

---

## Termovizija

---

### 12.1 Princip rada termovizije

Sva tela sa temperaturom višom od apsolutne nule ( $0\text{ K} = -273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zrače elektromagnetnu energiju. Ukupna energija i spektralna raspodela energije koju tela zrače u okolinu zavise od temperature i od emisivnosti. Sva tela najveći deo energije zrače u infracrvenom delu spektra (770 nm do 1 mm). Budući da je ova energija zračenja posledica zagrejanosti tela, uobičajen naziv za ovu vrstu energije je toplotno zračenje. Toplotno zračenje se fizički opisuje preko zračenja apsolutno crnog tela.

Kod tela koje se nalaze na sobnoj temperaturi (300 K ili  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), maksimum energije zračenja nalazi se na talasnoj dužini od  $10\text{ }\mu\text{m}$  u dugotalasnoj infracrvenoj oblasti. Kao što je poznato, kroz atmosferu se može prostirati samo zračenje određenih talasnih dužina. U Glavi 18, pokazano je da se dva glavna atmosferska prozora nalaze na talasnim dužinama od  $3 - 5\text{ }\mu\text{m}$  i od  $8 - 14\text{ }\mu\text{m}$ . Oba ova atmosferska prozora kroz koje je moguće prostiranje infracrvenog zračenja koriste se za rad termovizijskih uređaja.

Termovizijski uređaji se mogu predstaviti kao uređaji koji rade u infracrvenoj oblasti i po funkciji su analogni TV kamerama koje rade u vidljivoj oblasti spektra. Na engleskom govornom području odomaćena je skraćenica FLIR – forward looking real time infrared imaging system. Tu skraćenicu je prvi put upotrebilo američko vazduhoplovstvo ranih šezdesetih godina prošlog veka. U suštini, termovizijski uređaj služi za prevođenje nevidljivog infracrvenog zračenja u vidljivo zračenje i formiranje lika predmeta.

Sopstveno zračenje tela zajedno sa reflektovanim zračenjem drugih prirodnih izvora zračenja prostire se kroz atmosferu. Sve bitne informacije o predmetima u posmatranoj sceni mogu se izraziti kroz toplotni kontrast. Termovizijski uređaj omogućava vizuelizaciju toplotnog kontrasta zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u fluksu (snazi) primljenog infracrvenog zračenja pretvori u električni signal. Električni signal služi za generisanje kontrasta vidljive slike (obično u TV formatu) srazmerno toplotnom kontrastu posmatrane scene.

Glavna primena termovizijskih uređaja je u noćnim uslovima i u uslovima kada klasične nišanske i osmatračke sprave ne mogu da funkcionišu. Bitno je naglasiti da se u noćnim uslovima i u uslovima smanjene vidljivosti mogu koristiti i pasivne nišanske i osmatračke sprave. Između termovizijskih uređaja i pasivnih uređaja postoji značajna razlika. Termovizijski uređaji služe za vizuelizaciju infracrvenog zračenja koje je nevidljivo za ljudsko oko. Termovizijski uređaji rade na talasnim dužinama od  $3 - 5\text{ }\mu\text{m}$  i od  $8 - 14\text{ }\mu\text{m}$ . Pasivni uređaji rade na principu pojačavanja postojećeg vidljivog i bliskog infracrvenog zračenja. Kao izvori zračenja koji se pojačavaju odgovarajući broj puta obično se koriste mesec i zvezde na noćnom nebu. Za razliku od termovizijskih uređaja koji su relativno retki i veoma skupi, pasivni uređaji se nalaze u širokoj upotrebi i u poređenju sa termovizijskim uređajama su znatno jeftiniji. Pasivni uređaji neće dobro raditi u uslovima kada nema dovoljno spoljnog zračenja (oblačna noć bez mesečine i

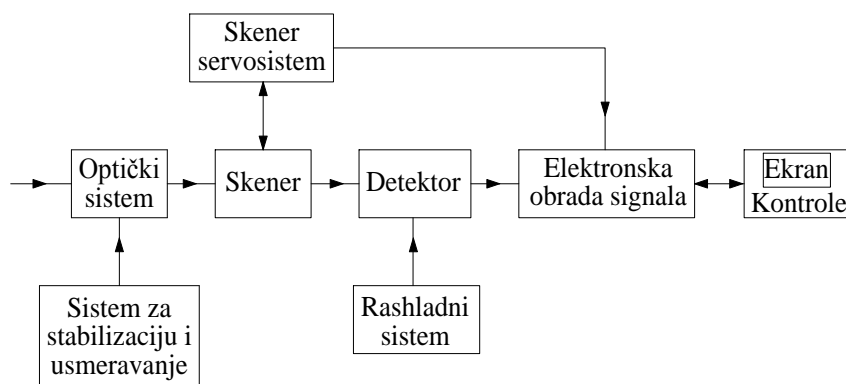
zvezda), ili kada se u atmosferi nalazi velika količina dima, prašine i vodene pare. U svim tim slučajevima termovizijski uređaji će uspešno raditi jer oni funkcionišu na drugim talasnim dužinama.

## 12.2 Osnovne komponente termovizijskih uređaja

Termovizijski uređaj se sastoji iz sledećih osnovnih komponenti:

- optički sistem,
- skener,
- detektor,
- rashladni sistem,
- blok elektronike,
- ekran sa kontrolama.

Blok šema tipičnog termovizijskog uređaja prikazana je na slici 13.1.



Slika 13.1. Blok šema termovizijskog uređaja

Termovizijska slika posmatrane scene se formira na bazi razlika u radijansi elemenata scene koji se skupljaju pomoću IC detektora termovizijskog uređaja. Te razlike u radijansi elemenata scene nazivaju se toplotni kontrast. Termovizijski uređaj omogućava vizuelizaciju toplotnog kontrasta zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u snazi (fluksu) primljenog IC zračenja, pretvori u električni signal koji se na odgovarajući način može prikazati tako da se, srazmerno toplotnom kontrastu, generiše kontrast vidljive slike (termovizijska slika).

Struktura pojedinih osnovnih komponenti termovizijskog uređaja bitno zavisi od namene uređaja i tehnoloških mogućnosti proizvođača termovizijskih uređaja. Termovizijski uređaji su veoma skupi uređaji pa se zbog pojeftinjenja proizvodnje pristupilo definisanju zajedničkih modula koji mogu da se koriste u različitim primenama termovizijskih uređaja.

### 12.2.1 Optički sistem

Optički sistem omogućava sakupljanje IC zračenja i njeno usmeravanje na skener i detektor. Tip optičkog sistema se bira u zavisnosti od odabranog spektralnog opsega rada i namene termovizijskog uređaja.

Za izradu optičkih elemenata koriste se retki i skupi optički materijali kao što su germanijum, silicijum, safir, cinksulfid. Optičke osobine svih ovih materijala zavise od temperature, pa je zbog toga teško optimizovati optički sistem za rad na svim temperaturama primene termovizijskih uređaja. Rešenje problema se nalazi u primeni različitih pasivnih i aktivnih metoda atermalizacije, pomoću kojih se vrši kompenzacija uticaja temperature na položaj ravni lika koji formira objektiv. Druga nezgodna karakteristika optičkih materijala koji se koriste u izradi optičkih elemenata za termovizijske uređaje je visok indeks prelamanja, pa su zbog toga gubici usled refleksije veliki. To zahteva izradu specijalnih antirefleksnih slojeva da bi se gubici usled refleksije smanjili. Ovi optički materijali su i relativno meki pa se na spoljašnjim površinama moraju nanositi tvrdi zaštitni slojevi.

Kvalitet optičkog sistema bitno utiče na ukupan kvalitet termovizijske slike, kako u pogledu temperaturne rezolucije preko uticaja transmisije optičkog sistema, tako i u pogledu prostorne rezolucije preko uticaja modulacione prenosne funkcije objektiva.

### 12.2.2 Skener

Skener je sledeća komponenta termovizijskog uređaja posle optičkog sistema. Skener je optomehanički sklop koji omogućava prostornu diskretizaciju zračenja iz vidnog polja optičkog sistema u skladu sa strukturom detektora. To znači da skener omogućava prenos energije zračenja na detektor, tako da u jednom trenutku detektor prima zračenje samo iz jednog dela prostora. Pored toga što omogućava prostornu diskretizaciju zračenja, skener generiše i odgovarajuće sinhro signale, koji srazmerno položaju skenera omogućavaju da se iz vremenski promenljivog signala detektora rekonstruiše prostorna raspodela energije zračenja u prostoru predmeta.

Postoji veći broj konstruktivnih rešenja skenera. Najčešće rešenje je ravno ogledalo koje rotira i preseca snop zraka. Postoje i rešenja skenera koja umesto ravnog ogledala koriste klinove ili prizme.

U zavisnosti od tipa optičkog sistema i načina sprege sa skenerom postoji:

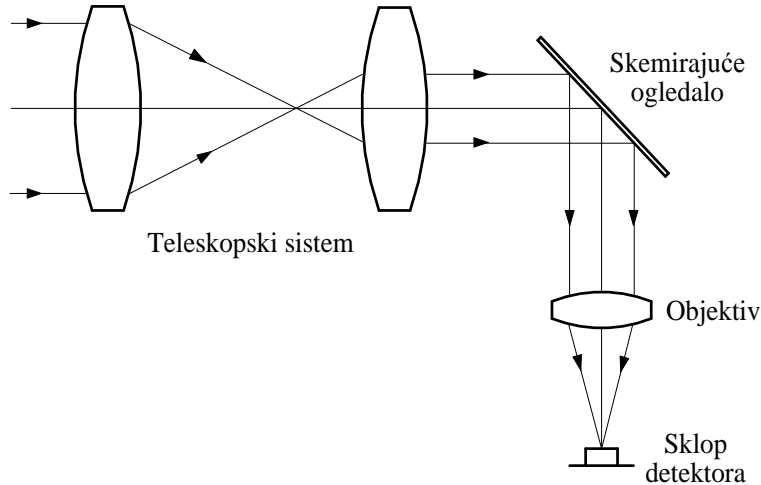
- skeniranje u prostoru predmeta,
- skeniranje u prostoru lika.

Kod skeniranja u prostoru predmeta ogledalo se postavlja ispred objektiva. Ogledalo je centrirano sa optičkom osom objektiva i rotira se oko normale na optičku osu. Rotacija ogledala obezbeđuje da objektiv posmatra različite delove prostora predmeta u zavisnosti od trenutnog ugla ogledala. Kod skeniranja u prostoru predmeta javljaju se sledeći praktični problemi:

- ogledalo mora biti postavljeno dovoljno daleko od objektiva, da ga objektiv ne bi udario prilikom rotacije;

- zbog svoje udaljenosti od objektiva ogledalo treba da bude veće od objektiva. To znači da ogledalo treba da bude najveći element u optičkom sistemu.

Kod skeniranja u prostoru lika ogledalo se obično postavlja između teleskopskog sistema i objektiva, kao što je prikazano na slici 13.2.



Slika 13.2. Principijelna šema termovizijskog uređaja sa skeniranjem u prostoru lika

Kao što se sa slike 13.2 vidi, termovizijski uređaji obično koriste kombinaciju teleskopskog sistema i objektiva koji formira sliku na detektoru. Teleskopski sistem se koristi da bi se dobio uski kolimisani snop zraka. U izlaznu pupilu teleskopskog sistema postavlja se skenirajuće ogledalo koje je sada znatno manjih dimenzija nego ogledalo u prostoru predmeta.

Dodatna dobra strana skeniranja u prostoru lika je da se sklop skenirajuće ogledalo, objektiv i detektor može koristiti u više aplikacija jednostavnim izmenom teleskopskog sistema.

### 12.2.3 Detektor

Detektor omogućava konverziju infracrvenog zračenja u električni signal. Infracrveno zračenje se može detektovati pomoću termičkog ili fotoelektričnog efekta. Kod termičkog efekta infracrveno zračenje se apsorbira kao toplota i izaziva povećanje temperature detektora. Povećanje temperature detektora se manifestuje kao promena nekog temperaturno zavisnog parametra koji može da se meri. Najčešće se meri promena električne otpornosti, ili dimenzija detektora sa promenom temperature. Ovakvi detektori se nazivaju termički detektori. Termički detektori obično rade na sobnoj temperaturi. Kod fotoelektričnog efekta fotoni iz infracrvenog zračenja izazivaju elektronske prelaze unutar atoma materijala detektora. Da bi se ti elektronski prelazi mogli pouzdano registrovati potrebno je ohladiti detektor na temperaturu od 77 K (-196 °C). Detektori kod kojih se koristi fotoelektrični efekat nazivaju se kvantni detektori. Postoje više tipova kvantnih detektora:

- fotoprovodni detektori,
- fotodiode,

- fotokapacitivni detektori ili MIS detektori.

Fotoprovodni detektori predstavljaju elektronsku verziju otpornika, fotodiode predstavljaju infracrveni ekvivalent za silicijumsku fotoćeliju i fotokapacitivni detektori predstavljaju infracrveni ekvivalent za jednu ćeliju na CCD detektoru.

Detektori su se u početku razvoja proizvodili kao jednoćelijski detektori. Sa razvojem tehnologije prešlo se na proizvodnju matričnih detektora. U okviru jednog matričnog detektora može se nalaziti više hiljada elementarnih detektora. Dimenzije elementarnih detektora koji se nalaze u sklopu matričnog detektora najčešće su u rasponu od 25  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Elementarni detektori mogu biti kvadratnog ili pravougaonog oblika. Debljina elementarnog detektora je obično 10  $\mu\text{m}$  ako se radi sa kvantnim detektorima, odnosno nekoliko desetina  $\mu\text{m}$  ako se radi sa termičkim detektorima. Ukupan broj elementarnih detektora u matričnom detektoru direktno utiče na osetljivost matričnog detektora.

#### 12.2.4 Rashladni sistem

Rashladni sistem služi za hlađenje kvantnih detektora i njihovo dovođenje na radnu temperaturu. Postoje više različitih tipova rashladnih sistema:

- hladnjaci sa direktnim kontaktom preko “hladnog prsta”. Ovi hladnjaci rade sa tečnim azotom ili tečnim vazduhom i obezbeđuju temperature od 4 K (-269 °C) do 77 K (-196 °C);
- Joule – Thomsonovi mikrohladnjaci koji za svoj rad koriste izuzetno čist gas (azot, vazduh, argon) visokog pritiska (do 300 bara). Ovi hladnjaci obezbeđuju temperature od 20 K (-253 °C) do 90 K (-183 °C);
- hladnjaci sa zatvorenim ciklusom. To su najčešće hladnjaci bazirani na Stirlingovom ciklusu i obezbeđuju temperature od 30 K (-243 °C) do 300 K (27 °C);
- termoelektrični hladnjaci koji mogu biti izvedeni kao jednostepeni i višestepeni hladnjaci. Jednostepeni termoelektrični hladnjaci obezbeđuju temperature od 250 K (-23 °C) do 300K (27 °C), dok višestepeni termoelektrični hladnjaci obezbeđuju temperature od 195 K (-78 °C) do 250 K (-23 °C).

#### 12.2.5 Elektronska obrada signala

Elektronska obrada signala omogućava prilagođavanje izlaznog signala sa detektora, u odgovarajući oblik koji se može prikazati na ekranu. To se postiže kroz pojačanje detektorskog signala u predpojačavačima i pojačavačima i obradu detektorskog signala, kroz transformaciju signala po amplitudi i vremenskom formatu. Obično se vrši dodatna obrada informacija, koje sadrži formatiran signal za prikaz na ekranu, u cilju poboljšanja kvaliteta slike ili automatske selekcije informacija od značaja za odabrani način upotrebe. To je naročito važno kod sistema za automatsko prepoznavanje i praćenje.

U procesu elektronske obrade detektorskog signala i formiranja video signala termovizijskog uređaja, izgled termovizijske slike definišu sledeće veličine:

- temperaturski nivo – pojačanje (sjajnost), definiše se kao nivo referentnog signala koji se oduzima od detektorskog signala radi lakšeg uočavanja malih razlika kontrasta u sceni,
- temperaturski prozor – kontrast, definiše se kao opseg vrednosti naponskog signala po jednom nivou sivog, u crno beloj televizijskoj slici i može se prikazati na ekranu.

Svi termovizijski uređaji mogu se podeliti na:

- uređaje sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta,
- uređaje sa automatskom kontrolom pojačanja i kontrasta.

Kod termovizijskih uređaja sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta, operator korišćenjem spoljnih kontrola podešava uređaj za optimalni prikaz termovizijske slike. U toku upotrebe, operator najčešće ne vrši dodatna podešavanja termovizijskog uređaja. Ovi termovizijski uređaji koriste se za laboratorijske (merne) uređaje i za neke tipove nišansko – osmatračkih uređaja starije generacije.

Kod termovizijskih uređaja sa automatskom kontrolom pojačanja i kontrasta, koriste se specijalni algoritmi koji regulišu pojačanje i kontrast termovizijske slike u skladu sa strukturom raspodele radijanse (energetskog sjaja) u sceni.

### **12.2.6 Ekran**

Uloga ekrana je da pretvori izlaz iz bloka za elektronsku obradu signala u dvodimenzionalnu raspodelu vidljive svetlosti koja odgovara izabranom delu IC scene. Najlogičniji izbor za ekran je standardni TV monitor. Dobra strana ovog rešenja je mogućnost korišćenja velikog broja pomoćne video opreme kao što su videorekorderi, mikseri i slični uređaji. Nedostatak ovakvog rešenja je potreba korišćenja relativno složene elektronike da bi se dobila slika u standardnom TV formatu.

U pojedinim primenama termovizijskih uređaja nema potrebe da slika bude prikazana u televizijskom formatu. To omogućava smanjenje kompleksnosti elektronike i potrebne energije za napajanje. Ovo je važno za prenosne termovizijske uređaje.