

## Program za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema

Dr Darko Vasiljević, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Istraživanje obuhvata program za kompletno projektovanje, analizu i optimizaciju optičkih sistema. Detaljan opis izabranih delova programa, među kojima optimizacioni algoritmi predstavljaju značajan deo bilo kog programa za projektovanje optičkih sistema. Opisane su sledeće optimizacione metode: klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivni stacionarni genetski algoritam, dvočlana evolucionarna strategija EVOL, višestruke evolucionarne strategije GRUP, REKO i KORR. U prilogu je opisana komparativna analiza programa sa drugim komercijalno dostupnim programima za projektovanje optičkih sistema.

**Ključne reči:** Program za projektovanje optičkih sistema, projektovanje optičkih sistema, analiza optičkih sistema, optimizacija optičkih sistema.

### Uvod

KONSTRUKCIJI optičkih sistema prethodi proces projektovanja. Projektovanje obuhvata: određivanje radijusa krivina prelomnih površina, debljine, vazдушna rastojanja, prečnike različitih komponenti, i sve tipove stakala koji se koriste. Proces projektovanja optičkih sistema čini spoj nauke i kreativnosti, a zahteva strpljiv i kontinuiran istraživački rad. Pronalazak računara i razvoj programa za projektovanje optičkih sistema znatno su olakšali i unapredili rad današnjih projekatara optičkih sistema. Oni su omogućili nove načine analize optičkih sistema koji su bili nemogući pre pronalaska računara. Savremena tehnologija omogućava korisnicima da proračunavaju hod miliona zraka, istražuju i pronalaze najbolja moguća rešenja.

Iako postoje razlike u detaljima, osnovne postavke većine programa za projektovanje optičkih sistema su istovetne. Programi tipično imaju korisničko okruženje (grafičko, ili zasnovano na komandnoj liniji), deo za proračun hoda zraka kroz optički sistem i analizu, deo za optimizaciju, deo za analizu tolerancija i deo koji nudi proširenje programa pomoću specifičnog programiranja.

Program za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema, nastao je kao rezultat višegodišnjih istraživanja i razvoja. U prvom delu rada dat je opšti opis programa i njegovih mogućnosti. Kako je sličan drugim komercijalno dostupnim programima, nije se ulazilo u šire opisivanje. Glavna karakteristika programa su različite optimizacione metode koje pripadaju lokalnim i globalnim optimizacionim algoritmima. Opisane su sve optimizacione metode njihove implementacije u optimizaciji optičkih sistema. U završnici su opisana ograničenja programa za kompletno projektovanje i optimizacija optičkih sistema i sam program je upoređen sa drugim komercijalno dostupnim programima, kao što su SIGMA PC, ZEMAX, i OSLO. Dat je tabelarni prikaz glavnih karakteristika za sve

programe za projektovanje optičkih sistema koji se porede.

### Opis programa

Program ADOS (Automatsko projektovanje optičkih sistema) je samostalno razvijen program za projektovanje optičkih sistema. Njegov razvoj je počeo 1987. godine. Motivi sa kojima je pokrenut samostalan razvoj programa ADOS su sledeći:

- istraživanje u klasičnim i savremenim optimizacionim metodama i njihova primena u optimizaciji optičkih sistema;
- razvoj savremenih programa za projektovanje optičkih sistema zasnovanih na PC računarima. (U to vreme najsavršeniji programi za projektovanje optičkih sistema su bili veliki, skupi i korisnički neprilagođeni programi, koji su se izvršavali takođe, na, velikim i skupim računarima (mainframe računari). Većina programa su samostalno razvijani i nisu bili komercijalno dostupni);
- laka modifikacija programa za projektovanje optičkih sistema i mogućnost prihvatanja novih metoda proračuna i optimizacija za klasične optičke sisteme i proračun novih tipova optičkih sistema. Ova mogućnost je veoma značajna kada se program koristi za projektovanje kompleksnih optičkih i optoelektronskih sistema za vojne potrebe.

Pre početka razvoja programa, autor je razmotrio različita hardverska i softverska rešenja koja su mu bila dostupna. Najvažniji faktori u analizi hardverskih resursa su:

- odnos cena/performance je veoma dobar za PC zbog njihove niske cene u poređenju sa drugim tipovima računara (inženjerske grafičke radne stanice, mainframe računari, superračunari).
- brzina, koju za programe projektovanja optičkih sistema, karakteriše "broj proračunatih zraka po prelomnoj površini u sekundi" (RSS). Veličina RSS predstavlja broj zraka čiji hod računar može da proračuna od jedne

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

prelomne površine do druge za jednu sekundu. Prvi PC su koristili procesor koji je imao mogućnost proračuna približno 1000 RSS. To je bilo sporije od tadašnjih velikih računara, ali PC su se veoma brzo razvijali i moderni PC računari, koji koriste Intel Pentium procesore, sada mogu da proračunaju preko 1 000 000 RSS.

– dostupnost računara i programskih alata za razvoj izabranog računara.

Posle razmatranja svih hardverskih alternativa, autor se odlučio da razvija program na PC. Operativni sistem je bio MS DOS, a kada je razvijen MS Windows program je redizajniran da koristi grafički korisnički interfejs operativnog sistema Windows. Od početka autorova namera je bila da napiše korisnički orijentisan program za kompletno projektovanje i optimizaciju optičkih sistema. Ideja vodilja je bila da se napravi integrisano okruženje iz koga je korisnik mogao da obavi bilo koju operaciju potrebnu za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema, da su sve komande dostupne u menijima, tako da ih korisnik može izabrati na lak način i da je program zaštićen od grešaka. To znači da, bez obzira što korisnik uradi program će da prikaže poruku o grešci i uputstvo kako da se ispravno izvrši ta komanda. Korisnik ne mora više da pamti kompleksne sekvence komandi. Program ADOS ima sledeće karakteristike:

- može da projektuje i optimizuje različite tipove optičkih sistema kao što su različiti tipovi objektivna, okulara, afokalnih sistema, projekcionih sistema, kondenzora i kolimatora;
- različiti načini prikaza podataka u obliku tabela ili grafikona;
- podrška za bazu podataka o staklima poznatih proizvođača, npr. *Schott, Corning, Pilkington, O'Hara*;
- podrška za bazu podataka o optičkim sistemima različitih proizvođača, npr. *Melles Griot*;
- mogućnost da korisnik kreira bazu podataka sa svim optičkim sistemima na kojima je radio ili je sisteme koristio u procesu projektovanja optičkih i optoelektronskih sistema;
- veza između programa ADOS, gde korisnik može da optički projektuje sistem da ima minimum aberacija, i AutoCADa programa za dalje optomehaničko projektovanje. Ovo se postiže formiranjem script datoteka koje se mogu izvršavati u AutoCADu.

Kada se jednom optički sistem unese u računar, korisnik može da uradi različite analize da bi odredio kvalitet optičkog sistema. Uobičajeno je da se prvo proračunaju paraksijalni zraci, koji određuju osnovne osobine optičkog sistema. To su osobine koje opisuju žižnu dužinu, rastojanje lika, numeričku aperturu, uvećanje i veličine pupila i njihove položaje. Ponekad je korisno da se u tom trenutku uradi analiza aberacija trećeg reda (poznatih kao Seidelove aberacije, odnosno Seidelovi koeficijenti), koje omogućavaju projektantu da dobije preliminarnu ideju da li izabrani optički sistem ima šanse da zadovolji specifikacije. Za sve ostale analize potrebno je da se proračuna šema zraka, tj. snop zraka koji prolaze kroz optički sistem.

Program ADOS sadrži veliki broj standardnih metoda analize optičkih sistema koje se već decenijama koriste. Tradicionalni načini opisa kvaliteta lika optičkog sistema sadrže:

- proračun pet osnovnih monohromatskih aberacija: sferne aberacije, kome, astigmatizme, krivine polja i distorzije;
- proračun poprečnih zračnih aberacija;
- proračun hromatskih aberacija;

- proračun razlike optičkih puteva;
- proračun talasnih aberacija i
- proračun spot dijagrama i pronalazjenja najboljeg lika pomoću spot dijagrama.

Korišćenjem numeričke integracije i brzih Fourierovih transformacija (FFT), dostupne su i dodatne mogućnosti za analizu optičkih sistema kao što je modulaciona prenosna funkcija (MTF) koja opisuje relativni kontrast lika kao funkciju povećanja prostorne rezolucije. Program ADOS omogućava više tipova MTF analize, uključujući MTF u funkciji od ugla vidnog polja, pronalazjenje ravni najboljeg lika pomoću MTF-a i difrakcioni MTF.

Najvažniji dodatak programima za projektovanje optičkih sistema su optimizacione metode, kojima se polazni optički sistem modifikuje da bi se smanjile aberacije. Cilj optimizacije je da polazni optički sistem promeni i poboljša mu performanse (polazni optički sistem treba da ima potreban broj optičkih površina odgovarajućeg tipa, jer optimizacija može da promeni samo vrednosti parametara a ne broj i tip površina). Optički sistemi se definišu pomoću parametara povezanih sa pojedinačnim prelomnim površinama tog sistema. Svi ti parametri se mogu podeliti u dve glavne grupe:

- osnovni parametri koji moraju biti definisani za svaki pojedinačni optički sistem;
- opcioni parametri koji se definišu samo ako taj parametar postoji, npr. ako je prelomna površina asferična korisnik mora da definiše asferične konstante. Osnovni parametri su sledeći parametri:
  - radijus krivine za svaku površinu optičkog sistema;
  - rastojanje između dve površine optičkog sistema;
  - stakla od kojih su napravljene komponente optičkog sistema i
  - slobodni svetlosni otvor za svaku površinu optičkog sistema.

Da bi optički sistem mogao potpuno definisati i analizirati korisnik treba pored osnovnih parametara da definiše i šemu zraka koja opisuje sve zrake čiji će se hod proračunavati kroz optički sistem. Korisnik može definisati parametre optičkog sistema (npr. radijusi, debljine optičkih elemenata, tipovi stakala, vazdušna rastojanja) koji se mogu menjati prilikom optimizacije. Optimizacija optičkog sistema se vrši promenom parametara i minimizacijom funkcije za ocenu.

Budući da optimizacija funkcije za ocenu pronalazi lokalni minimum, ostaje zadatak projektantu da polazni optički sistem dovede do odgovarajućeg kvaliteta pre optimizacije tako da je lokalni minimum blizak globalnom minimumu. Drugim rečima, nije moguće izabrati pet planparalelnih ploča od proizvoljnog stakla i očekivati da program pronađe optimalno rešenje.

Metode globalne optimizacije su dosta napredovale, ali korisnik mora biti veoma pažljiv sa njima. Iako globalna optimizacija može biti veoma korisna metoda u skupu metoda koje koristi projektant optičkih sistema, ona ne može da zadovolji projektantovu želju za automatskim pronalazjenjem najboljeg optičkog sistema. Uopšteno, globalna optimizacija može da pronađe brojne polazne tačke sa kojih projektant može da koristi lokalnu optimizaciju. Optimizacija je suštinski deo programa i biće razmotrena u nastavku rada.

## Optimizacija

Koncept optimizacije je jednostavan, ali njegova

implementacija može biti veoma komplikovana. Implementacija se može definisati kao određivanje skupa sistemskih promenljivih koji minimizuje odstupanje stvarnih performansi od željenih performansi, bez povrede graničnih uslova za zadati polazni sistem i skup željenih performansi. Ovaj, na jednostavan način definisan problem, postaje veoma složen kada je velik broj promenljivih i željenih performansi, kada su greške nelinearne funkcije varijabli i kada greške nisu ortogonalne jedna na drugu u odnosu na promenljive. U tipičnom slučaju optimizacije optičkog sistema svi ovi uslovi su u određenoj meri istiniti.

Kada se radi sa različitim tipovima optimizacionih metoda, obično se definiše jedan broj, koji se naziva funkcija za ocenu, da karakteriše poklapanje performansi trenutnog sistema sa željenim performansama sistema. Drugim rečima, funkcija za ocenu je mera efikasnosti optimizacione metode, jer je cilj optimizacije da smanji vrednost funkcije za ocenu.

Izbor odgovarajuće funkcije za ocenu je od suštinskog značaja za uspešan završetak procesa optimizacije. Matematički posmatrano najviše odgovara da se funkcija za ocenu predstavi u kvadratnoj formi. Taj tip funkcije za ocenu je korišćen i u svim optimizacionim metodama koje su korišćene u programu ADOS (metoda prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivni stacionarni genetski algoritam, evolucione strategije EVOL, GRUP, REKO i KORR). Funkcija za ocenu se može definisati kao zbir kvadrata aberacija:

$$\psi = \sum_{i=1}^m (\omega_i \cdot f_i)^2 \quad (1)$$

gde su:  $\psi$ - vrednost funkcije za ocenu;  $m$ - broj promenljivih parametara optimizacije;  $\omega_i$ - težinski faktor za svaku aberaciju posebno i  $f_i$ - pojedine aberacije koje su proračunate pomoću hoda zraka kroz optički sistem.

Težinski faktor za svaku proračunatu aberaciju je neophodan, jer se proračunavaju različiti tipovi aberacija (poprečne, ugaone i talasne) koje mogu da se mnogo razlikuju. Da bi optimizaciona metoda mogla da poredi aberacije i smanjuje njihove vrednosti, potrebno ih je dovesti na uporedive vrednosti.

### Klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata

Metoda najmanjih kvadrata je modifikacija Newton – Raphsonove metode koju je razvio Levenberg [1]. Prvi koji su ovu metodu upotreбили u optimizaciji optičkih sistema su bili: Rosen i Eldert [2], Merion [3,4], Wynne [5]. Metoda prigušenih najmanjih kvadrata (DLS) razvijena je posle perioda intenzivnih istraživanja i eksperimentisanja krajem pedesetih i tokom šezdesetih godina. Sada skoro svaki program za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema ima neku varijantu DLS optimizacije. Na osnovu iskustva u radu tom metodom, može se potvrditi da je DLS optimizacija veoma efikasna i opšta metoda dostupna projektantu optičkih sistema. Autorova implementacija metode prigušenih najmanjih kvadrata zasnovana je na radovima istraživača sa *Imperial Collegea* u Londonu (Wynne, Wormell i Kidger [6-9]). Detaljan opis same metode primenjen u optimizaciji optičkih sistema dat je u [10]. Metoda prigušenih najmanjih kvadrata spada u grupu linearnih optimizacionih metoda koje eksplicitno ne uzimaju u obzir da možda postoji veliki broj lokalnih minimuma funkcije za ocenu u prostoru svih promenljivih optičkog sistema. Broj lokalnih minimuma zavisi od oblika funkcije za ocenu i broja promenljivih parametara optičkog sistema. Metoda prigušenih najmanjih kvadrata, obično,

Metoda prigušenih najmanjih kvadrata, obično, dovodi funkciju za ocenu optičkog sistema u lokalni minimum koji je najbliži polaznom optičkom sistemu. Projektant optičkih sistema ima nekoliko mogućnosti, pored programa za projektovanje optičkih sistema, koje mu omogućavaju da pronađe zadovoljavajući optički sistem. To su:

- izbor odgovarajućeg polaznog optičkog sistema. Ako optički sistem ne obezbeđuje zahtevani kvalitet lika, projektant optičkih sistema može da pokuša sa drugim obično potpuno drugačijim optičkim sistemom;
- izbor promenljivih konstruktivnih parametara za optimizaciju. Pogrešan izbor promenljivih može sprečiti linearnu konvergenciju;
- težinski faktori koji se koriste u formulisanju funkcije za ocenu. Dobar izbor veličina težinskih faktora je od suštinskog značaja u uravnotežavanju aberacija;
- izbor faktora prigušenja (prigušenje sabiranjem ili prigušenje množenjem) i mogućnost modifikovanja kompletne funkcije za ocenu.

Realizacija svih prvih mogućnosti zavise od veštine i iskustva projektanta optičkih sistema. Tako i iskusen projektant može imati teškoća u traženju zadovoljavajućeg rešenja za projekat optičkog sistema vrhunskog kvaliteta.

### Evolucionarna optimizacija

Evolucionarna optimizacija je jedan od mogućih načina poboljšanja klasične optimizacije. Sve metode klasične optimizacije pripadaju metodama lokalne optimizacije, pošto one garantuju pronalazak samo lokalnog minimuma najbližeg polaznoj tački. One eksplicitno ne uzimaju u obzir da možda postoji veliki broj lokalnih minimuma funkcije za ocenu u prostoru pretraživanja. Evolucionarna optimizacija traži onoliko lokalnih minimuma koliko može da pronađe i bira najbolji među njima. Evolucionarna optimizacija pripada metodama globalne optimizacije.

Evolucionarna optimizacija je zasnovana na analogiji iz prirode. Sav živi svet na našoj planeti se razvio prema Darwinovoj teoriji evolucije. Na osnovu toga se pokušava primeniti pojednostavljena Darwinova teorija evolucije u optimizaciji tehničkih sistema. Genetski algoritmi stavljaju akcenat na proces selekcije i ukrštanje, dok evolucione strategije stavljaju akcenat na mutacije zasnovane na normalnoj raspodeli.

### Genetski algoritmi

Osnovne principe genetskih algoritama (GA) prvi je definisao Holland [12] uopšteno i De Jong [13] za GA optimizaciju. Autorova implementacija GA optimizacije se zasniva na adaptivnom stacionarnom genetskom algoritmu bez duplikata (ASSGA), koji je opisan u [14]. Detaljan opis ASSGA primenjen u optimizaciji optičkih sistema nalazi se u autorovoj doktorskoj disertaciji [15] i nekim radovima koji opisuju teoriju i primenu ASSGA metode u optimizaciji optičkih sistema [16 - 18].

Klasični GA, kao na primer prosti genetski algoritam (SGA) ili genetski algoritam sa elitizmom (EGA), uobičajeno koriste bit stringove, dok ASSGA koristi realne brojeve. Veoma je važno da genetski algoritam radi sa realnim brojevima pošto je on deo programa za kompletno projektovanje optičkih sistema. Svi važni podaci o optičkom sistemu se smeštaju u jedan rekord koji predstavlja jednu jedinku u populaciji.

Populacija optičkih sistema se inicijalizuje na slučajan

način. Pošto projektant ne može unapred da zna dobre optičke sisteme koji će da predstavljaju polaznu tačku za optimizaciju, najbolji način je početi optimizaciju sa slučajno raspoređenim tačkama i prepustiti da GA uradi ostatak posla.

To znači, da projektant optike treba da ima optički sistem koji ispunjava sve potrebne uslove i da se promenljivi konstrukcioni parametri menjaju na slučajan način po uniformnoj raspodeli ili po Gaussovom zakonu normalne raspodele. Svaki optički sistem, koji je na slučajan način generisan na osnovu polaznog optičkog sistema, mora da bude ispravan optički sistem koji ispunjava sve paraksijalne uslove, ima sračunatu šemu zraka i sve aberacije i nema povrede geometrijskih graničnih uslova. Važno je naglasiti da samo ispravni optički sistemi mogu da budu članovi populacije.

Jedan od najvažnijih činilaca u definisanju GA optimizacije je pravilno određivanje funkcije za ocenu. GA optimizacija koristi istu funkciju za ocenu koju koristi i klasična DLS optimizacija i koja se sastoji od sume kvadrata aberacija.

Zbog slučajno izabranih polaznih tačaka za optimizaciju, funkcije za ocenu optičkog sistema obično se puno razlikuju. Da bi ih bilo moguće porediti, potrebno je uvesti linearnu normalizaciju koja predstavlja interpolaciju funkcija za ocenu od početne do krajnje tačke. Vrednosti za početnu tačku, krajnju tačku i korak su parametri implementacije GA optimizacije i projektant optičkih sistema može da ih različito izabere za svako startovanje optimizacije. Selekcija roditelja se vrši pomoću simulacije ruleta, koja daje više reproduktivnih šansi optičkim sistemima koji imaju bolju funkciju za ocenu (manje aberacije).

GA optimizacija koristi stacionarnu selekciju bez duplikata za reprodukciju zato što će svaki član populacije biti različit i najbolje jedinke iz svih generacija će biti sačuvane, a samim tim i sve značajne genetske informacije.

Pošto su izabrana dva različita roditelja, primenjuje se samo jedan genetski operator, koji se bira simulacijom ruleta iz sledećeg skupa genetskih operatora:

- uniformno ukrštanje,
- srednje ukrštanje,
- mutacija realnih brojeva,
- veliko puzanje brojeva i
- malo puzanje brojeva.

Novi potomak se takmiči sa svim članovima populacije za mesto u njoj. Ako je on bolji, tj. ima manju funkciju za ocenu i aberacije od najlošijeg člana populacije, novi potomak se prihvata i najlošiji član populacije se briše.

### Evolutione strategije

Evolutione strategije (ES) su algoritmi koji imitiraju principe prirodne evolucije, kao što su mutacija, rekombinacija i selekcija kao metoda za rešavanje problema parametarske optimizacije. Bienert, Rechenberg i Schwefel razvili su ih sredinom 60-ih godina na Tehničkom univerzitetu u Berlinu [19]. Od tada one su se razvile od relativno jednostavnih ES do moćnih, robusnih i samoprilagođujućih metoda za matematičku i tehničku optimizaciju. Glavna oblast primene ES je optimizacija višedimenzionalnih kontinualnih problema. ES imaju dobre performanse u oblastima gde je nemoguće, teško ili skupo da se pronađe tačan matematički opis problema.

Autor je implementirao sledeće evolutione strategije u optimizaciji optičkih sistema:

- dvočlane ES koje su nazvane EVOL,
  - višočlane ES koje su nazvane GRUP, REKO i KORR.
- Opis svih tih evolutionih strategija primenjenih u optimizaciji optičkih sistema nalaze se u autorovoj doktorskoj disertaciji [15] i radovima [20-21]. Najopštiji algoritamski opis ES, dat u [22], je sledeći:
1. Problem se definiše kao pronalaženje  $n$  dimenzionalnog vektora  $x$  sa realnim brojevima koji je povezan sa minimumom funkcije  $F(x)$ .
  2. Početna populacija vektora roditelja  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , se bira na slučajan način iz dostupnog skupa za svaku dimenziju. Raspodela početnih jedinki je tipično uniformna.
  3. Potomak, vektor  $x'_i$ , se kreira od svakog roditelja  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , sabirajući svaku komponentu vektora  $x$  sa Gaussovom slučajnom promenljivom sa nultom srednjom vrednošću i unapred određenom standardnom devijacijom.
  4. Selekcija pomoću rangiranja grešaka  $F(x_i)$  i  $F(x'_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , određuje koji će se od tih vektora zadržati.  $N$  vektora, koji imaju najmanje greške, postaju novi roditelji za sledeću populaciju.
  5. Proces generisanja novih jedinki i izbora odgovarajućih jedinki sa najmanjom greškom se nastavlja dok se ne pronađe optimalno rešenje, ili se potroši dozvoljeno računarsko vreme.

Optimizacija optičkih sistema je veoma specifična i evolutione strategije moraju da se adaptiraju. Da bi se počela optimizacija sa evolutionim strategijama, potrebna je polazna tačka, tj. polazni optički sistem. Taj sistem mora da bude ispravan, tj. mora da ispunjava sve potrebne geometrijske granične uslove. Ako je polazni optički sistem ispravan, tada se mogu sračunati aberacije i funkcija za ocenu i nastaviti sa pretragom za poboljšanim optičkim sistemom. Ako polazni optički sistem ne ispunjava sve uslove, potrebno je formulisati pomoćnu funkciju za ocenu koja predstavlja meru odstupanja od geometrijskih graničnih uslova. Takva pomoćna funkcija za ocenu se optimizuje pomoću evolutionih strategija. Proces optimizacije se zaustavlja kada su svi uslovi ispunjeni, tj. kada je pomoćna funkcija za ocenu jednaka nuli.

Posle detaljnog testiranja polaznog optičkog sistema, potrebno je napraviti polaznu populaciju pomoću slučajnih promena polaznog optičkog sistema prema Gaussovom zakonu normalne raspodele. Svaki novi optički sistem treba potpuno testirati:

- proračunom svih neophodnih paraksijalnih veličina;
- proračunom šeme zraka;
- proverom geometrijskih graničnih uslova i
- proračunom aberacija i funkcije za ocenu.

Ako je novi optički sistem ispravan, on se prihvata u populaciju, u suprotnom on se odbacuje. Kada se cela inicijalna populacija popuni, evolutioni proces može da počne. Prvi korak je formiranje novog optičkog sistema primenom genetskih operatora. Različite ES metode imaju različite genetske operatore:

- EVOL i GRUP imaju samo jedan genetski operator – tačkastu mutaciju;
- REKO ima dva genetska operatora:
  - mutaciju promenljivih parametara prema Gaussovom zakonu normalne raspodele;
  - rekombinaciju koraka optimizacije;

- KORR ima pet različitih genetskih operatora:
  - mutaciju promenljivih parametara prema Gaussovom zakonu normalne raspodele;
  - diskretnu rekombinaciju parova roditelja;
  - srednju rekombinaciju parova roditelja;
  - diskretnu rekombinaciju između svih roditelja u populaciji;
  - srednju rekombinaciju između parova svih roditelja.

U metodi KORR svi genetski operatori mogu se primeniti na:

- promenljive parametre optičkog sistema;
- korake optimizacije i
- uglove rotacije mutacionog hiperelipsoida.

Kada genetski operatori naprave novi optički sistem, optimizaciona metoda mora da odluči da li je optimizacija moguća ili ne. Ako optimizacija nije moguća i optimizaciona metoda traži novu polaznu tačku (ispravan optički sistem), tada se testiraju geometrijski granični uslovi za novi optički sistem. Ako su svi uslovi ispunjeni, novi ispravan optički sistem je pronađen i optimizacija se završava. Potrebno je da se ona ponovo startuje sa tim optičkim sistemom kao početnim optičkim sistemom.

Ako je optimizacija moguća, tada se testira novi optički sistem, a ako je optički sistem u redu, on se prihvata u populaciju. Proces formiranja, testiranja i prihvatanja novih optičkih sistema se ponavlja sve dok se celokupna nova populacija ne popuni. Posle formiranja nove populacije, biraju se najbolji optički sistemi sa minimalnom funkcijom za ocenu da postanu roditelji za sledeću generaciju. Važno je da optimizaciona metoda „zna” u svakom trenutku, koji optički sistem je najbolji, tj. sa minimalnom funkcijom za ocenu i aberacijama.

Različite ES metode imaju različite načine izbora roditelja za sledeću generaciju:

- EVOL ima samo dve jedinke roditelja i potomka i jednostavnim poređenjem bolja jedinka (optički sistem sa manjom funkcijom za ocenu i aberacijama) postaje roditelj za sledeću generaciju;
- GRUP i REKO imaju sledeće šeme izbora roditelja: populacija se sastoji iz  $\mu$  roditelja koji generišu  $\lambda$  potomaka ( $\lambda \geq 6\mu$ ).  $\lambda$  potomaka međusobno biraju  $\mu$  najboljih potomaka da postanu roditelji za novu generaciju. Jasno je da je to generacioni tip ES, što znači da svaka jedinka živi samo jednu generaciju.
- KORR ima dve mogućnosti izbora roditelja za sledeću generaciju:
  - Plus strategija – roditelji i potomci prave populaciju iz koje se biraju najbolji pojedinci da postanu roditelji za sledeću generaciju. Teoretski je moguće da jedna jedinka živi nekoliko generacija.
  - Koma strategija – roditelji za novu generaciju se biraju jedino iz trenutne generacije potomaka. Ovde svaka jedinka živi samo jednu generaciju. Za koma strategiju potrebno je da broj potomaka bude veći od broja roditelja. Schwefel u [19] tvrdi da je odnos broja potomaka i roditelja povezan sa brzinom konvergencije optimizacije i da mora biti veći od 6, a manji od 10.

Na kraju svake generacije optimizaciona metoda testira ispunjenje sledećih kriterijuma konvergencije:

- koraci optimizacije mora da budu manji od prethodno definisane male vrednosti;
- razlika između dve susedne funkcije za ocenu mora da

bude manja od prethodno definisane male vrednosti.

Za kontrolu koraka optimizacije EVOL koristi pravilo 1/5 uspeha, koje je u skladu sa teorijskim rezultatom, a u proseku jedna od pet mutacija treba da proizvede poboljšanje funkcije za ocenu. Pravilo 1/5 uspeha glasi da odnos uspešnih mutacija prema ukupnom broju mutacija treba da bude 1/5. Ako je odnos veći od 1/5, optimizaciona metoda treba da poveća korak optimizacije, u suprotnom, da smanji korak optimizacije. GRUP, REKO i KORR nemaju fiksno pravilo za kontrolu koraka optimizacije. Njihovi koraci optimizacije postaju promenljivi parametri i mogu se menjati zajedno sa drugim promenljivima u optimizaciji. Na taj način se priroda simulira mnogo tačnije.

Ako je bilo koji kriterijum ispunjen, tada se optimizacija završava i trenutno najbolji optički sistem postaje optimalan optički sistem. Ako kriterijumi konvergencije nisu ispunjeni, nova generacija se startuje i prave se novi optički sistemi.

### Ograničenja programa i poređenje sa drugim komercijalno dostupnim programima za projektovanje optičkih sistema

Program ADOS je razvijen kao rezultat istraživanja u klasičnim i novim globalnim optimizacionim metodama u projektovanju optičkih sistema i kao sredstvo za rešavanje problema projektovanja kompleksnih optičkih i optoelektronskih sistema. To je proizvod istraživanja i razvoja samo jednog čoveka tokom više od deset godina.

U ovom trenutku na otvorenom tržištu postoje četiri tipa programa za optičko inženjerstvo, koji pokrivaju različite delove optičkog inženjerstva:

- Programi za projektovanje optičkih sistema su poznati i kao klasični programi za proračun hoda zraka, oni omogućavaju da se optički sistem projektuje, analizira, optimizira i toleriše. Idealni su za projektovanje različitih objektivna, teleskopa i mikroskopa zato što omogućavaju moćne metode optimizacije sa izraženim mogućnostima analize lika. Tipični programi u ovoj kategoriji su CODE V firme *Optical Research Associates*, OSLO firme *Sinclair Optics*, SIGMA firme *Kidger Optics*, ZEMAX firme *Focus software*.
- Programi za proračun nesekvencijalnog hoda zraka, koji se koriste za modelovanje optičkih sistema u kojima svetlost može da se prostire po više putanja, ili u kojima se svetlost višestruko odbija. Tipičan predstavnik ovog tipa programa je OptiCAD firme *OptiCAD Corporation*.
- Programi za fizičku optiku koji predstavljaju svetlost kao elektromagnetno polje sa amplitudom i fazom. Oni su neophodni kada se mora razumeti fizikalnost problema. Tipične primene ovog tipa programa su projektovanje lasera, fotolitografija, difraktivna optika za kontrolu snopa. Reprezentativan program za ovu grupu je GLAD, firme *Applied Optics Research*.
- Programi za projektovanje tankih slojeva se koriste za projektovanje optičkih slojeva neophodnih za dobar optički sistem. Tipičan predstavnik je Essential Macleod, firme *Thin Film Center*.

Program ADOS može se porediti samo sa programima iz prve grupe. Veoma je važno primetiti da su skoro svi programi u toj grupi rezultat veoma dugog razvojnog procesa (uobičajeno dužeg od dvadeset godina) i složenih timova istraživača i programera (obično više od deset). Oni pokrivaju skoro sve što je projektantu optičkih sistema potrebno u njegovom standardnom poslu.

Program ADOS, u poređenju sa tim programima, ima mnoga ograničenja koja su rezultat sledećih faktora:

- program ADOS ima samo one mogućnosti koje su neophodne za svakodnevni rad projektanta optičkih sistema za vojne namene. Mogućnosti potrebne za razvoj drugih tipova optičkih sistema nisu uključene u program. Na primer program podržava samo sferne i asferične površine i ne podržava toroidne površine i difrakcione rešetke;
- vreme razvoja u poređenju sa drugim komercijalnim programima i samo jedan istraživač veoma su ograničili razvoj programa, tako da kompletne oblasti u projektovanju optičkih sistema nisu uključene (npr. tolerisanje optičkih sistema, različiti proračuni iz fizičke optike kao što su tačkasta prenosna funkcija, linijska prenosna funkcija, talasna analiza, polarizacija).

U oblasti optimizacije optičkih sistema program ADOS se može porediti sa bilo kojim drugim programom za projektovanje optičkih sistema. ADOS ima jedinstvene metode globalne optimizacije, kao što su: adaptivni stacionarni genetski algoritam, evolucione strategije koje nisu dostupne u drugim programima za projektovanje optičkih sistema. Kao pokaz mogućnosti programa ADOS i tri komercijalno dostupna programa (SIGMA, ZEMAX i OSLO) je dat u tabeli 1.

**Tabela 1.** Komparativna analiza programa za projektovanje optičkih sistema

		ADOS	SIGMA	ZEMAX	OSLO
Tipovi površina	Sferne	Da	Da	Da	Da
	Asferične	Da	Da	Da	Da
	Cilindrične	Ne	Da	Da	Da
	Toroidalne	Ne	Da	Da	Da
	Difrakcione rešetke	Ne	Da	Da	Da
Hod zraka	Korisnički definisane	Ne	Ne	Da	Da
	Paraksijalni	Da	Da	Da	Da
	Seidel	Da	Da	Da	Da
	Bucdahl	Ne	Da	Da	Da
	Hod zraka po MIL-u	Da	Da	Da	Da
Analiza (grafika)	proračun aberacija	Da	Da	Da	Da
	abercije	Da	Da	Da	Da
	OPD	Da	Da	Da	Da
	Spot diagram	Da	Da	Da	Da
	Ravan najboljeg lika	Da	Da	Da	Da
	Geometrijski MTF	Da	Da	Da	Da
	Difrakcioni MTF	Da	Da	Da	Da
	Gaussovi zraci	Ne	Da	Da	Da
	3D talasni front	Ne	Da	Da	Da
	Tačkasta prelomna funkcija	Ne	Da	Da	Da
Optimizacija	Linijska prelomna funkcija	Ne	Da	Da	Da
	Prigušeni najmanji kvadrati	Da	Da	Da	Da
	Globalna Prosti GA	Ne	Ne	Da	Ne
	Adaptivno simulirano očvršćavanje	Ne	Ne	Ne	Da
	ASSGA	Da	Ne	Ne	Ne
	EVOL ES	Da	Ne	Ne	Ne
Alati	GRUP ES	Da	Ne	Ne	Ne
	REKO ES	Da	Ne	Ne	Ne
	KORR ES	Da	Ne	Ne	Ne
	Izvoz u CAD	Da	Da	Da	Da

	programe				
	Tolerisanje	Ne	Ne	Da	Da
	Polarizacija	Ne	Ne	Da	Da
	Iluminaciona analiza	Ne	Ne	Da	Da
	Zoom optički sistemi	Ne	Da	Da	Da

### Zaključak

Program ADOS za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema je rezultat višegodišnjeg istraživanja i razvoja projektovanja optičkih sistema, naročito u klasičnim i savremenim optimizacionim algoritmima. Razvijen je sa željom da bude integrisana okolina gde projektant optičkih sistema može da uradi sve neophodne stvari za projektovanje, analizu i optimizaciju optičkih sistema. ADOS ima grafički korisnički interfejs koji je sada standard za sve Windows aplikacije i koji je veoma korisnički orijentisan i intuitivan. Program ADOS ima slične osobine kao standardni komercijalno raspoloživi programi za projektovanje optičkih sistema. Prava snaga i jedinstvenost programa se nalazi u nekoliko metoda optimizacije:

- Metodi prigušenih najmanjih kvadrata, koja predstavlja klasičnu lokalnu optimizaciju. Metoda daje najbolje rezultate kada je unapred poznata dobra polazna tačka i ima veoma brzu konvergenciju u prvi lokalni minimum koji može biti i globalni minimum ako se odabere dobra polazna tačka.
- Adaptivni stacionarni genetski algoritam (ASSGA);
- Dvočlane evolucione strategije - EVOL;
- Višečlane evolucione strategije - GRUP, REKO i KORR.

Sve optimizacione metode (ASSGA, EVOL, GRUP, REKO i KORR) predstavljaju savremene algoritme globalne optimizacije koji pokušavaju da pronađu globalni minimum. Ove metode ne mogu da garantuju pronalaženje globalnog minimuma, ali mogu da pronađu nekoliko veoma dobrih optičkih sistema koji predstavljaju tačke bliske globalnom minimumu. Obično ti optički sistemi ispunjavaju sve postavljene zahteve. Metode globalne optimizacije imaju mnogo sporiju konvergenciju nego metode lokalne optimizacije i obično zahtevaju duže vreme da bi se pronašao minimum.

### Literatura

- [1] LEVENBERG, K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Q. J. Appl. Math.*, 1944, vol.2, p.164-168.
- [2] ROSEN, S., ELDRET, C. Least squares method for optical correction. *JOSA*, 1954, vol.44, p.250-252.
- [3] MEIRON, J. Automatic lens design by the least squares method. *JOSA*, 1959, vol.49, p.293-298.
- [4] MEIRON, J. Damped least squares method for automatic lens design. *JOSA*, 1965, vol.55, p.1105-1109.
- [5] WYNNE, C. Lens designing by electronic digital computer. *Proc. Phys. Soc. London*, 1959, vol.73, p.777-783.
- [6] WYNNE, C., WORMELL, P. Lens design by computer. *Appl. Opt.*, 1963, vol.2, no.12, p.1233-1238.
- [7] KIDGER, M., WYNNE, C. The design of double Gauss systems using digital computers. *Appl. Opt.*, 1967, vol.6, no.3, p.553-563.
- [8] WORMELL, P. Version 14, a program for the optimization of lens designs. *Opt. Acta*, 1978, vol.25, no.8, p.637-654.
- [9] KIDGER, M. *The application of electronic computers to the design of optical systems, including aspheric lenses*. Ph. D. Thesis, University of London, 1971.
- [10] VASILJEVIĆ, D. *Prilog optimizaciji projektovanja optičkih sistema pomoću mikror računara*. magistarska teza, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1990.
- [11] VASILJEVIĆ, D., RIBOŠIĆ, D. Optimizacija u procesu projektovanja optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1992,

- nja optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1992, vol.XLII, no.2, p.24-31.
- [12] HOLLAND,J. *Adaption in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1992.
- [13] De JONG,K. *An analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1975.
- [14] DAVIS,L. Ed. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [15] VASILJEVIĆ,D. *Mogućnost primene genetskih algoritama u optimizaciji performansi simetričnih objekta pasivnih nišanskih sprava*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1998.
- [16] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje genetskog algoritma primenjenog u optimizaciji optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.XLVIII, no.3, p.30-40.
- [17] VASILJEVIĆ,D., GOLOBIČ,J. *Comparison of the classical damped least squares and genetic algorithm in the optimization of the doublet*. Proceedings of the First Workshop on soft computing, Nagoya, Japan, August 1996, p.200 – 204.
- [18] VASILJEVIĆ,D., GOLOBIČ,J. *Analysis of various evolutionary algorithms and the classical damped least squares in the optimization of the doublet*. In Second Online World Conference on Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing, P.K. Chawdhry, R. Roy, R. K. Pand (eds.), Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing, Springer Verlag, 1998.
- [19] SCHWEFEL,H.P. *Evolution and Optimum Seeking*. John Wiley, New York, 1995.
- [20] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje evolucionih strategija primenjenih u optimizaciji optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.XLVIX, no.1, p.29-43.
- [21] VASILJEVIĆ,D. Optimization of the Cooke triplet with the various evolution strategies and the damped least squares. *Optical Design and Analysis Software*, Proceedings of SPIE, vol.3780, p.207-215.
- [22] BÄCK,T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. Oxford University Press, Oxford, 1996.

Rad primljen: 22.6.2000.god.