INTERP')

figure
set(figure(2),'Position',[70 60 900 600],'Name','Interpolacija
koristenjem f-je INTERP')
[h w]=freqz(b,1);
subplot(221)
plot(w,10*log10(abs(h)))
title('Frekvencijska karakteristika filtra','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('slabljenje filtra [dB]')
grid on

subplot(222)
axis off
title('KARAKTERISTIKE FILTRA','FontSize',14)
text(-0.2,0.9,'Simetricni filter sa linearnom fazom,
dobijen','FontSize',14)
text(-0.2,0.75,'metodom minimizacije srednjekvadratne
greske','FontSize',14)
text(-0.2,0.6,['Duzina filtra L =',num2str(1)],'FontSize',14)
text(-0.2,0.45,['Frekvencija odsijecanja {\alpha}=
',num2str(alpha)],'FontSize',14)
text(-0.2,0.3,'Napomena: Filter je realizovan u okviru funkcije interp
','FontSize',12)
text(-0.2,0.2,'i prilikom interpolacije je moguće
mijenjati','FontSize',12)
text(-0.2,0.1,'samo njegovu duzinu i frekvenciju
odsijecanja','FontSize',12)

subplot(223)
plot(w,angle(h))
title('Fazna karakteristika filtra','FontSize',14)
xlabel('                frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Fazno kasnjenje filtra [rad]')
grid on

```

◆ *Primjer4.m*

```

clear all
close all
f1=1;           % FREKVENCIJA OSNOVNE KOMPONENTE
f2=3;           % FREKVENCIJA VISEG HARMONIKA
fs=30;         % FREKVENCIJA ODMJERAVANJA
x=[0:1/fs:10]; % VRIJEME
y=sin(2*pi*f1*x)+sin(2*pi*f2*x) ; %SIGNAL

win=fft(y,512); % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pin = win.*conj(win);
fin =fs*(0:255)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE
set(figure(1),'Position',[70 60 900 600],'Name','Primjer br.4')

```

```

subplot(221)
stem(x(1:2*fs),y(1:2*fs),'.') % IZGLED SIGNALA
title('Odmjeri signala','FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
text(1.52,1.6,['{\itf_s}=',num2str(fs),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.52,1.15,['{\itf_1}=',num2str(f1),'Hz'],'FontSize',14)
text(1.52,0.5,['{\itf_2}=',num2str(f2),'Hz'],'FontSize',14)
grid on

%w=fft(y,512); % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pyy = abs(fft(y,512))/length(y);%w.*conj(w);
fyy =fs*(0:511)/512; % NORMALIZOVANJE FREKVENCIJE
subplot(222)
plot(fyy,Pyy(1:512)) % IZGLED SPEKTRA
title('Spektar signala nakon odmjeravanja','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

p=3;
q=2;
d=gcd(p,q); % Ako p/q nije prost razlomak, skratimo ga
p=p/d;
q=q/d;

[z,b]=resample(y,p,q);
fs1=(p/q)*fs;
x1=[0:1/fs1:10];
subplot(223)
stem(x1(1:2*fs1),z(1:2*fs1),'.')
title(['Signal nakon resamplinga pri faktoru
',int2str(q),':',int2str(p)],'FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
text(1.52,1.6,['{\itf_s}=',num2str(fs*p/q),'Hz'],'FontSize',14)
grid on
wz=fft(z,512); % RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA
Pyy1=abs(fft(z,512))/length(z);
fyy1 =fs*(p/q)*(0:511+(ceil(q/p)-1)*512)/512; % NORMALIZOVANJE
FREKVENCIJE + periodičnost spektra
for i=0:ceil(q/p)-1
    Pyy2(512*i+1:512*(i+1))=Pyy1;
end
a=find(fyy1<=fs*(p/q));
subplot(224)
plot(fyy1(a),Pyy2(a))
title('Spektar signala','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

figure
set(figure(2),'Position',[70 60 900 600],'Name','Primjer br.4')

p2=2;
q2=3;

d2=gcd(p2,q2);

```



```

p2=p2/d2;
q2=q2/d2;
[z2,b2]=resample(y,p2,q2);
fs2=(p2/q2)*fs;
x2=[0:1/fs2:10];
subplot(221)
stem(x2(1:2*fs2),z2(1:2*fs2),'.')
title(['Signal nakon resamplinga pri faktoru
',int2str(q2),':' ,int2str(p2)],'FontSize',14)
xlabel('vrijeme [s]')
ylabel('Amplituda signala')
text(1.52,1.6,['{\itf_s}=',num2str(fs2),'Hz'],'FontSize',14)
grid on

% RACUNANJE SPEKTRA SIGNALA

Pyy3 = abs(fft(z2,512))/length(z2);%
fyy2 = fs*(p2/q2)*(0:511+(ceil(q2/p2)-1)*512)/512; % NORMALIZOVANJE
FREKVENCIJE + periodicnost spektra
for i=0:ceil(q2/p2)-1
    Pyy3(512*i+1:512*(i+1))=Pyy3;
end
a=find(fyy2<=fs*(p2/q2));
subplot(222)
plot(fyy2,Pyy3)
title('Spektar signala','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [Hz]')
ylabel('Magnituda')
grid on

[h w]=freqz(b,1);
subplot(223)
plot(w,10*log10(abs(h)))
title('Frekvencijska karakteristika filtra','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Slabljenje filtra [dB]')
text(1.5,0,['Za faktor ',int2str(p),':' ,int2str(q)],'FontSize',14)
grid on

[h2 w2]=freqz(b2,1);
subplot(224)
plot(w2,10*log10(abs(h)))
title('Frekvencijska karakteristika filtra','FontSize',14)
xlabel('frekvencija [rad/odmjerku]')
ylabel('Slabljenje filtra [dB]')
text(1.5,0,['Za faktor ',int2str(p2),':' ,int2str(q2)],'FontSize',14)
grid on

```

◆ *Primjer5.m*

```

close all
clear all
x=imread('640x480.jpg');
y=imresize(x,0.5);
[a b c]=size(x);
d=gcd(a,b);
f1=a/d;
f2=b/d;
subplot(221)
imshow(y)
title(['{\bfFormat slike }','{\bf', int2str(f2) ':' int2str(f1),'}'])

```

```

x1=imresize(x,[d*3,d*16/3]);
y1=imresize(x1,0.5);
subplot(222)
imshow(y1)
title('\bfFormat slike 16:9 dobijen razvlacenjem slike')

[a1 b1 c1]=size(x1);
k=floor((b1-b)/2);
x2(1:a1,b+1:b1,1:c)=uint8(50);
x2(1:a1,1:k,1:c)=uint8(50);
x2(1:a,k:b+k-1,1:c)=x;
y2=imresize(x2,0.5);
subplot(223)
imshow(x2)
title('\bfPillarbox format')
a3=floor(b*9/16);
b3=b;
k3=round((a-a3)/2);
x3(1:a3,1:b3,1:c)=x(k3+1:a-k3,1:b3,1:c);
y3=imresize(x3,0.5);
subplot(224)
imshow(y3)
title('\bfRazvlacenje slike sa gubicima')
set(figure(1),'Position',[40 200 900 600])
trueSize([150 300])

a=imread('1280x720a.jpg');
b=imresize(a,0.5);
figure
subplot(221)
imshow(b)
title('\bfFormat slike 16:9')
[p,q,r]=size(a);
d1=gcd(p,q); % q/d:p/d=16:9
p1=9*d1;
q1=12*d1;
k4=round((q-q1)/2);
a11(1:p1,1:q1,1:r)=a(1:p,k4+1:q-k4,1:c);
b11=uint8(imresize(a11,0.5));
subplot(222)
imshow(b11)
title('\bfFormat 4:3 dobijen odsijecanjem slike')
set(figure(2),'Position',[40 200 900 600])
trueSize([150 300])
[p2 q2 r2]=size(a11);
a31=imresize(a,[p2,q2]);
b31=imresize(a31,0.5);
subplot(223)
imshow(b31)
title('\bfFormat 4:3 dobijen skupljanjem slike')

a32=imresize(a,960/1280);
a33(1:p2,1:q2,1:r2)=uint8(50);
[i j l]=size(a32);
k5=round((p2-i)/2);
a33(k5+1:p2-k5,1:q2,1:r2)=a32;
a34=imresize(a33,0.5);
subplot(224)
imshow(a34)
title('\bfLetterbox format')

```

◆ *Primjer6.m*

```

close all
clear all
x=imread('1280x720a.jpg');
x1=imresize(x,0.18);
p=1.6;
[m1,n1,c]=size(x1);
imshow(x1)
title(['\bfOriginalna slika ,}',int2str(m1),'x',int2str(n1),'
piksela'])
truesize(p*[m1 n1])
pause

x2=imresize(x1,1.5,'nearest');
[m2,n2,c]=size(x2);
yc=imresize(x,[m2 n2]); %Kontrolna slika
x3=imresize(x1,1.5,'bilinear');
x4=imresize(x1,1.5,'bicubic');

pause
figure
imshow(x2)
title(['\bfSlika uvecana metodom *nearest*
}',int2str(m2),'x',int2str(n2),' piksela'])

truesize(p*[m2,n2])
pause

figure
imshow(x3)
title(['\bfSlika uvecana metodom *bilinear*}
,int2str(m2),'x',int2str(n2),' piksela'])
truesize(p*[m2,n2])
pause
figure
imshow(x4)
title(['\bfSlika uvecana metodom *bicubic*}
,int2str(m2),'x',int2str(n2),' piksela'])
truesize(p*[m2,n2])
pause

```

◆ *Primjer7.m*

```

close all
clear all
x=imread('1280x720a.jpg');
x1=imresize(x,0.18);
% 'x1' nam je polazna slika
p=1.9 ;
pl=3;
ql=2;
[m1,n1,c]=size(x1);
subplot(221)
imshow(x1)
title(['\bfOriginalna slika}, ', int2str(n1),'x',int2str(m1),
'piksela'])
truesize(p*[m1 n1])
for i=1:3

```

```
x2=x1(:, :, i);
x3=double(x2);
% Funkcija resample radi samo sa varijablama klase 'double precision'
Nr=2;
% Nr predstavlja red filtra koji se koristi pri jednodimenzionalnom
resamplingu
% Nr=0 je ekvivalentan nearest metodi
y1=resample(x3,p1,q1,Nr);
% Resample u ovakvom obliku vrši interpolaciju po kolonama pa nije
potrebna petlja
% za prolaz citave slike
y2=y1';
% Transponujemo matricu slike da bi vrste postale kolone
% a zatim opet radimo resampling
y3=resample(y2,p1,q1,Nr);
y=y3';
% Ponovnim transponovanjem vraćamo vrste na normalnu poziciju.
y=uint8(y);
% Za prikaz grayscale slike, potrebno je da vrijednosti matrice slike
budu klase
% uint8 kao i početna slika
yizl(:, :, i)=y;
end
met=['nearest']; % Metoda koja se koristi kod imresize, jedna od:
nearest(default), bilinear, bicubic
z=imresize(x1,p1/q1,met,0);
figure
[m3,n3,s]=size(yizl);
imshow(yizl)
true_size(p*[m3,n3])
title('\bfSlika uvecana funkcijom RESAMPLE')
figure
z=imresize(x1,p1/q1,met,0);
imshow(z)
true_size(p*[m3,n3])
title(['\bfSlika uvecana funkcijom IMRESIZE', metoda '*',met, '*'])
```

9. Literatura

- [1] Digital Video and HDTV, Algorithms and Interfaces
- Charles Poynton, (San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2003)
- [2] <http://en.wikipedia.org/>
- [3] <http://www.howstuffworks.com/>
- [4] <http://www.hdtvpub.com/>
- [5] <http://www.hifi.co.yu/>
- [6] <http://www.avdeals.ca/>
- [7] <http://www.kombib.co.yu/>
- [8] ITU-R BT.601
- [9] ITU-R BT.709
- [10] <http://www.pulsdemokratije.net/>
- [11] <http://www.telekobra.org.yu/rtv/MMDS.htm>
- [12] <http://www.cra.ba/>
- [13] MATLAB Help

** Napomena: Internet stranicama je pristupano u periodu od 24.07.2006. do 19.11.2006. Sve korištene Internet stranice dostupne su na kompakt disku koji se nalazi uz rad.