Mr Branislav Todorović,
dipl. inž.

Dr Milan Šunjevarić,
pukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

PRINCIPI TELEVIZIJE

UDC: 621.327.13.001

Rezime:

U ovom radu razmatrani su principi prenosa nepokretne i pokretne slike (faksimil i televizija), analiziran je televizijski signal u vremenskom i frekvencijskom domenu, a zatim su obrađeni principi kolorimetrije. Ukratko su prikazani osnovni televizijski sistemi za prenos slike u boji (NTSC, PAL i SECAM), kao i različite vrste televizijskog prenosa (radio-difuzni, kablovski, satelitski).

Ključne reči: televizija, televizija u boji, vrste televizijskog prenosa.

TELEVISION PRINCIPLES

Summary:

The principles of image transmission (fax) and television are discussed and the analysis of the TV signal in time and frequency domain is followed by colorimetry principles. The basic color TV systems (NTSC, PAL and SECAM) are briefly presented as well as different types of TV transmission (radio broadcasting, cable, satellite).

Key words: television, color television, types of TV transmission.

Uvod

Prenos slike (nepokretne ili pokretne) na daljinu predstavlja važan faktor efikasnog rada, učenja i zabave savremenog čoveka.

Prvi prenos pokretne crno-bele slike izvršen je 1927. godine između Njujorka i Vašingtona. Pri prenosu crno-bele slike prenosi se samo informacija o osvetljaju. Raspoznavanje pojedinih detalja po osvetljaju je moguće, jer postoji razlika u količini svetlosti koja se od njih reflektuje ka posmatraču: svetliji detalji reflektuju veću količinu svetlosti, a tamniji manju. Informaciju o različitim vrednostima osvetljaja čovečije oko vidi kao nijanse sivog u crno-belom slici.

Televizija je prenošenje informacije o pokretnoj slici sa jednog mesta na drugo putem elektromagnetskih talasa ili kablovskom vezom. Ova reč je kovanica grčke reči *τηλε* (daleko, na daljinu) i latinske reči *visio* (viđenje, gledanje). Eksperimentalno emitovanje crno-belog televizijskog programa počelo je krajem dvadesetih godina u Sjedinjenim Američkim Državama (1927. godine General Electric Company — GEC i 1928. godine Radio Corporation of America — RCA). Sve do Drugog svetskog rata u SAD je emitovan televizijski signal sa 441 analizatorskom linijom i 60 poluslika u sekundi. U Velikoj Britaniji je korišćen sistem sa 405 linija i 50 poluslika. Novi američki standard sa 525 linija, koji

je i do danas zadržan, usvojen je početkom 1941. godine. U Velikoj Britaniji se sistem sa 405 linija zadržao i jedno vreme posle Drugog svetskog rata, dok je u Francuskoj dugo korišćen sistem sa 819 linija. Ostale evropske zemlje, koje su kasnije prišle uvođenju televizije, prihvatile su odmah sistem sa 625 linija i 50 poluslika. Kod televizije visoke rezolucije (High Definition Television — HDTV) najčešće se koristi 2000 linija.

Da bi se ostvario prenos slike u boji na daljinu potrebno je, pored informacije o osvetljaju, prenositi i informacije o boji i njenom zasićenju. Prvi prenos televizijske slike u boji realizovao je američki istraživač P. Goldmark iz firme CBS 1940. godine, a prenos televizijske slike u boji, koji je bio kompatibilan sa postojećom crno-belom televizijom, izvršen je 1946. godine u američkoj kompaniji RCA. Narednih nekoliko godina obeležava intenzivan rad na razvoju i eksperimentalnoj proverbi više televizijskih sistema za prenos slike u boji. Konačno, 1953. godine američki Nacionalni komitet za televizijski sistem usvojio je sistem televizije koji se i danas koristi u SAD pod imenom NTSC. Krajem pedesetih i početkom šezdesetih godina u Evropi su razvijena dva nova sistema: PAL i SECAM.

Ovaj rad predstavlja pokušaj da se na sažet, ali sveobuhvatan, način širok krug čitalaca upozna sa principima televizije.

Prenos slike

Optičko-električnom analizom slike stvara se signal slike čiji vremenski oblik i spektar zavise kako od same slike, tako i od postupka analize. Nepokretne, »mirne« slike obično se prenose relativno sporim postupkom fototelegrafije, a pokretne, »žive« slike prenose se brzim televizijskim postupcima. Prenos pokretnih, ali relativno sporopromenljivih videotelefonskih sli-

ka je posebna grana televizijske tehnike. U zavisnosti od tehnike prenosa, signalu slike se dodaju odgovarajući signali za sinhronizaciju koji sačinjavaju video-signal.

Prenos nepokretne slike

Posebna tehnika u telekomunikacijama, koja služi za prenos nepokretne slike, naziva se fototelegrafija ili faksimil. Zasniva se na principu da se bilo kakva slika može unapred zadatom tačnošću predstaviti kao skup diskretnih elementarnih površina. Jedan element slike naziva se piksel ili pel (engl. picture element). Kada se gustina piksela povećava iznad određene granice, vizuelni sistem prestaje da ih vidi kao odvojene elemente. Svaki element slike ima konstantnu nijansu boje u spektru i konstantan osvetljaj od belog preko sivog do crnog. Apsorpciona moć ovakvih površina je različita: jedni će više, a drugi manje reflektovati svetlost kojom su osvetljeni. Pomoću optičko-električnog pretvarača na predajnoj strani vrši se konverzija reflektovane svetlosti u električni signal. Na prijemnoj strani, pomoću električno-optičkog pretvarača, vrši se konverzija električnog signala u osvetljaj.

Na slici 1 šematski je prikazan princip fototelegrafije kada se prenosi crno-bela slika.

Slika koju treba preneti obmota se oko valjka D_T koji je smešten u tamnu komoru. Kroz jedan mali otvor, pomoću sistema sočiva L_1 , usmerava se snop svetlosti sijalice S na sliku. Intenzitet svetlosnog snopa je impulsnog oblika i prikazan je na slici 1a. Valjak D_T ima dvostruko kretanje: okreće se oko svoje ose i istovremeno se pomera aksijalno naviše. Na taj način svetlosni snop na njemu ispisuje helikoidu. Od svakog elementa slike koji je impulsno osvetljen reflektuje se određeni deo svetlosnog snopa. Njegov intenzitet je srazmeran moći refleksije osvetljene elementarne povr-

šine. Reflektovana svetlost se sistemom sočiva L_2 usmerava na optičko-električni pretvarač, fotočeliju F. Struja na izlazu iz fotočelije srazmerna je intenzitetu reflektovane svetlosti, i prikazana je na slici 1b. Ovaj signal se pojačava, filtrira, a zatim šalje na liniju veze. Na mestu prijema signal se filtrira, pojačava i detektuje. Talasni oblik napona detektovanog signala prikazan je na

la. Što je broj elementarnih površina veći, reprodukcija je bolja. Smatra se da je reprodukcija zadovoljavajućeg kvaliteta ukoliko snop svetlosti prilikom analize slike opiše između 20 i 40 linija po cm.

Standardni prečnik fototelegrafskog valjka je $D = 88 \text{ mm}$, a standardni broj obrtaja valjka je $n = 150 \text{ ob/min}$. U ovom slučaju ekvivalentna »li-

Sl. 1 — Princip fototelegrafije

slici 1c. Ovaj signal napaja gasnu sijalicu GS. Intenzitet svetlosti koju ona daje srazmeran je detektovanom naponu. Sistemom sočiva L_3 osvetljava se fotografska hartija i na taj način dobija prenošena slika. Ovako dobijena slika predstavlja negativ. Standardnim fotografskim postupkom može se dobiti pozitiv.

Može se zaključiti da preneti slika nije potpuno verna kopija origina-

lnijska učestanost» helikoide iznosi $f_1 = n/60 = 2,5 \text{ Hz}$. Ako analizatorski mlaz ima prečnik od oko $0,2 \text{ mm}$, onda fototelegrafski signal približno zauzima sledeći frekvencijski opseg:

$$B_{ft} = (1 \text{ do } 1800) \text{ Hz} \quad (1)$$

Prema tome, na osnovu prethodnog izraza može se zaključiti da se fototelegrafski signal može prenositi kroz jedan standardni telefonski kanal.

Prenos pokretne slike

Razumevanje osnovnog principa prenosa nepokretne crno-bele slike omogućava razumevanje postupaka koji se koriste u prenosu pokretne slike. Drugi bitan faktor za razumevanje prenosa pokretne crno-bele slike je postojanje efekta perzistencije viđenja. Naime, kada oko primi neki svetlosni impuls, on se optičkim nervom dovede do mozga i čovek postaje svestan onoga što se desilo. Po prekidu trajanja impulsa, ovaj utisak o prisutnosti svetla postoji još približno $1/24$ s. Zahvaljujući ovoj inerciji, stvorena je mogućnost za razvoj prenosa pokretne slike — filma i televizije. Ako se u intervalu koji je kraći ili jednak $1/24$ s pojavi nova slika, i tako redom, svi ti pojedinačni utisci se spajaju u jedan utisak, kao da se gleda »živa« scena.

Prvi filmovi koji su nastali pre skoro jednog veka realizovani su sa 24 slike u sekundi. Svetlost koja je služila za projektovanje osvetljavala je u vrlo kratkom vremenskom intervalu svaku sliku po jednom, a zatim se gasila sve do pojave nove slike. Na ovim filmovima zapažen je efekat treperenja koji se ogleda u neprekidnoj fluktuaciji intenziteta reflektovane svetlosti sa platna. Naime, utisak o prisustvu svetlosti je najjači u trenutku osvetljavanja slike, a zatim vremenom opada. Sledeća projektovana slika stvara utisak jačeg osvetljaja. Usled toga gledalac ima utisak da slika treperi. Ova pojava ne smeta stvaranju utiska o odvijanju »žive« scene, ali nije prijatna za gledaoca. Taj efekat je u filmu jednostavno rešen tako što se svaka slika osvetli dva puta. Drugim rečima, svetlost se prekida 2 puta po slici, odnosno 48 puta u sekundi.

Ova osobina ljudskog oka omogućila je iznalaženje praktičnih rešenja za televiziju. Usvojeno je da se pred očima gledalaca pojavi ukupno 25 slika u sekundi. Pored toga, uočeno je da je zahvaljujući inerciji oka sasvim svejedno da li se pojavi svaka slika kao

celina ili se svaka od njih postepeno iscrtava linija po linija, ali tako da ima ukupno 25 slika u sekundi. Oko neće primetiti razliku. Drugim rečima, ako se ubrza fototelegrafija, stvorena je principijelna mogućnost za prenos pokretne slike. Da bi slika bila dovoljno fina, smatra se da je potrebno da se raščlani na oko 400 000 elementarnih površina. Pod uslovom da ima ukupno 25 slika u sekundi potrebno je preneti 10 000 000 različitih osvetljaja u sekundi. Tako veliku brzinu prenosa omogućio je razvoj savremene tehnologije.

Postupak prenosa pokretne slike lakše je objasniti ukoliko se krene od sinteze slike. Da bi se izvršila sinteza slike potrebno je imati električni signal koji je nastao analizom elementarnih površina slike koja se želi preneti. Sinteza se vrši pomoću katodne cevi koja predstavlja električno-optički pretvarač. Elektronski mlaz katodne cevi ima dvojako kretanje, poput kretanja pogleda kada čitamo tekst u knjizi: polako sleva nadesno, pa brzo natrag i vertikalno nadole u sledeći red. Jedina razlika je u tome što elektronski mlaz sleva nadesno ne ide horizontalno već blago nagnuto nadole. Na slici 2 prikazano je ovo kretanje, pod pretpostavkom da televizijska slika ima ukupno 11 linija. Elektronski mlaz ide najpre po neparnim linijama, koje su na ovoj slici označene punom linijom, a zatim se vraća u sredinu vrha slike i nastavlja svoje kretanje po parnim linijama, koje su označene isprekidanom linijom. Neparne linije predstavljaju jednu polusliku, a parne linije drugu. Dakle, jedna slika se sastoji od dve poluslike, što znači da u jednoj sekundi ima ukupno 50 poluslika. Ovim načinom sinteze slike izbegnut je efekat treperenja.

Postupak nastajanja slike vrlo je jednostavan. Ekran katodne cevi, koji je premazan fluorescentnim slojem, ima osobinu da na svojoj elementarnoj površini na koju pada elektronski mlaz daje svetliju ili tamniju tačku srazmerno intenzitetu elektronskog mlaza.

S obzirom na to da je ovaj mlaz promenljivog intenziteta i da ima kompleksno kretanje prikazano na slici 2,

Sl. 2 — Putanja elektronskog mlaza po ekranu

u toku svog kretanja on stvara sliku na ekranu.

Postupak analize slike koji ima za cilj da se ona pretvori u električni signal znatno je složeniji. U njemu je po-

ovih cevi, ali su principi na kojima se zasniva njihov rad zajednički. Na slici 3 prikazana je cev za analizu slike koja se naziva ikonoskop, i koju je Zworykin konstruisao 1928. godine.

U vratu ikonoskopa nalazi se katoda K i sistem za fokusiranje elektronskog mlaza sastavljen od anoda A. Dva para kalemova služe za upravljanje horizontalnim i vertikalnim kretanjem elektronskog mlaza. To kretanje je identično kretanju elektronskog mlaza u prijemniku, koje je prikazano na slici 2.

Najvažniji deo ikonoskopa je mozaik M. To je ravna ploča od liskuna koja je sa jedne strane prevučena platinom i vezana na otpornik R. Druga strana ove ploče je prekrivena zrnima srebra koja su prevučena oksidom srebra i cezijuma. Na taj način zrnca su međusobno izolovana. Zbog svoje zrnaste strukture ovaj deo ikonoskopa se naziva mozaik. Zahvaljujući svom sastavu zrnca imaju fotoelektrične osobine. Svako zrnce predstavlja kato-

M O Z A I K

Sl. 3 — Cev za analizu slike

trebno ostvariti korespondenciju između osvetljaja elementarnih površina slike i neke električne veličine. Postupak analize slike obavlja se u televizijskim kamerama. Njihov glavni deo je cev za analizu slike. Postoji više tipova

du elementarne foto-ćelije. Sloj platine sa druge strane liskunske ploče je njihova zajednička anoda.

Postupak analize slike koju treba preneti sprovodi se tako što se slika S projektuje sistemom sočiva L na mo-

zaik M. Svako zrnice mozaika koje platinskim slojem obrazuje elementarni kondenzator emituje manji ili veći broj elektrona, srazmerno intenzitetu svetlosti koja na njega pada. Kolektorski prsten P ima zadatak da privuče ove elektrone. S obzirom na to da su zrnca emitovala određeni broj elektrona, na krajevima elementarnih kondenzatora stvara se potencijalna razlika. Raspodela ovih potencijalnih razlika po mozaiku veran je odraz prenošene slike. Kada elektronski mlaz u procesu analize mozaika udari u pojedino zrnice, on mu dodaje onoliko elektrona koliko mu nedostaje. Na taj način se potencijalna razlika elementarnog kondenzatora izjednačava sa nulom, što se manifestuje u protoku struje sa platinskog sloja kroz otpornik R. Napon na ovom otporniku predstavlja električni signal nastao optičko-električnom konverzijom.

Kao i kod prenosa nepokretne slike i ovde je pitanje sinhronog kretanja elektronskog mlaza na mestu snimanja i mestu prijema slike od prvorazrednog značaja. Zbog toga se, pored signala slike, sa mesta snimanja moraju prenositi posebni, sinhronizacioni signali.

Televizijski signal

Pri prenosu pokretne ili nepokretne slike, talasni oblik signala zavisi od dva faktora. Prvi od njih je sama kompozicija originala slike. Tu kompoziciju u crno-beloj slici definiše određena kombinacija elementarnih površina slike od kojih svaka može da ima bilo koju nijansu od belog do crnog. Drugi faktor, koji direktno utiče na talasni oblik signala, određen je izborom samog sistema transformacije osvetljaja elementarnih površina slike u intenzitete signala. Ova transformacija izvodi se pomoću optičko-električnih pretvarača koji vrše analizu slike na opisani način. Talasni oblik signala zavisiće od izabranog puta po kome elektronski mlaz analizira fine detalje slike.

Standardni oblik televizijskog signala prikazan je na slici 4. Ceo talasni oblik naziva se video signal i ima dva karakteristična dela: signal slike i signal za sinhronizaciju. Signal slike je električni ekvivalent prenošene poruke nastao analizom originala. Sinhronizacioni signal obezbeđuje sinhrono kretanje elektronskog mlaza prilikom analize originala na predajnoj strani i

Sl. 4 — Standardni oblik televizijskog signala

mlaza kojim se vrši sinteza slike na prijemnoj strani.

Signal na slici 4 odgovara analizi jedne linije originala, pri čemu je sa H označeno ukupno trajanje jedne linije. U televizijskom signalu razlikuju se nivo crnog i nivo zamračenja. Nivo zamračenja odgovara »crnjem od crnog«. On služi da se mlaz potpuno ugasi pri likom njegovog vraćanja zdesna nalevo u vremenskom intervalu od završetka jedne linije do početka analize druge. To zamračenje naziva se impuls zamračenja, a njegovo trajanje (a) je nešto duže od sinhronizacionog signala ($a > d$) kome impuls zamračenja služi kao postolje.

Postoje dve vrste signala za sinhronizaciju. To su signali koji služe za sinhronizaciju horizontalnog skretanja mlaza i signali za sinhronizaciju njegovog vertikalnog skretanja. Signali za horizontalnu sinhronizaciju nazivaju se i signalima za sinhronizaciju linija. Dva takva uzastopna signala prikazana su na slici 4. S obzirom na to da se danas u televizijskom prenosu primenjuje isključivo analiza sa proredom, signali za vertikalnu sinhronizaciju nazivaju se i signalima za sinhronizaciju

poluslika. Drugim rečima, kada elektronski mlaz pri analizi stigne na dno slike, u njenu sredinu kod neparnih linija ili na kraj kod parnih, on se gasi sve do trenutka kada se pojavi na sredini vrha slike u slučaju neparnih linija ili na njenom početku u slučaju parnih linija. U tom vremenskom intervalu šalju se signali za sinhronizaciju poluslika. Oni su prikazani na slici 5a, za slučaj kada se radi o prelasku sa neparne na parnu polusliku, a na slici 5b, za slučaj kada se radi o prelasku sa parne na neparnu polusliku.

Na osnovu slike 5 može se zaključiti da ukupno trajanje signala za sinhronizaciju poluslika iznosi j , bez obzira na to da li se radi o prelasku sa neparne na parnu polusliku ili obratno. Trajanje ovog signala iznosi:

$$j = (18 \text{ do } 25) H + 12 \mu s \quad (2)$$

Signal za sinhronizaciju poluslika sastoji se od četiri karakteristična dela. Deo čije je trajanje označeno sa m predstavlja signale za vertikalnu sinhronizaciju. Ispred njih u vremenu l i iza njih u vremenu n nalazi se po pet impulsa za izjednačavanje. Impulsi za izjednačavanje služe da se održi pro-

Sl. 5 — Signali za sinhronizaciju poluslika

red u analizi. Naime, završetak neparne poluslike nije identičan sa završetkom parne, tako da je ovu razliku potrebno ujednačiti. To se ostvaruje povorkom ovih impulsa. Trajanje svake pojedine grupe ovih impulsa je jednako i iznosi $l = m = n = 2,5 \text{ H}$, što ukupno iznosi $7,5 \text{ H}$. Po završetku druge grupe impulsa za izjednačavanje sledi povorka impulsa za horizontalnu sinhronizaciju, čije je ukupno trajanje $(10,5 \text{ do } 17,5) \text{ H} + 12 \mu\text{s}$.

Spektar televizijskog signala

Da bi se odredio spektar signala crno-bele slike, potrebno je najpre razmotriti mehanizam njene elektrooptičke analize.

Neka je slika koju treba analizirati nepokretna i neka elektronski mlaz

gornjeg levog ugla do dna, a zatim ponovo istim putem. Neka ovakva analiza traje beskonačno dugo.

Cilj analize jeste da se u ovim uslovima pronade kakav je opšti oblik signala koji se dobija na izlazu optičko-električnog pretvarača. Sa matematičke tačke gledišta, ceo ovaj postupak je prilično složen. Međutim, on se može uprostiti, a da se pri tom ne izgubi ništa od opštosti zaključaka koji se dobijaju.

Umesto da se posmatra složeno kretanje analizatorskog mlaza, može se zamisliti da se on kreće neprekidno po jednoj pravoj liniji u ravni xOy u kojoj ima beskonačno mnogo analiziranih slika koje su poređane poput mozaika (slika 6).

Neka analiziranu sliku predstavlja pravougaonik sa krugom u njemu, a

Sl. 6 — Analiza nepokretne crno-bele slike

analizira njene detalje na opisan način. Dakle, neka elektronski mlaz ide po linijama sleva nadesno, polazeći od

analiza se vrši bez proreda, pri čemu je za analizu cele slike potrebno ukupno 11 linija. Neka je snop elektronskog mla-

za idealan, odnosno neka osvetljaj slike predstavlja jednu tačku. Osvetljaj jedne tačke date slike, na primer tačke M, na koju pada elektronski mlaz predstavlja funkciju koordinata x i y , i označava se sa $E(x, y)$.

Na osnovu slike 6 vidi se da je osvetljaj svih tačaka raspoređenih duž zamišljene horizontalne linije $y = y_1$, periodična funkcija po x sa periodom $2b$.

Prema tome, ta funkcija može da se napiše u obliku Furijeovog reda:

$$E(x, y_1) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_m(y_1) e^{j \frac{m\pi}{b} x} \quad (3)$$

U prethodnom izrazu član $e^{j \frac{m\pi}{b} x}$ opisuje prostoperiodični talasni oblik m -tog harmonika, a kompleksna veličina $F_m(y_1)$ njegovu amplitudu i fazni stav.

Osvetljaj duž linije $y = y_1 + 2h$ takođe je opisan izrazom (3), pošto je reč o istoj liniji analizirane slike. To važi za sve horizontalne linije na međusobnom rastojanju $2h$.

Prema tome, važi sledeća relacija:

$$\begin{aligned} E(x, y_1) &= E(x, y_1 + 2h) = \\ &= E(x, y_1 + 4h) = \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Kako u izrazu (3) samo kompleksni spektar zavisi od y , važe sledeće relacije:

$$\begin{aligned} E(x, y_1 + 2h) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_m(y_1 + 2h) e^{j \frac{m\pi}{b} x} \\ E(x, y_1 + 4h) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_m(y_1 + 4h) e^{j \frac{m\pi}{b} x} \end{aligned} \quad (5)$$

...

Može se zaključiti da je kompleksni spektar pod datim uslovima periodična funkcija po y , sa periodom visine slike $2h$. To znači da se on kao funkcija od y može napisati u obliku Furijeovog reda:

$$F_m(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{m,n} e^{j \frac{n\pi}{h} y} \quad (6)$$

Ako se izraz (6) uvrsti u izraz (3), dobija se analitički oblik za osvetljaj u bilo kojoj tački (x, y) :

$$E(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{m,n} e^{j\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right)} \quad (7)$$

Ovaj izraz za osvetljaj $E(x, y)$ predstavlja dvostruki Furijeov red.

Izraz (7) treba preurediti da bi bio podesniji za analizu. Prva suma može da se rastavi na tri člana, tako da izraz glasi:

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \sum_{m=-\infty}^{-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{m,n} e^{j\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right)} + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{m,n} e^{j\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right)} + \\ &+ \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{0,n} e^{j\pi \frac{n}{h} y} \end{aligned} \quad (8)$$

Ukoliko se negativne granice $m = -\infty$ i $n = -\infty$ zamene pozitivnim i promene znaci uz m i n , dobija se:

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{-m,-n} e^{-j\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right)} + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{m,n} e^{j\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right)} + \\ &+ \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{0,n} e^{j\pi \frac{n}{h} y} \end{aligned} \quad (9)$$

Kompleksni spektar može da se napiše u sledećem obliku:

$$F_{m,n} = |F_{m,n}| e^{j\theta_{m,n}} \quad (10)$$

Poznato je da kompleksni spektar $F_{-m,-n}$ predstavlja konjugovanu vrednost $F_{m,n}$, tako da je:

$$F_{-m,-n} = |F_{m,n}| e^{-j\theta_{m,n}} \quad (11)$$

Ako se izrazi (10) i (11) uvrste u izraz (9), s obzirom na to da osvetljaj predstavlja realnu funkciju, dobija se:

$$E(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2 |F_{m,n}| \cdot \cos \left[\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right) + \Theta_{m,n} \right] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} |F_{0,n}| \cos \left(\pi \frac{n}{h} y + \Theta_{0,n} \right) \quad (12)$$

Ukoliko se uvedu oznake:

$$C_{m,n} = 2 |F_{m,n}| \quad \text{za } m \neq 0 \quad (13)$$

$$C_{0,n} = |F_{0,n}| \quad \text{za } m = 0$$

izraz za osvetljaj se može napisati u sledećem obliku:

$$E(x,y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} \cdot \cos \left[\pi \left(\frac{m}{b} x + \frac{n}{h} y \right) + \Theta_{m,n} \right] \quad (14)$$

Dobijena relacija predstavlja definitivni analitički oblik koji omogućava da se odredi osvetljaj u bilo kojoj tački x i y ravni. Kao što se vidi, osvetljaj se može izraziti beskonačnom sumom kosinusa čiji su karakteristični parametri m i n .

Da bi se dobio električni signal kao rezultat analize slike, potrebno je raspolagati odgovarajućim optičko-električnim pretvaračem. Ukoliko je ovaj pretvarač idealan, na njegovom izlazu se dobija struja koja je direktno proporcionalna osvetljaju. Dakle,

$$i = KE(x,y) \quad K = \text{const.} \quad (15)$$

U procesu analize slike, analizatorski mlaz se kreće konstantnom brzinom v koja se može razložiti na svoje komponente v_x duž x — ose i v_y duž y — ose. U nekom trenutku t koordinate spota analizatorskog mlaza mogu se opisati izrazima:

$$x = v_x t \quad (16)$$

$$y = v_y t \quad (17)$$

Ako se ove vrednosti uvrste u relaciju (14), a dobijeni rezultat uvrsti u relaciju (15), dobija se sledeći izraz:

$$i = K \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} \cdot \cos \left[\pi \left(\frac{mv_x}{b} + \frac{nv_y}{h} \right) t + \Theta_{m,n} \right] \quad (18)$$

Na osnovu izraza za struju na izlazu optičko-električnog pretvarača može se izvesti nekoliko zaključaka. Prvo, ova struja zavisi od vremena. Drugo, određena je beskonačnom sumom prostoperiodičnih signala čija trenutna učestanost iznosi:

$$f_{m,n} = \frac{mv_x}{2b} + \frac{nv_y}{2h} \quad (19)$$

Na osnovu prethodnog izraza može se zaključiti da je spektar diskretnog karaktera. Svaka komponenta je određena parom brojeva m i n , koji imaju vrednosti $m = 0, 1, 2, \dots$ i $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Amplituda svake komponente određena je sa $C_{m,n}$, a fazni stav sa $\Theta_{m,n}$. Ove veličine zavise od kompozicije analizirane slike.

Ako je ukupan broj linija po slici N , a ukupan broj analiziranih slika u jednoj sekundi f_s , onda je ukupan broj analiziranih linija u jednoj sekundi:

$$f_l = N f_s \quad (20)$$

Kako vreme trajanja jedne linije iznosi $1/f_l$, imajući u vidu relaciju (16), može se napisati:

$$2b = v_x \frac{1}{f_l} \quad (21)$$

odakle se može odrediti učestanost linije:

$$f_l = \frac{v_x}{2b} \quad (22)$$

Na sličan način može se odrediti i učestanost slika. S obzirom na to da analiza jedne slike traje $1/f_s$, na osnovu relacije (17) može se napisati:

$$2h = v_v \frac{1}{f_s} \quad (23)$$

odakle se može odrediti učestanost slike:

$$f_s = \frac{v_y}{2h} \quad (24)$$

Ako se zamene izrazi (21) i (23) u (19), dobija se učestanost m, n signala:

$$f_{m,n} = mf_1 + nf_s \quad (25)$$

Opšti oblik spektra signala prikazan je na slici 7. Vidi se da su u spektru karakteristične one komponente čije

Amplitude komponenata čije su učestanosti mf_1 opadaju sa porastom vrednosti m . Isto važi i za amplitude satelitskih komponenata koje, takođe, opadaju sa porastom vrednosti m i n . Zbog toga na slici 7 i nisu nacrtane sve satelitske komponente, jer su suviše male. Teorijski gledano, satelitske komponente se protežu u opsegu učestanosti od 0 do ∞ , tako da se komponente koje pripadaju grupama $0, f_1, 2f_1, \dots$ međusobno poklapaju.

Zamenom relacije (20) u (25) dobija se:

$$f_{m,n} = f_s (mN + n) \quad (26)$$

U televizijskom sistemu sa 625 linija i 25 slika u sekundi, u slučaju analize bez proreda, učestanosti dve susedne satelitske komponente sa slike 7 razlikuju se za 25 Hz.

Sl. 7 — Spektar signala nastalog analizom nepokretne crno-bele slike

je su učestanosti ravne multiplima učestanosti linije f_1 . Oko svake od njih postoje satelitske komponente, pri čemu razlika učestanosti dve susedne komponente iznosi f_s .

U slučaju analize sa proredom, analiza se obavlja duž prave koja je nacrtana isprekidanom linijom na slici 6. U ovom slučaju brzina kretanja mlaza

duž y — ose je dva puta veća, pa učestanost $f_{m,n}$ iznosi:

$$f_{m,n} = mf_1 + 2nf_s \quad (27)$$

Izraz koji odgovara relaciji (26), u slučaju analize sa proredom, iznosi:

$$f_{m,n} = f_s (mN + 2n) \quad (28)$$

Prema tome, spektar će u ovom slučaju izgledati kao na slici 7, samo će razlika učestanosti dve susedne satelitske komponente iznositi $2f_s$, odnosno 50 Hz.

Pri analizi standardnom televizijskom tehnikom u Evropi, uzima se $N = 625$ linija po slici, pri čemu je učestanost pojavljivanja slika $f_s = 25$ Hz. Na osnovu relacije (20) može se odrediti učestanost pojavljivanja linija $f_1 = 15625$ Hz, odnosno trajanje jedne linije $H = 64 \mu s$. U američkom sistemu je $N = 525$ i $f_s = 30$ Hz, pa je $f_1 = 15750$ Hz, odnosno $H = 63,5 \mu s$.

Da bi se preklapile dve satelitske spektralne komponente koje pripadaju dvema susednim grupama oko mf_1 i $(m+1)f_1$, treba da bude zadovoljen uslov:

$$mN + 2n = (m+1)N + 2n' \quad (29)$$

odnosno:

$$n - n' = \frac{1}{2} N \quad (30)$$

Ako je, na primer, reč o sistemu sa $N = 625$ linija, onda proističe da je rang harmonika n za 312 veći od ranga harmonika n' koji pripada susednoj grupaciji.

Na osnovu relacije (30) može se zaključiti da broj analizatorskih linija direktno određuje vertikalnu rezoluciju slike.

Na kraju, postavlja se pitanje: kolika je maksimalna učestanost u spektru signala koju treba preneti da bi reprodukcija slike bila prihvatljivog kvaliteta. Odgovor na ovo pitanje za-

visi od tražene rezolucije. Ukoliko se slika sastoji od $N = 625$ linija, a učestanost pojavljivanja linija je $f_1 = 15625$ Hz, može se zaključiti da je maksimalna učestanost koju treba preneti $f_{max} = 625 \cdot 15625 \cong 9,77$ MHz. Ovaj rezultat uzima u obzir samo horizontalnu rezoluciju. Ukoliko se u obzir uzme i vertikalna rezolucija, potrebna širina spektra se dodatno smanjuje.

Rezolucija

Rezolucija nekog sistema za reprodukciju slike predstavlja njegovu moć u predstavljanju detalja. Ona se obično meri maksimalnim brojem ispravno reprodukovanih crnih i belih linija naizmenično poređanih jedna uz drugu na određenoj dužini uzetoj normalno na ove linije.

U televizijskoj slici razlikuju se horizontalna i vertikalna rezolucija.

Vertikalna rezolucija predstavljena je ukupnim brojem horizontalnih crnih i belih linija koje su naizmenično poređane jedna ispod druge po celoj visini slike i mogu se uspešno reprodukovati. Najveća teorijska vrednost vertikalne rezolucije r_v je jednaka ukupnom broju linija slike. U praksi, vertikalna rezolucija je uvek manja od ovog broja, za šta postoje dva razloga.

Prvo, za vreme zamračenja mlaza pri prelasku sa jedne na drugu polusliku gubi se između 18 i 25 analizatorskih linija. Prema tome, za celu sliku gubi se ukupno 2 (18 do 25) linija, pa ukupan broj aktivnih linija iznosi:

$$N_a = N - 2(18 \text{ do } 25) \quad (31)$$

Faktor aktivnih linija definiše se na sledeći način:

$$k_v = \frac{N_a}{N} \quad (32)$$

Drugo, zbog konačnih dimenzija analizatorskog mlaza gubi se određeni

broj linija, što se može objasniti pomoću slike 8.

Sl. 8 a i c — Analizirane slike, b i d — Reprodotkovane slike

Neka je prečnik analizatorskog mlaza d . Ako su crni i beli detalji slike poređani na originalu kao na slici 8a, i ako je njihova dimenzija po vertikali takođe d , pod uslovom da svaka analizatorska linija prelazi preko jednog takvog elementa dobijamo vernu reprodukciju koja je prikazana na slici 8b. S druge strane, ako svaka analizatorska linija prolazi u analizi slike tako da zahvata pola crnog i pola belog elementa, kao što je prikazano na slici 8c, dobiće se reprodukcija kao na slici 8d. To je uniformno siva vertikalna traka. U prvom slučaju, vertikalna rezolucija je jednaka ukupnom broju linija, a u drugom je jednaka nuli.

U praksi su elementi slike poređani potpuno slučajno. Zbog toga se ukupan broj verno reprodukovanih elemenata u vertikalnom pravcu nalazi između

du nule i ukupnog broja linija. Eksperimentalna i teorijska ispitivanja su pokazala da se oko 70% elemenata slike duž njene vertikalne dimenzije može uspešno reprodukovati. Drugim rečima, faktor vertikalne rezolucije iznosi $k \approx 0,7$.

Prema tome, vertikalna rezolucija je:

$$r_v = k_v k_N \quad (33)$$

Horizontalna rezolucija jednaka je broju verno reprodukovanih crnih i belih elemenata duž jedne analizatorske linije, na dužini koja odgovara vi-

Sl. 9 a — Detalj analizirane slike, b — Signal koji bi se dobio da je analizatorski mlaz beskonačno uzak, c — Signal koji se dobije kada analizatorski mlaz ima konačne dimenzije, d — Reprodotkovani detalj slike kada analizatorski mlaz ima konačne dimenzije.

sini slike. Ova dužina usvojena je za referentnu pri definisanju kako vertikalne tako i horizontalne rezolucije.

Na slici 9a prikazan je deo slike sastavljen od naizmenično poređanih

crnih i belih elemenata duž jedne linije. Kada bi analizatorski mlaz bio beskonačno uzak, optičko-električnom transformacijom generalisala bi se struja čiji je talasni oblik prikazan na slici 9b. S obzirom na to analizatorski mlaz ima konačne dimenzije, generisana struja ima oblik koji je prikazan na slici 9c. Posle električno-optičke reprodukcije ovog signala dobija se slika koja je prikazana na slici 9d.

Trajanje jedne linije iznosi:

$$\frac{1}{f_l} = \frac{1}{Nf_s} \quad (34)$$

Pri povratku mlaza zdesna nalevo dolazi do zamračenja linije, tako da jedan deo linije nije aktivan. Ako se sa k_h označi odnos trajanja aktivnog dela linije i njenog ukupnog trajanja, a sa $2f_{\max}$ broj uspešno reprodukovanih belih i crnih elemenata u jednoj sekundi, onda je ukupan broj crnih i belih elemenata duž aktivnog dela jedne linije:

$$\frac{k_h}{Nf_s} 2f_{\max} \quad (35)$$

Da bi se ovaj broj sveo na istu dužinu na kojoj je definisana vertikalna rezolucija, treba ga pomnožiti sa h/b . Prema tome, horizontalna rezolucija je:

$$r_h = 2 \frac{h}{b} \frac{k_h}{Nf_s} f_{\max} \quad (36)$$

Odnos rezolucija označava se sa ρ i iznosi:

$$\rho = \frac{r_h}{r_v} \quad (37)$$

Smatra se da je slika najbolja ako je odnos rezolucija $\rho = 0,96$.

Maksimalna i minimalna učestanost videosignala

Maksimalna učestanost videosignala je u direktnoj vezi sa horizontalnom rezolucijom.

Kombinacijom izraza (33), (36) i (37) dobija se maksimalna učestanost video signala:

$$f_{\max} = \frac{1}{2} \rho k f_s N^2 \frac{b}{h} \frac{k_v}{k_h} \quad (38)$$

U slučaju kada je $k_v = 0,935$; $k_h = 0,815$; $b/h = 4/3$; $N = 625$; $f_s = 25$ Hz i $k = 0,7$ maksimalna učestanost videosignala je:

$$f_{\max} \cong 5 \text{ MHz} \quad (39)$$

Pošto je tehnički nemoguće prenositi jednosmernu komponentu, potrebno je da donja granična učestanost prenosnog sistema bitno ne oslabi najnižu spektralnu komponentu na učestanosti $f_s = 25$ Hz. Na osnovu toga uzima se da minimalna učestanost videosignala koju treba preneti iznosi:

$$f_{\min} \cong 10 \text{ Hz} \quad (40)$$

Rezultati ispitivanja pokazuju da je glavni deo spektralne gustine snage koncentrisan u opsegu učestanosti od 0 do 300 kHz. U ovoj oblasti spektralna gustina amplituda jako je istaknuta u ukolini linijske učestanosti f_l i njenih harmonika mf_l . Od 300 kHz pa do 1,5 MHz spektralna gustina je znatno manja, a iznad ove vrednosti je praktično zanemarljivo mala.

»Prazni« delovi spektra videosignala su veoma značajni. Koriste se za različite svrhe. U njih mogu da se ubace komponente nekog drugog videosignala, što omogućuje istovremeni prenos dva programa kroz isti kanal. Takođe, u njih se ubacuju signali karakteristični za televizijski prenos u boji, tako da se ne proširuje spektar koji je potreban za prenos crno-bele slike.

— Nastaviće se —