Dr Dragoljub Riđošić,
dipl. inž.
Mr Darko Vasiljević,
dipl. inž.,
Rade Krnjaja,
dipl. inž.

Neke metode za ocenu kvaliteta optičkih sistema

U radu je dat kratak osvrt na neke metode za objektivnu ocenu kvaliteta optičkih sistema sa posebnim naglaskom na osnovama matematičkog modela za proračun geometrijske i difrakcione optičke prenosne funkcije. Za dati matematički model opisan je originalni program i data je analiza rezultata za primer simetričnog objektiva.

Uvod

Optički sistemi imaju osnovni zadatak da izvrše prenos informacija pomoću elektromagnetnih talasa i projektovanja lika osmatranog objekta. Sposobnost optičkih sistema da »prenesu« raspodelu svetlosnog intenziteta sa ravni predmeta na ravan lika može se opisati pomoću optičke prenosne funkcije (Optical Transfer Function — OTF). Ako se zna raspodela svetlosne energije u prostoru predmeta može se rekonstruisati odgovarajuća raspodela svetla u ravni slike, pod pretpostavkom da poznajemo OTF. U radu se opisuju neke metode za ocenu kvaliteta lika sa detaljnim osvrtom na optičku prenosnu funkciju, kao vrlo značajnim elementom za objektivnu ocenu kvaliteta optičkih sistema.

Realni optički sistemi ne daju idealni lik (tačka se ne preslikava u tačku) već neki lik koji je u većoj ili manjoj meri deformisan. Sposobnost optičkog sistema da pravilno preslikava kontrast i geometrijski oblik predmeta zove se kvalitet lika. Parametri koji određuju kvalitet lika jesu stepen oštine lika u granicama vidnog polja, stepen deformacije oblika lika i njena obojenost. Ukoliko je izvršena pravilna korekcija prilikom proračuna optičkog sistema, kvalitet slike optičkog uređaja — instrumenta prvenstveno zavisi od tačnosti obrade optičkih elemenata i kvali-

teta stakla. Na kvalitet lika utiču i decentričnost sistema, zaostali naponi u staklu, kao i naprezanja izazvana prekomernim pritezanjem prilikom montaže i justaže optike.

Utvrđivanje kvaliteta lika, a time i kvaliteta optičkog sistema, predstavlja vrlo kompleksan problem prilikom ispitivanja optičkih uređaja. Radi toga je navedeno nekoliko metoda, a među njima su neke u najkraćim crtama samo prokomentarisane, s obzirom na to da su mnogo godina ranije razvijane i usaglašavane. Zbog toga su, pored merenja moći razlaganja i difrakcionog lika, u članku navedena osnovna saznanja iz ove oblasti, sa namerom da se kroz jedan primer pokaže složenost metoda za proračun optičke prenosne funkcije. U radu su predstavljene osnove matematičkog proračuna pomoću OTF sa posebnim osvrtom na geometrijski i difrakcioni OTF. Prikazan je program za proračun OTF sa dijagramima toka. Pomoću primera na simetričnom objektivu izvršena je komparacija geometrijskog i difrakcionog OTF sa analizom rezultata istraživanja.

Osvrt na metode za ocenu kvaliteta optičkih sistema

Kvalitet optičkih sistema može se ceniti u zavisnosti od kvaliteta formiranog lika i to upoređujući kontrast i

geometrijski oblik lika sa predmetom koji se posmatra. Postoji nekoliko metoda za ocenu kvaliteta lika, a time i kvaliteta optičkih sistema. Među najzastupljenijim načinima smatraju se metode merenja moći razlaganja, posmatranjem difrakcionog lika i merenjem OTF.

Proverom kvaliteta lika pomoću testa za razlaganje mogu se ustanoviti nedostaci lika u pogledu astigmatizma, krivine lika, sferne aberacije, hromatizma, kome, udvajanja lika, itd.

Astigmatizam se određuje kao razlika moći razlaganja horizontalnih i vertikalnih linija testa.

Krivina lika izražava se kao razlika linija na optičkoj osi i u polju, tj. van optičke ose.

Manifestacija sferne aberacije ogleda se u oku posmatrača kao oreoli.

Hromatizam se uočava tako što su krajevi lika od linije testa obojeni ljubičastim, zelenim i crvenim prugama.

Koma ispoljava linije testa u obliku komete.

Udvojenost lika uočava se ako je, pored osnovnog lika linije testa, prisutna još po jedna slabija slika.

Sve ove ocene često imaju subjektivan karakter i, obično, zavise od iskustva posmatrača.

Na moć razlaganja optičkih sistema, a time i kvalitet lika, utiče, takođe, i moć razlaganja njegovih komponenti, pa se pre montaže mora izvršiti kontrola, te u slučaju nepovoljne ocene izvršiti njihova dorada ili zamena. Osim spomenute kontrole potrebno je izvršiti proveru optičkih elemenata i podsklopova na veličinu napona pomoću specijalnih polarizacionih uređaja za procenu napona.

Drugi način provere kvaliteta optičkih sistema pomoću veštačke zvezde vrši se na osnovu difrakcionog lika koji se formira od beskonačno udaljene svetle tačke. Na osnovu ove metode mogu se ustanoviti sledeće nepravilnosti: sferna aberacija, hromatizam, astigmatizam, koma, decentriranje optičkog si-

stema, nehomogenost stakla, naponi u staklu nastali prilikom montaže, fine greške naleganja, itd. Kod kvalitetnih (dobro korigovanih) objektivna difrakcioni lik gledan ispred i iza žižine ravni ima oblik sistema pravilnih prstenova, pri čemu su svetliji ukoliko su udaljeniji od centra lika, a spoljašnji prsten, najširi i najsvetliji.

Sferna aberacija u slučaju »potkorekcije« uočava se pri posmatranju difrakcionog lika ispred žižine ravni objektivna, u položaju kada je prisutno 3—4 prstena, središnji prstenovi izgledaju slabi, a spoljni široki i svetli. Posmatranjem lika iza žižine ravni objektivna uočavaju se središnji prstenovi kao svetliji, a spoljašnji slabo izraženi. U slučaju »natkorekcije« sferna aberacija se manifestuje suprotno u odnosu na opisani način.

Hromatizam se manifestuje u obliku difrakcionog lika obojenog spektrom boja. Difrakcioni lik ispred žižine ravni objektivna ima izgled žuto-belog kruga sa crvenim vencem, a iza žižine ravni iste boje, ali bez crvenog venca.

Astigmatizam je izražen preko difrakcionog lika koji ima eliptični oblik. Prilikom posmatranja difrakcionog lika ispred i iza žižine ravni velika osa elipse menja svoj položaj za 90 stepeni.

Koma je izražena, kao što je i ranije spomenuto, kod testa za merenje moći razlaganja u obliku komete.

Nehomogenost stakla ima za posledicu veću deformaciju difrakcionih prstenova.

Naponi u staklu, takođe, izazivaju deformaciju difrakcionog lika slično prethodnom uzorku [9].

Za razliku od prethodnih metoda, optička prenosna funkcija opisuje sposobnost optičkog sistema da »preslika« raspodelu svetlosnog intenziteta sa ravni objekta na ravan lika. Ona sadrži kompleksne informacije o uticaju aberacija i difrakcije na proces preslikavanja predmeta. OTF se može prikazati u obliku:

$$\text{OTF} = \text{MTF} \cdot \exp(i \cdot \text{PTF}) \quad (1)$$

gde su:

MTF — modulaciona prenosna funkcija (modulation transfer function);

PTF — fazna prenosna funkcija (phase transfer function).

Sa fizikalnog stanovišta veći značaj ima MTF koja prikazuje kolika je relativna kontrastna osetljivost optičkog sistema od PTF koja određuje pomak slike u odnosu na optičku osu za vanosne svetlosne snopove.

Na slici 1 dat je karakterističan prikaz zavisnosti MTF od prostorne frekvencije:

Sl. 1 — Zavisnost MTF od prostorne frekvencije

U stranoj literaturi se često može naći MTF pod nazivom frekventivni odziv (frequency response), sinusni talasni odziv (sine wave response) i prenos kontrasta (contrast transfer). S obzirom na to da MTF predstavlja odnos relativnih kontrasta u ravni lika (k_1) i ravni predmeta (k_0):

$$MTF = \frac{k_1}{k_0} \quad (2)$$

onda se na slici 2 može pokazati modulacija lika kao funkcija frekvencije testa.

Najmanji izraz modulacije lika koju sistem može detektovati definiše granicu razlaganja optičkog sistema (slika 2a). Sistem je kvalitetniji ukoliko ima veću granicu razlaganja i veću modulaciju lika (k_1) slika 2 b-1. Međutim, ukoliko jedan sistem ima visoku granicu

razlaganja (slika 2 c-2), a drugi daje bolji kontrast (slika 2 c-1) za niže frekvencije testa, onda je teško reći koji je optički sistem bolji. Za ovakve karaktere-

Sl. 2 — MTF lika u funkciji frekvencije testa a) za granični slučaj razlaganja i minimalni nivo detekcije; b) u slučaju jednostavnog, i c) u slučaju složenog određivanja kontrasta 1. i 2. optičkog sistema

ristične slučajeve donosi se ocena na osnovu namene samog sistema, nudeći odgovor na pitanje šta je za funkciju tog sistema važnije — kontrast, tj. minimalni nivo detekcije ili razlaganja [4].

U teoriji su poznata dva načina proračuna OTF, i to:

— kao obrnuta Fourierova transformacija, funkcija intenziteta širenja tačke (intensity point spread function) najčešće koristeći Cooley — Turkey algoritam koji najbrže daje rezultat;

— kao dvodimenzionalni autokorelacioni integral funkcije pupile [1].

U dostupnoj stranoj literaturi [1, 2] pokazano je da autokorelaciona metoda ima mnogo praktičnih prednosti za proračun na računarima, pa je zato preuzeta za osnovu proračuna difrakcione optičke prenosne funkcije koji je ugrađen u program za automatizaciju projektovanja optičkih sistema — APOS [5, 6, 7].

Mac Donald u [1] predlaže uvođenje kanonskih koordinata u definisanje talasne aberacije i autokorelacionog integrala za proračun difrakcione OTF.

Kanonske koordinate prvi je definisao Hopkins kao relativne koordinate koje predstavljaju odnos između stvarnih i referentnih koordinata. Za proračun difrakcione OTF naročito su bitne kanonske koordinate ulazne (x i y) i izlazne (x' i y') pupile. One se definišu kao relativne koordinate stvarnog zraka na pupili u odnosu na osni znak na maksimalnoj dozvoljenoj visini $y=y_{\max}$. Ovako definisane koordinate pupile omogućavaju, kao što je pokazano u [1], da se ulazna i izlazna pupila definišu kao krugovi sa jediničnim radijusom. To veoma olakšava proračun difrakcione OTF koji se vrši po formuli:

$$D(\sigma, \tau) = \frac{1}{A} \int_P \int \exp\{ik \cdot [W(x'_s, y'_t) - W(x'_s - \sigma, y'_t - \tau)]\} dx'_s dy'_t \quad (3)$$

gde su:

$D(\sigma, \tau)$ — difrakciona optička prenosna funkcija;

σ, τ — sagitalna i tangencijalna komponenta redukovane prostorne frekvencije predmeta — rešetke sa N linijskih parova po mm nagnuto pod azimutom ψ_0 u odnosu na osu x (upravnu na meridionalnu ravan optičkog sistema). Redukovana prostorna frekvencija je bezdimenzionalna veličina, koja se definiše kao:

$$s = \frac{\text{stvarna prostorna frekvencija}}{\text{numerička apertura}}$$

*talasna dužina (4)

$W(x'y')$ — talasna aberacija izražena u kanonskim koordinatama izlazne pupile;

P — površina zajednička za dve pupile koje su predstavljene jediničnim krugovima sa centrima u (0,

0) i (σ, τ) u koordinatnom sistemu izlazne pupile (x' i y');

A — površina izlazne pupile za koju se sa dovoljno tačnosti može pretpostaviti da je elipsa u slučaju vanosnih zraka. Zbog korišćenja kanonskih koordinata pupile imamo elipsu sa jediničnim glavnim osama, pa je njena površina $A=\pi$;

k — koeficijent $k=2\pi/\lambda$, gde je λ — talasna dužina [1].

Uobičajeno je da se vrši proračun sagitalne i tangencijalne komponente difrakcione OTF i da se prikazuje zasebno. Kidger je u [2] dao konkretne formule za proračun difrakcione OTF i predložio da se prilikom integracije koristi metoda Gaussovih kvadratura. Kod optičkih sistema koji imaju rotacionu simetriju Kidger je uveo smanjene površine integracije zbog simetričnosti talasne aberacije u odnosu na meridionalnu ravan. Formule za proračun sagitalne i tangencijalne komponente difrakcione OTF su [2]:

— sagitalna komponenta:

$$D = \frac{4}{A} \cdot \int_{p/4} \int \cos\left\{\frac{k}{2} \cdot \left[W\left(x' + \frac{s}{2}, y'\right) - W\left(x' - \frac{s}{2}, y'\right) - W\left(x' + \frac{s}{2}, -y'\right) + W\left(x' - \frac{s}{2}, -y'\right)\right]\right\} \cdot \cos\left\{\frac{k}{2} \cdot \left[W\left(x' + \frac{s}{2}, y'\right) - W\left(x' - \frac{s}{2}, y'\right) + W\left(x' + \frac{s}{2}, -y'\right) - W\left(x' - \frac{s}{2}, -y'\right)\right]\right\} dx dy \quad (5a)$$

— tangencijalna komponenta:

$$D = \frac{4}{A} \cdot \int \int_{p/4} \cos \left\{ \frac{k}{2} \cdot \left[W \left(x', y' + \frac{s}{2} \right) - W \left(x', y' - \frac{s}{2} \right) - W \left(x', -y' + \frac{s}{2} \right) + W \left(x', -y' - \frac{s}{2} \right) \right] \right\} \cdot \exp \left\{ \frac{k}{2} \cdot \left[W \left(x', y' + \frac{s}{2} \right) - W \left(x', y' - \frac{s}{2} \right) + W \left(x', -y' + \frac{s}{2} \right) - W \left(x', -y' - \frac{s}{2} \right) \right] \right\} dx dy \quad (5b)$$

U [3] je prikazan prelazak sa proračuna difrakcione OTF na geometrijski OTF, odnosno sa proračuna OTF koji koristi talasne aberacije na OTF koji koristi poprečne aberacije definisane u geometrijskoj optici. Razvijanjem talasnih aberacija $W(x' + s/2, y')$ i $W(x' - s/2, y')$ u Taylorov red i zaustavljanjem na malim veličinama drugog reda dobija se:

$$W \left(x' + \frac{s}{2}, y' \right) - W \left(x' - \frac{s}{2}, y' \right) = s \cdot W'(x', y') \quad (6)$$

Poznato je da se poprečne aberacije mogu definisati na sledeći način [2, 3]:

$$\begin{aligned} \delta \eta' &= - \frac{1}{NA} \cdot \frac{\sigma W}{\sigma y} \\ \delta \xi' &= - \frac{1}{NA} \cdot \frac{\sigma W}{\sigma x} \end{aligned} \quad (7)$$

gde su:

$\delta \eta'$ i $\delta \xi'$ — poprečne aberacije u y i x pravcu;

NA — numerička apertura;

W — talasna aberacija;

Zamenom (6) u (5) i njihovim sređivanjem podintegralna funkcija postaje [3]:

— za sagitalni slučaj: $\exp(2\pi i f \delta \xi')$ (8a)

— za tangencijalni slučaj: $\exp(2\pi i f \delta \eta')$ (8b)

gde je:

f — stvarna prostorna frekvencija koja se izražava u linijskim parovima po mm.

Koristeći se u matematici poznatom relacijom:

$$e^{i\Phi} = \cos \Phi + i \cdot \sin \Phi$$

dobijaju se formule za proračun geometrijskog OTF:

— za sagitalni slučaj:

$$D = \frac{1}{A} \int \int_p [\cos(2\pi f \delta \xi') + i \cdot \sin(2\pi f \delta \xi')] dx dy \quad (9a)$$

— za tangencijalni slučaj:

$$D = \frac{1}{A} \int \int_p [\cos(2\pi f \delta \eta') + i \cdot \sin(2\pi f \delta \eta')] dx dy \quad (9b)$$

Pošto podintegralna funkcija ne zavisi direktno od koordinata x i y , integracija se može zameniti jednostavnim sabiranjem. Konačne formule za proračun geometrijskog OTF su:

— za sagitalni slučaj:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{f=1}^N [\cos(2\pi f \delta \xi') + i \cdot \sin(2\pi f \delta \xi')] \quad (10a)$$

— za tangencijalni slučaj:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{f=1}^N [\cos(2\pi f \delta \eta') + i \cdot \sin(2\pi f \delta \eta')] \quad (10b)$$

gde je:

N — ukupni broj prostornih frekvencija za koje se računa geometrijski OTF.

OTF može vrlo dobro da pokaže uticaj svih pomenutih aberacija i difrakcije na kvalteit lika. Poenta ovog rada ogleda se upravo u tome, nastojeći da ukaže na neke prednosti ove metode koja daje objektivniju ocenu kvaliteta optičkih sistema. Na slici 3 predstavljen je MTF objektiva za razne uglove u odnosu na optičku osu sistema.

Sl. 3 — MTF objektiva za razne uglove upada u odnosu na optičku osu

1) za upadni ugao 0° ; 2) za upadni ugao 10° ; 3) za upadni ugao 30°

Pomoću MTF mogu se sagledati uticaji difrakcije i sferne aberacije (osim distorzije), a pomoću PTF i distorzije. Aberacija tipa astigmatizma i kome utiču, kako na MTF, tako i na PMF [1]. Sa slike 3 se vidi da MTF opada monotonno sa porastom učestanosti, pa se objektiv po istoj analogiji ponaša kao filter niskih prostornih učestanosti. Na optičkoj osi MTF je najbolji, a faza je jednaka nuli. Sa porastom upadnog ugla MTF je lošiji, što se može povezati sa paraksijalnim područjem.

Prikaz programa za proračun optičke prenosne funkcije

Program za proračun i grafički prikaz geometrijskog OTF i difrakcione OTF ugrađen je u sklopu programskog paketa za automatizaciju projektovanja optičkih sistema APOS.

Dijagram toka programa za proračun geometrijskog OTF prikazan je na slici 4. Na samom početku prora-

čuna učitavaju se potrebni ulazni podaci koji se sastoje od:

— konstrukcionih parametara, kao što su: radiusi krivina prelomnih površina, njihova međusobna rastojanja, svetlosni otvori optičkih komponenti, indeksi prelamanja optičkih sredina, uvećanje, nemerička apertura i položaj aperturne dijafragme, ugao vidnog polja, vrednosti talasnih dužina na kojima radi optički sistem, i

— koordinate ulaznih zraka koje definišu položaj zraka na prvoj prelomnoj površini optičkog sistema.

Da bi se mogao vršiti proračun geometrijskog OTF, potrebno je propustiti, odnosno proračunati hod zraka kroz optički sistem za veliki broj zraka po unapred određenoj šemi. U [3] je predloženo da se ulazna pupila podeli na n koncentričnih krugova koji su podeljeni na segmente sa jednakom površinom koji su prikazani na slici 5. Zbog rotacione simetrije optičkih sistema dovoljno je da se radi samo sa jednom polovinom koncentričnih krugova. Na osnovu načina podele jasno je da za n koncentričnih krugova odgovara n^2 zraka pomoću kojih se vrši proračun hoda zraka kroz optički sistem. U našem slučaju izabrano je da se ulazna pupila deli na 7 koncentričnih krugova i da se kroz nju propušta 49 zraka sa kojima se vrši proračun hoda zraka kroz optički sistem.

Za proračun geometrijskog OTF interesantni su samo oni zraci koji prođu kroz ceo optički sistem. Za svaki zrak koji prođe kroz optički sistem računa se poprečna aberacija $\delta\eta'$ i $\delta\xi'$ koje se mogu definisati kao razlika između koordinata u ravni lika tekućeg zraka i referentnog (glavnog) zraka:

$$\begin{aligned}\delta\eta' &= y' - y'_{\text{ref}} \\ \delta\xi' &= x' - x'_{\text{ref}}\end{aligned}\quad (11)$$

Proračun hoda zraka kroz optički sistem i proračun odgovarajućih poprečnih aberacija za svaki zrak može da se vrši za određeni broj talasnih dužina

Sl. 4 — Dijagram toka programa za proračun geometrijskog OTF

(uobičajeno je da se radi za tri talasne dužine koje odgovaraju d, C i F liniji spektra) i za nekoliko uglova vidnog polja (uobičajeno je da se radi sa tri ugla vidnog polja $\omega=0^\circ$ — na osi, $\omega=0.7\omega_{\max}$ i $\omega=\omega_{\max}$). Može se zaključiti da se vrši proračun hoda zraka kroz optički sistem i odgovarajućih poprečnih aberacija za ukupno 441 zrak.

Sl. 5 — Prikaz raspodele zraka na ulaznoj pupili za proračun geometrijskog OTF

Nakon proračuna hoda zraka kroz optički sistem i odgovarajućih poprečnih aberacija prelazi se na samo određivanje geometrijskog OTF koji se proračunava u računarskoj petlji za tri ugla vidnog polja i za tri talasne dužine. Prvo se za svaki zrak koji je prošao kroz optički sistem računa vrednost članova zbira koji su definisani jednačinama (10a) za sagitalni slučaj i (10b) za tangencijalni slučaj. Po završetku tog dela proračuna prelazi se na neposredni proračun geometrijske OTF i to sagitalne komponente po jednačini (10a) i tangencijalne komponente po jednačini (10b) koja se izvršava onoliko puta sa koliko se prostornih frekvencija računa. U [3] predloženo je da se ovako dobijeni geometrijski OTF koriguje množeći sa vrednošću difrakcione OTF idealnog sistema.

Izlaz iz proračuna predstavlja grafički prikaz geometrijskog OTF sagitalne i tangencijalne komponente na ekranu računara i u vidu »meta fajla« — standardnog formata za razmenu grafičkih datoteka.

Dijagram toka programa za proračun difrakcione OTF prikazan je na slici 6.

Program počinje učitavanjem istih ulaznih podataka koji su potrebni i za proračun geometrijskog OTF. Ceo proračun difrakcione OTF vrši se za tri ugla vidnog polja. Na samom početku programa proverava se da li se vrši proračun sa osnim zracima (»slučaj na osi«) ili vanosnim zracima (»slučaj van ose«). Za slučaj na osi prvo se proračunava položaj i veličina referentne sfere u odnosu na koju će se meriti talasne aberacije. Zatim se prelazi na proračun optičke razlike puteva (optical path difference — OPD) sa kojom se definiše talasna aberacija. Prvo se računa referentni OPD, a zatim OPD za stvarne zrake kao razlika između referentnog OPD i OPD dobijenog hodom realnog zraka. Zajedno sa OPD računaju se i poprečna aberacija i Hopkinsove kanonske koordinate u izlaznoj pupili. Ceo ovaj proračun obavlja se za tri talasne dužine i za određeni broj zraka. Broj zraka za koji se računaju talasne aberacije treba tako usvojiti da bi se kasnije metodom najmanjih kvadrata mogli odrediti potrebni koeficijenti aberacionog polinoma. Za slučaj na osi talasna aberacija može se aproksimirati sledećim aberacionim polinomom [2]:

$$W = W_{00} + W_{20}(x'^2 + y'^2) + W_{40}(x' + y'^2)^2 + W_{60}(x'^2 + y'^2)^3 + W_{80}(x'^2 + y'^2)^4 \quad (12)$$

gde su:

- W — talasna aberacija,
- $W_{00}, W_{20}, W_{40},$ — koeficijenti aberacionog polinoma sa kojim se aproksimira talasna aberacija,
- W_{60}, W_{80}
- x', y' — kanonske koordinate u izlaznoj pupili.

Iz jednačine (12) jasno se vidi da imamo 5 koeficijenata aberacionog polinoma, pa je zato odlučeno da se talasna aberacija računa za 10 zraka da bi se na zadovoljavajući način moglo

Sl. 5 — Dijagram toka programa za proračun difrakcione OTF

izvršiti određivanje potrebnih aberacionih koeficijenata. Kada se oni proračunaju vrši se poređenje vrednosti talasne aberacije sračunate preko OPD i preko aberacionog polinoma. Ako je razlika tako dobijenih talasnih aberacija manja od dozvoljene greške to znači da aberacioni polinom dobro aproksimira talasnu aberaciju i da se može nastaviti sa samim proračunom difrakcione OTF, dok se u suprotnom slučaju, kada je razlika talasnih aberacija veća od dozvoljene, izdaje upozorenje o grešci i zaustavlja dalji proračun.

U slučaju van ose takođe se vrši proračun referentne OPD na osnovu hoda glavnog zraka kroz optički sistem. Proračun referentne OPD vrši se za tri talasne dužine. Zatim se računaju talasne aberacije preko OPD, poprečne aberacije i kanonske koordinate u izlaznoj pupili za određeni skup vanosnih zraka (kosih i vanmeridionalnih zraka). Broj potrebnih zraka za koji se računa OPD dobija se na osnovu broja koeficijenata aberacionog polinoma koji se određuju metodom najmanjih kvadrata. Za slučaj van ose talasna aberacija može se aproksimirati aberacionim polinomom [2]:

$$\begin{aligned}
 W = & W_{00} + \\
 & + W_{20}(x'^2 + y'^2) + W_{11}y' + \\
 & + W_{40}(x'^2 + y'^2)^2 + W_{31}(x'^2 + y'^2)y' + \\
 & + W_{22}y'^2 + \\
 & + W_{60}(x'^2 + y'^2)^3 + W_{51}(x'^2 + y'^2)^2y' + \\
 & + W_{42}(x'^2 + y'^2)y'^2 + W_{33}y'^3 + \\
 & + W_{80}(x'^2 + y'^2)^4 + W_{71}(x'^2 + y'^2)^3y' + \\
 & + W_{62}(x'^2 + y'^2)^2y'^2 + W_{53}(x'^2 + \\
 & + y'^2)y'^3 + W_{44}y'^4
 \end{aligned} \quad (13)$$

Iz jednačine (13) jasno se vidi da imamo 15 koeficijenata aberacionog polinoma, pa je zato odlučeno da se talasna aberacija računa za ukupno 24 zraka da bi se na zadovoljavajući način moglo izvršiti određivanje potrebnih aberacionih koeficijenata. Zraci su u prostoru pupile tako raspoređeni da su bliski jedan drugome na rubovima pupile, a mnogo ređe raspoređeni na cen-

tru pupile. Proračun koeficijenata aberacionog polinoma i odgovarajuće talasne aberacije vrši se za tri talasne dužine. Po završetku proračuna proverava se da li tako dobijena aberacija odstupa od talasne aberacije proračunate preko OPD za manje od unapred određene željene male vrednosti. Ako je uslov ispunjen, nastavlja se sa samim proračunom difrakcione OTF, a ako nije ispisuje se poruka o grešci i zaustavlja se dalji proračun. Sam proračun difrakcione OTF počinje sa određivanjem Gaussovih koeficijenata koji su potrebni za numeričko rešavanje integrala pomoću metode Gaussove kvadrature [10]. Numeričke vrednosti Gaussovih koeficijenata zavise od toga u koliko se tačaka može vršiti integracija. Program podržava integraciju sa 6, ili 16 tačaka. Jasno je da se, što se više tačaka koristi, dobija veća preciznost proračuna, ali je potrebno i veće vreme i veći računarski resursi da bi se sračunao integral. Difrakciona OTF se računa, kao i geometrijska OTF, a računarskoj petlji onoliko puta sa koliko prostornih frekvencija računamo. Prvo se pristupa proračunu redukovane prostorne frekvencije, pa zatim i samog difrakcione OTF, odnosno njene sagitalne i tangencijalne komponente, po formulama (5a) i (5b). Izlaz iz proračuna predstavlja grafički prikaz difrakcione OTF sagitalne i tangencijalne komponente.

Primer proračuna geometrijske i difrakcione OTF i analiza rezultata

Kao primer za prikaz proračuna geometrijske i difrakcione OTF može najbolje da posluži jedan klasični kvazi simetrični objektiv (double Gauss objective) koji je prikazan na slici 7. Objektiv ima sledeće osnovne podatke:

- žižna dužina $f = 50 \text{ mm}$;
- relativni otvor $f/2$;
- ugao vidnog polja $2\omega = 20^\circ$.

Po aberacijama spada među bolje u grupi simetričnih objektiv. Moguće primene ovakvog objektiva su:

- standardni fotoobjektiv;
- razne vojne primene kod kojih može da ima ulogu širokougaonog objektiva, npr. za CCD kameru.

Sl. 7 — Optička šema kvazi simetričnog objektiva

Za proračun geomatrijskog i difrakcionog OTF veoma je bitno koliki procenat zraka iz pretpostavljene šeme zraka prođe kroz optički sistem, tj. koliko je vinjetiranje sistema. To je naročito bitno za proračun difrakcione OTF, jer se pretpostavlja da izlazna pupila ima oblik elipse. Istraživanja sprovedena na Imperial Collgeu u Londonu [2, 3] pokazuju da je aproksimacija izlazne pupile opravdana jedino ako nema vinjetiranja optičkog sistema. U suprotnom, kada je vinjetiranje veliko, oblik izlazne pupile, kao što je prikazano na slici 8, znatno odstupa od elip-

Sl. 8 — Izgled izlazne pupile
a) izgled tipične izlazne pupile; b) izgled izlazne pupile pri velikom vinjetiranju

se. Zbog toga su moguće znatne greške u algoritmu za proračun difrakcione OTF.

Glavni uzroci grešaka pri proračunu geomatrijskog i difrakcione OTF su sledeći:

a — vinjetiranje sistema i prisustvo aberacija pupile, što uzrokuje neodgovarajući proračun poprečnih aberacija koji direktno utiče na geomatrijski OTF, odnosno posredno preko pretpostavljenog oblika izlazne pupile na difrakciona OTF;

b — odstupanje od upravnosti ravni lika na optičku osu za vanosne zrake koje se događa zbog postojanja krivine polja. Proračun aberacija i OTF se vrši pod pretpostavkom da je ravan lika normalna na optičku osu. Što je krivina polja veća to je zakrivljenost ravni lika izraženija pa su veće i greške pri proračunu poprečnih aberacija, aberacionog polinoma i OTF.

c — korišćenje neodgovarajućeg aberacionog polinoma zbog nedovoljnog broja tačaka ili neodgovarajućih vrednosti talasne aberacije koja se koriste u metodi najmanjih kvadrata. Provera ispravnosti koeficijenata aberacionog polinoma je ugrađena u sam program, ako se otkrije greška program se sam zaustavlja. Ova greška je moguća samo kod proračuna difrakcione OTF.

Prisustvo vinjetiranja sistema aberacija pupile ili krivine polja može se utvrditi samo detaljnim proučavanjem dobijenog dijagrama MTF. Sam program nije u mogućnosti da odredi da li će određeno prisustvo vinjetiranja, aberacije pupile ili krivine polja štetno uticati i koliko na proračun geomatrijskog ili difrakcione OTF.

Za opisani objektiv izvršen je proračun geomatrijskog i difrakcione OTF i rezultati proračuna prikazani su u vidu dijagrama. Dati su uporedni prikazi geomatrijskog OTF (GOTF) i difrakcione OTF (DOTF) za sledeće slučajeve:

- na osi na slici 9;
- za ugao vidnog polja $\omega = 0.7\omega_{\max}$ na slici 10;
- za ugao vidnog polja $\omega = \omega_{\max}$ na slici 11.

Na dijagramu sa slike 9 dat je uporedni prikaz geometrijskog i difrakcione OTF sračunat za osne zrake. Oba prikaza MTF se potpuno poklapaju sa teorijskim oblikom krive MTF koja je prikazana na slici 1, jer nije bilo ograničavajućih faktora koji unose greške u proračun OTF-a, kao što su vinjetiranje (svi zraci su prošli kroz optički sistem) ili krivina polja (koja se računa za glavni zrak a ne za osne zrake).

Sl. 9 — Uporedni prikaz GOTF i DOTF za slučaj na osi
1 — difrakciona OTF; 2 — geometrijski OTF

Na dijagramu sa slike 10 dat je uporedni prikaz geometrijskog i difrakcione OTF sagitalne i tangencijalne komponente sračunat za vanosne zrake pod uglom vidnog polja $\omega = 0.7\omega_{\max}$. Sa dijagrama se jasno vidi negativni uticaj navedenih faktora na proračun geometrijskog OTF. Sagitalna komponenta geometrijskog i difrakcione OTF bliske su očekivanim teorijskim vrednostima, jer su poprečne aberacije proračunate za x pravac dovoljno male, a i vinjetiranje sistema za ugao vidnog polja

$\omega = 0.1\omega_{\max}$ iznosi 11% od svih emitovanih zraka, što bitnije ne utiče na proračun sagitalne komponente geometrijskog i difrakcione OTF.

Kod tangencijalne komponente geometrijskog OTF dolazi do značajnog odstupanja proračunate vrednosti od očekivane teorijske vrednosti. Uzrok tome su relativno velike poprečne aberacije proračunate u y pravcu i postojanje krivine polja. Koordinate poprečne aberacije računaju se za ravan lika koja nije ravna (upravna na optičku osu) već je zakrivljena. Program pretpostavlja da su sve koordinate u ravni upravnoj na optičku osu i zato dolazi do grešaka, tj. do oscilovanja krive za tangencijalnu komponentu geometrijskog OTF. Pri proračunu tangencijalne komponente difrakcione OTF situacija je nešto bolja; proračunata kriva se dosta dobro poklapa sa očekivanom teorijskom krivom zato što poprečne aberacije

Sl. 10 — Uporedni prikaz GOTF i DOTF za ugao vidnog polja $\omega = 0.7\omega_{\max}$
1 — sagitalna komponenta geometrijskog OTF; 2 — tangencijalna komponenta geometrijskog OTF; 3 — sagitalna komponenta difrakcione OTF; 4 — tangencijalna komponenta difrakcione OTF

racije ne ulaze direktno u proračun difrakcione OTF već indirektno preko talasne aberacije. Tu postoje veće mogućnosti da se kompenzuje negativni uticaj poprečne aberacije.

Na dijagramu sa slike 11 dat je uporedni prikaz geometrijskog i difrakcione OTF sagitalne i tangencijalne komponente, sračunat za vanosne zrake pod uglom vidnog polja $\omega = \omega_{\max}$. Sa dijagrama se jasno vidi negativni uticaj sva tri faktora na proračun geometrijskog i difrakcione OTF. Pored relativno velikih poprečnih aberacija i krivine polja javlja se i vinjetiranje sistema koje sada iznosi 19% od svih emitovanih zraka. Za ovaj slučaj proračun geometrijskog OTF sagitalne i tangencijalne komponente potpuno odstupa od očekivanih teorijskih krivih. Kod proračuna difrakcione OTF može se zapažiti uticaj vinjetiranja sistema, naročito na tangencijalnu komponentu difrakcione OTF. U prva dva slučaja oblik izlazne pupile odstupa od pretpos-

tavljene elipse, pa zato dolazi do razilaženja između proračunatih i očekivanih teorijskih rezultata, tj. umesto monotonno opadajuće dobija se blago oscilujuća kriva.

Zaključak

Metode za ocenu kvaliteta lika optičkih sistema pomoću merenja moći razlaganja i utvrđivanja difrakcione lika su uobičajni postupci za proveru kvaliteta optičkih sistema. U pogledu kvalitativnog i kvantitativnog izražavanja određenih nepravilnosti u formiranju lika postoje izvesne teškoće zbog mogućnosti unošenja subjektivne ocene, pa treba težiti primeni metode meranja OTF koja može da utvrdi koji je minimalni nivo detekcije optičkog zračenja i koja je granica razlaganja određenog optičkog sistema. To ima prednosti jer se u procesu projektovanja optičkog sistema može izvršiti niz potrebnih simulacija na računaru za unapred definisane kriterije koji predstavljaju prag za nivo detekcije i granicu razlaganja.

Na osnovu provedenih istraživanja može se zaključiti:

— procenat prolaza zraka kroz optički sistem je vrlo bitan za proračun difrakcione OTF, a posebno geometrijskog OTF;

— dobro poklapanje obe optičke prenosne funkcije dobija se za osne zrake (sl. 9), dok je za vanosne zrake ($\omega = 0.7\omega_{\max}$ i $\omega = \omega_{\max}$) prisutan znatan uticaj poprečnih aberacija, krivine polja, kao i vinjetiranja sistema, zbog čega dolazi do vidnog odstupanja geometrijskog od difrakcione OTF i jednog i drugog od očekivane teorijske krive (sl. 10 i 11).

Rezultati proračuna potkrepljuju očekivanja u pogledu dobijanja informacija o kvalitetu lika na osnovama OTF.

Uporedni prikaz GOTF i DOTF za $\omega = \omega_{\max}$

Sl. 11 — Uporedni prikaz GOTF i DOTF za ugao vidnog polja $\omega = \omega_{\max}$

1 — sagitalna komponenta geometrijskog OTF; 2 — tangencijalna komponenta geometrijskog OTF; 3 — sagitalna komponenta difrakcione OTF; 4 — tangencijalna komponenta difrakcione OTF

Literatura:

- [1] J. Meadland: The calculation of the optical transfer fuction, *Optica Acta* no. 18, 1971.
- [2] M. Kidger: The calculation of the optical transfer fuction using gaussnan quadrature, *Optica Acta* vol. 25 no. 8, 1978.
- [3] Computer aided optical design, *materijali sa kursa održanog na Imperial College London*, 1982.
- [4] K. Barnes: The Optical Transfer Fuction, *Adam Hilger London*, 1971.
- [5] D. Vasilevjić: Prilog optimizaciji projektovanja optičkih sistema pomoću mikroracunara, *Magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd*, 1991.
- [6] D. Vasiljević, D. Ridošić: Automatizacija procesa projektovanja optičkih sistema pomoću računara, *VTG* no. 1991.
- [7] C. Vasiljević, D. Ridošić: Optimizacija u procesu projektovanja optičkih sistema, *NTP* no. 2, 1992.
- [8] D. S. Volosov: Fotografičeskaja optika, *Iskustvo Moskva*, 1971.
- [9] V. I. Konolov, A. D. Fedorovskij, G. P. Dubinskij: Optičeski sisetmi postroenia izobraženi, *Tehnika Kiev*, 1981.
- [10] G. Korn, T. Korn: Spravočnik po matematike dlja naučnih rabotnikov i inženerov, *Nauka, Moskva*, 1974.