

# Ograničavanje svetlosnih snopova u optičkom sistemu

---

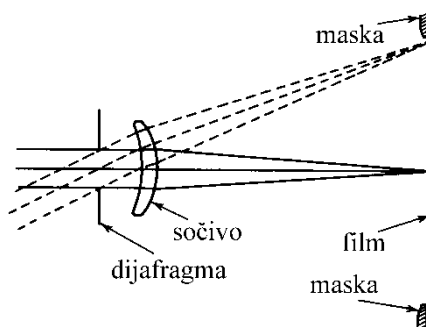
## 4.1 Optički sistem u realnim uslovima

Pri razmatranju opštih zakona kretanja svetlosnih zrakova u geometrijskoj optici, optički sistem je predstavljen šematski, bez ikakvih prostornih ograničavanja i ostalih stranih uticaja. U realnosti, uslovi u kojima optički sistem radi prilično se razlikuju od šematski postavljenih uslova idealnog optičkog sistema. Osnovna postavka teorije idealnih optičkih sistema je, da svakom zraku u prostoru predmeta odgovara zrak u prostoru lika. U realnosti, ovaj uslov se ne može ostvariti u potpunosti, jer su elementi optičkog sistema ograničeni. Sočiva, ogledala i prizme su postavljeni u odgovarajuće nosače koji ih ograničavaju u pogledu njihovih poprečnih dimenzija, što prouzrokuje da svi zraci iz prostora predmeta ne mogu da prođu u prostor lika. Svakom zraku, koji u prostoru predmeta prolazi izvan granica površine sočiva, neće odgovarati zrak u prostoru lika, jer će već u prostoru predmeta biti zaustavljen od strane metalnih nosača sočiva i ostalih ograničenja.

Elementi optičkih sistema koji ograničavaju svetlosni snop nazivaju se dijafragme ili blende. Obično se pretpostavlja da su dijafragme kružnog oblika i da su koncentrične u odnosu na optičku osu. Dijafragme mogu biti nosači optičkih elemenata, ili specijalno konstruisane dijafragme za ograničavanje svetlosnih snopova. Dijafragme ograničavaju prolaz zraka, odnosno svetlosne energije kroz optički sistem.

Dijafragma koja definiše prečnik energetskog konusa, koji će optički sistem da prihvati iz tačke predmeta na optičkoj osi, naziva se aperturna dijafragma. Aperturna dijafragma definiše osvetljenost lika. Dijafragma koja ograničava veličinu lika predmeta, odnosno veličinu ugla vidnog polja, naziva se dijafragma vidnog polja. Aperturna dijafragma i dijafragma vidnog polja su dve najvažnije dijafragme i potrebno je poznavati njihov položaj za svaki optički sistem sa kojim se radi.

Položaj aperturne dijafragme i dijafragme vidnog polja biće objašnjen na primeru jednostavne kamere na slici 4.1.

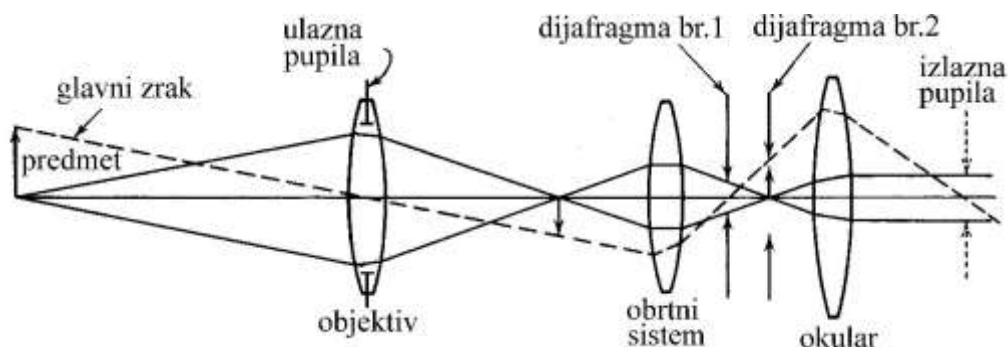


Slika 4.1. Jednostavna kamera

Dijafragma ispred sočiva, ograničava prečnik snopa zraka koje kamera može da primi, pa je ta dijafragma aperturna dijafragma. Maska koja drži film, definiše veličinu lika i ugao vidnog polja, pa je to dijafragma vidnog polja.

## 4.2 Aperturna dijafragma

Prethodni primer predstavlja uprošćen primer optičkog sistema, kod koga je položaj aperturane dijafragme i dijafragme vidnog polja veoma jasan. Sledeći primer je nešto složeniji primer optičkog sistema, prikazan na slici 4.2. Posmatra se pojednostavljeni teleskopski sistem, sa predmetom na konačnom rastojanju. Teleskopski sistem predstavljen je uprošćeno, kao sistem koji se sastoji od objektiva, obrtnog sistema i okulara, koji su napravljeni od po jednog sočiva i dve unutrašnje dijafragme. Objektiv formira obrnut lik predmeta. Obrtni sistem uspravlja obrnut lik predmeta koji je formirao objektiv i formira ga u prednjoj žižnoj ravni okulara. Okular formira konačan lik predmeta u beskonačnosti.



Slika 4.2. Teleskopski system

Ako se prati putanja osnih zraka, vidi se da je dijafragma br. 1 aperturna dijafragma sistema, koja ograničava veličinu aksijalnog energetskog konusa sa objektiva. Svi ostali elementi optičkog sistema su dovoljno veliki da prihvate i veći konus.

Zrak koji prolazi kroz centar aperturane dijafragme sa zove glavni zrak.

Ulazna pupila i izlazna pupila su likovi aperturane dijafragme u prostoru predmeta i prostoru lika. Ulazna pupila je lik aperturane dijafragme koji bi se video iz tačke predmeta na optičkoj osi. Ulazna pupila je lik aperturane dijafragme koji se formira u prostoru predmeta pomoću svih optičkih elemenata koji prethode aperturnoj dijafragmi. Ulazna pupila se često zove i ulazni otvor optičkog sistema. Izlazna pupila je lik aperturane dijafragme koji bi se video iz ravni lika. Izlazna pupila je lik aperturane dijafragme koji se formira u prostoru lika pomoću svih optičkih elemenata koji se nalaze posle aperturane dijafragme. U optičkom sistemu prikazanom na slici 4.2, ulazna pupila se nalazi na objektivu, a izlazna pupila se nalazi desno od okulara.

Važno je primetiti da prvi i zadnji presek glavnog zraka sa optičkom osom definiše položaj ulazne i izlazne pupile, a da prečnik osnog konusa zraka na ulaznoj i izlaznoj pupili određuje njihove prečnike. Može se videti da za bilo koju tačku na predmetu, količina svetlosne energije koji optički sistem prima je određena veličinom i položajem ulazne i izlazne pupile.

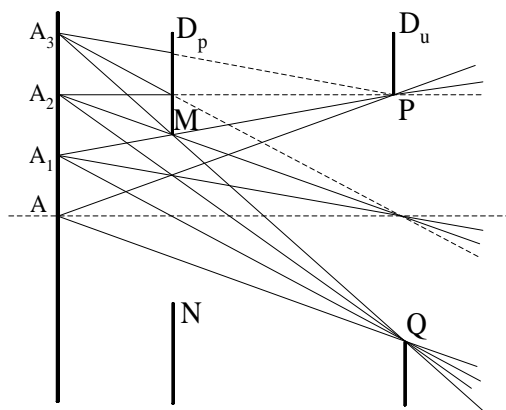
### 4.3 Dijafragma vidnog polja

Prateći hod glavnog zraka, na slici 4.2, vidi se da dijafragma br. 2 ograničava veličinu predmeta koji se može videti. Znači, dijafragma br. 2 je dijafragma vidnog polja optičkog sistema. Likovi dijafragme vidnog polja u prostoru predmeta i prostoru lika se zovu ulazni i izlazni prozorčić. Ulazni prozorčić je lik dijafragme polja koji se formira u prostoru predmeta pomoću svih optičkih elemenata koji prethode dijafragmi polja. Izlazni prozorčić je lik dijafragme polja koji se formira u prostoru lika pomoću svih optičkih elemenata koji se nalaze posle dijafragme polja. Za optički sistem prikazan na slici 4.2, ulazni prozorčić se poklapa sa predmetom, a izlazni prozorčić se poklapa sa likom.

Važno je primetiti da se ulazni i izlazni prozorčić poklapaju sa predmetom i likom, samo kada se dijafragma vidnog polja poklapa sa realnim likom koji formira optički sistem.

### 4.4 Vinjetiranje

Vinjetiranje je pojam koji označava gubitak svetlosne energije kroz optički sistem koji se dešava zato što svi zraci koji su ušli u optički sistem ne mogu da prođu kroz njega. Neka se posmatra optički sistem ispred čije se ulazne pupile ( $D_u$ ) nalazi lik dijafragme vidnog polja, odnosno ulazni prozorčić ( $D_p$ ), kao što je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3. Vinjetiranje svetlosnih snopova

Ulazni prozorčić, za snop zraka koji izlazi iz tačke A na osi sistema, ne predstavlja prepreku na putu do ulazne pupile. Ovaj će snop ispuniti celu ulaznu pupilu od tačke P do tačke Q. Ako tačka A u prostoru predmeta, krene da se podiže iznad ose sistema, doći će do tačke  $A_1$ , za koju krajnji zrak, koji ide u tačku P ulazne pupile, dodiruje ivicu M ulaznog prozorčića ( $D_p$ ). Vidno polje iz tačke  $A_1$ , naziva se vidno polje pune svetlosti. Pri daljem podizanju tačke A, ulazni prozorčić će seći delove snopa zraka, koji ide prema ulaznoj pupili, odnosno, neki zraci iz snopa biće zaustavljeni na samom ulaznom prozorčiću. Kada tačka A dođe u položaj  $A_2$ , tako da glavni zrak dodiruje tačku M ulaznog prozorčića, tada će biti odsečena cela gornja polovina snopa zraka. Vidno polje iz tačke  $A_2$  naziva se srednje vidno polje. Kada tačka A dođe u položaj  $A_3$ , tada će ceo snop zraka biti zaustavljen, a količina svetlosne energije koja iz tačke  $A_3$  ide prema ulaznom

otvoru optičkog sistema biće ravna nuli. Vidno polje iz tačke  $A_3$  naziva se potpuno vidno polje. Ova pojava, kada se ograničavanje vidnog polja vrši postepeno, naziva se vinjetiranjem.

Oko čoveka nije osetljivo na pad osvetljenosti prema kraju vidnog polja. Ono ne primećuje pad osvetljenosti i do 50 %. Radi toga, zbog smanjenja gabaritnih dimenzija optičkih sistema, može se konstruktivno dozvoliti pad osvetljenosti do 50%, odnosno vinjetiranje do 50%.

Obično u optičkim sistemima nije dozvoljeno vinjetiranje osnih zraka (zraka paralelnih sa optičkom osom), već je dozvoljeno samo vinjetiranje kosih zraka (zruci koji u optički sistem ulaze pod određenim uglom vidnog polja). Vinjetiranje se može planski izvesti radi smanjenja gabaritnih dimenzija projektovanog optičkog sistema. Ocena veličine vinjetiranja vrši se preko koeficijenta linearnog vinjetiranja i koeficijenta geometrijskog vinjetiranja. Koeficijent linearnog vinjetiranja definiše se jednačinom

$$k = \frac{D_u - D_{uk}}{D_u}, \quad (4.1)$$

gde su:

$k$  –koeficijent linearnog vinjetiranja,

$D_u$  –prečnik ulazne pupile,

$D_{uk}$  –prečnik snopa kosih zraka koji prolaze kroz ulaznu pupilu.

Koeficijent linearnog vinjetiranja može imati vrednosti od 0 (nema vinjetiranja – cela ulazna pupila je popunjena zracima), do 1 (potpuno vinjetiranje – nijedan zrak ne prolazi kroz ulaznu pupilu). Najčešće vrednosti koeficijenta linearnog vinjetiranja su od  $k=0.3$ , do  $k=0.5$ . Treba naglasiti da programi za projektovanje optičkih sistema obično ne dozvoljavaju vinjetiranje veće od 50%, tj. neophodno je potrebno da koeficijent linearnog vinjetiranja bude manji od 0.5 ( $k < 0.5$ ). Razlog za to je potreba da glavni zrak prođe kroz optički sistem. Glavni zrak se definiše kao zrak koji prolazi kroz centar aperturne dijafragme. Na osnovu prolaska glavnog zraka računa se prolazak svih ostalih kosih zraka.

Koeficijent geometrijskog vinjetiranja se definiše jednačinom

$$k_s = \frac{S_u - S_{uk}}{S_u}, \quad (4.2)$$

gde su:

$k_s$  –koeficijent geometrijskog vinjetiranja,

$S_u$  –površina ulazne pupile,

$S_{uk}$  –površina preseka snopa kosih zraka koji su prošli kroz ulaznu pupilu.

Koeficijent geometrijskog vinjetiranja može da ima iste vrednosti kao koeficijent linearnog vinjetiranja.

## 4.5 Relativni otvor i numerička apertura

U ovom poglavlju biće dato nekoliko neophodnih definicija za rad sa realnim optičkim sistemima.

Slobodni svetlosni otvor je mehanički otvor na prstenu, koji drži optički element (obično je to sočivo), i koji ograničava veličinu ulaznog snopa zraka. Slobodni svetlosni otvor se izražava preko prečnika kružnog otvora.

Relativni otvor, ( $f$  – broj) je odnos žižne dužine i prečnika otvora sistema

$$f - \text{broj} = \frac{f'}{D} \quad (4.3)$$

Ako fotografski objektiv ima žižnu dužinu od  $f' = 50$  mm i prečnik ulaznog otvora  $D = 25$  mm onda on ima  $f$  – broj 2 koji se uobičajeno obeležava kao  $f/2$  ili  $f:2$ .

Drugi način izražavanja ovog odnosa je pomoću numeričke aperture koja se definiše kao proizvod indeksa prelamanja sredine u kojoj se nalazi lik i sinusa polovine ugla vidnog polja. Ugao vidnog polja definiše se kao najveći ugao pod kojim može da uđe snop zraka u optički sistem, i da prođe kroz njega bez gubitaka. Matematička formulacije numeričke aperture je

$$\text{N.A.} = n \cdot \sin \omega, \quad (4.4)$$

gde su:

N.A. – numerička apertura,

$n$  – indeks prelamanja sredine u kojoj se nalazi lik,

$\sin \omega$  – sinus polovine ugla vidnog polja.

Numerička apertura i relativni otvor su, očigledno, dve metode koje definišu istu osobinu optičkog sistema. Numerička apertura se češće koristi kod sistema koji rade sa predmetima na konačnom rastojanju (mikroskopski objektiv), a relativni otvor se češće koristi kod sistema koji rade sa predmetima u beskonačnosti (objektivi kamera i teleskopski objektiv). Uzajamna veza između relativnog otvora i numeričke aperture definisana je jednačinom

$$f - \text{broj} = \frac{1}{2 \cdot \text{N.A.}} \quad (4.5)$$

T – broj je analogan  $f$  – broju (relativnom otvoru) stim što se uzima u obzir i transmisija kroz optički sistem. Transmisija se definiše kao deo ukupne energije koja je prošla kroz optički sistem. T – broj je definisan kao

$$T - \text{broj} = \frac{f'}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A \cdot t}} \quad (4.6)$$

gde su:

A – površina ulaznog otvora optičkog sistema,

$t$  – transmisija optičkog sistema.

Veza između T – broja i  $f$  – broja je definisana jednačinom

$$T - \text{broj} = \frac{f - \text{broj}}{t} \quad (4.7)$$