

Uporedna analiza optimizovanih triplea pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata, genetskog algoritma i evolucionih strategija

Dr Darko Vasiljević, dipl.inž.¹⁾

Prikazane su osnovne karakteristike triplea i detaljno analizirane mogućnosti njegovog projektovanja i optimizacije. Za izabrani Cookeov triple izvršene su optimizacije pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata i savremenih metoda adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma i evolucionih strategija dvočlanih EVOL i višočlanih GRUP, REKO i KORR. Analizirane su primarne monohromatske aberacije za svaki optimizovani triple posebno i upoređene su njihove vrednosti sa aberacijama polaznog optičkog sistema.

Ključne reči: Optički sistem, metoda prigušenih najmanjih kvadrata, genetski algoritam, evolucionne strategije, projektovanje, optimizacija, aberacija.

Uvod

TRIPLE se sastoji iz tri rastavljena sočiva koja se nalaze na konačnom rastojanju. Često se smatra da je triple jedan od najznačajnijih pronalazaka u domenu fotografskih objektiv. Triple je veoma interesantan objektiv za primenu, jer je objedinio jednostavnost konstrukcije (samo tri rastavljena sočiva) i mogućnost kompletnog korigovanja aberacija jer ima taman dovoljno potencijalnih promenljivih konstrukcijskih parametara da se koriguju osnovne hromatske aberacije i pet primarnih monohromatskih aberacija: podužna i poprečna sferna aberacija, koma, astigmatizam, krivina polja i distorzija. Od Harold Dennis Taylorovog pronalaska 1893. god. primenjivan je kao univerzalni objektiv za portretisanje, projekzione sisteme i vazдушna snimanja.

Ovaj rad predstavlja rezultat istraživanja u oblasti savremenih metoda optimizacije optičkih sistema. Izložene su karakteristike triplea, mogućnosti njegove primene u različitim složenim optičkim sistemima i analizirani su parametri za njegovo projektovanje i optimizaciju. Opisane su sve optimizacione metode korišćene u ovom radu. U drugom delu rada prikazan je izabrani Cookeov triple koji je poslužio kao polazni optički sistem za sve sledeće optimizacije pomoću:

- metode prigušenih najmanjih kvadrata;
- metode adaptivni stacionarni genetski algoritam;
- evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.

Svi optimizovani optički sistemi su opisani i detaljno su analizirane njihove primarne monohromatske aberacije: podužna i poprečna sferna aberacija, koma, astigmatizam, krivina polja i distorzija. Izložena je uporedna analiza primarnih monohromatskih aberacija polaznog Cookeovog triplea i svih optimizovanih triplea.

Triple

Triple se sastoji od tri rastavljena sočiva koja se nalaze na konačnom rastojanju: dva sočiva su bikonveksna (sabirna) a između njih se nalazi jedno bikonkavno (rasipno) sočivo. Aperturna dijafragma se obično nalazi u prostoru između drugog i trećeg sočiva. Posmatrajući konstrukciju, može se primetiti da postoji visoki stepen simetrije: sabirna sočiva su veoma slična i nalaze se na približno jednakim rastojanjima od rasipnog sočiva. Obe prelomne površine rasipnog sočiva imaju približno iste radijuse krivine. Sabirna sočiva se prave od *crown* stakla, dok se raspino sočivo pravi od *flint* stakla, pri čemu se najčešće koriste obična stakla, laka za proizvodnju. Ovakva konstrukcija je omogućila da triple zadovolji osnovne zahteve koji se postavljaju pred bilo koji fotografski objektiv na najjednostavniji mogući način.

Ideja, koja je vodila pronalazača triplea Harald Denis Taylora i koja je prikazana u [1], je sledeća: konstruiše se prvo sočivo koje ima što je moguće manju komu za predmet koji se nalazi u beskonačnosti, ali koje neophodno ima i određenu veličinu krivine polja. Konstruiše se drugo rasipno sočivo jednake svetlosne moći koje je podjednako korigovano na komu i ima istu krivinu polja kao prvo sočivo. Ako se ta dva sočiva razmaknu na rastojanje na kome se dve krivine polja poklapaju, formira se lik predmeta u žižnoj ravni rasipnog sočiva. Ovakav objektiv od dva sočiva (duble) je neodgovarajući za sve predmete na konačnom rastojanju. Da bi se rešio problem rada sa predmetima na konačnom rastojanju, potrebno je postojećem rastavljenom dublu dodati drugi rastavljeni duble, koji je obrnuto postavljen, i na taj način formirati složeni objektiv. Ovakav objektiv od četiri sočiva se može redukovati na objektiv sa tri rastavljena sočiva (triple) tako što će se dva rasipna sočiva spojiti u jedno. Ovakav objektiv nema potpuno korigovane sve aberacije, ali zaos-

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

tale aberacije su dovoljno male da se može koristiti kao fotografski objektiv.

U osnovnoj, Taylorovoj, konstrukciji triple je imao zadovoljavajuću korekciju sferne i hromatske aberacije, ali je imao i izraženu krivinu polja i relativni otvor $f/8.3$. Veliki napredak u proizvodnji optičkih stakala omogućio je korekciju svih uočenih nedostataka triplea. Neprekidnim razvojem u prvoj polovini dvadesetog veka, projektanti optičkih sistema doveli su triple do stadijuma najviše primenjivanog objektiv. Često se smatralo da je to univerzalni objektiv koji imao mnogostruke primene i bio osnova za projektovanje novih tipova objektiv sa velikom svetlosnom moći, projekcione objektivne i objektivne za vazdušno snimanje. Taj razvoj je omogućio da se relativni otvor objektiv povećava sa $f/8.3$ na $f/4$. Krivina vidnog polja, koja je uvek prisutna kod triplea, uzrokovala je da se kvalitet lika, koji je odličan u centru vidnog polja, znatno pogoršava kako se ide ka periferiji. Zbog toga, za normalne uglove vidnog polja, maksimalni relativni otvor je $f/4$. Ako objektiv ima relativno veće žižne dužine i radi sa manjim uglovima vidnog polja, može se projektovati triple i do relativnog otvora $f/3$. Veći broj proizvođača kino-kamera koristi ovaj objektiv i do relativnog otvora $f/2.8$. Maksimalni ugao vidnog polja za triplee je do $\varpi = 30^\circ$, a obično se koriste sa uglovima $\varpi=25^\circ$, odnosno $\varpi=20^\circ$.

Prednje, sabirno, sočivo objektivna ima kratku žižnu dužinu. Izvlačeći malo ovo sočivo u odnosu na srednje rasipno sočivo, smanjuje se žižna dužina, što omogućava projektovanje objektivna sa mogućnošću izoštravanja frontalnim sočivom. Ovo pomeranje frontalnog sočiva ne utiče osetno na kvalitet objektivna, pa je uvedeno kao prost način izoštravanja kod automatskih objektivna.

Projektovanje triplea je interesantno jer je to najjednostavniji optički sistem koji poseduje dovoljno promenljivih konstrukcijskih elemenata da se koriguju primarne monohromatske i hromatske aberacije, Projektant raspolaže sa sledećim promenljivim parametrima:

- šest radijusa prelomnih površina sočiva,
- dva rastojanja između sočiva,
- izbor stakala za sočiva i
- promena debljina sočiva.

Radijusi i rastojanja između sočiva se mogu koristiti za neposredno projektovanje triplea tako što će projektant sa tih osam promenljivih konstrukcijskih parametara moći da koriguje, odnosno kontroliše, sledeće glavne osobine optičkog sistema odnosno aberacije:

- žižnu dužinu,
- aksijalnu (podužnu) hromatsku aberaciju,
- poprečnu hromatsku aberaciju,
- Petzvalovu krivinu polja,
- sfernu aberaciju,
- komu,
- astigmatizam i
- distorziju.

Izbor stakla, koja će se koristiti u projektovanju triplea, je jedna od najvažnijih odluka. Sa stanovišta Petzvalove krivine polja, poželjno je da sabirna sočiva imaju visoki indeks prelamanja, a rasipno sočivo nizak indeks prelamanja. Uobičajeno je da Abbeov broj *crown* stakla sabirnih sočiva bude visok, a za *flint* staklo rasipnog sočiva nizak da bi se korigovale hromatske aberacije.

Izbor stakala utiče i na ukupnu dužinu objektivna, odnosno dužinu od prvog do zadnjeg sočiva. Objektiv koji ima veću dužinu pri zadatom svetlosnom otvoru, vinjetira

pri manjem uglu vidnog polja, dok kraći objektiv vinjetira tek pri većim uglovima vidnog polja. Pored toga, duži objektivni imaju:

- manju zonalnu sfernu aberaciju i
- manji ugao vidnog polja (a to znači da su astigmatizam i koma veći i da ograničavaju ugao pod kojim se formira zadovoljavajući lik).

Na osnovu ovoga, može se zaključiti da su duži objektivni pogodni za sisteme koji imaju veći relativni otvor a manji ugao vidnog polja, dok su kraći objektivni pogodni za sisteme sa manjim relativnim otvorom i većim uglom vidnog polja. Uobičajeno je da dužina triplea odgovara prečniku prednjeg sočiva triplea. Dužina triplea može se kontrolisati odgovarajućim izborom stakala: ako se želi kraći objektiv treba izabrati *flint* staklo za rasipno sočivo sa većim Abbeovim brojem, odnosno *crown* staklo za sabirna sočiva sa manjim Abbeovim brojem. Za duži objektiv treba izabrati suprotne vrednosti: rasipno sočivo od *flint* stakla sa manjim Abbeovim brojem, odnosno sabirna sočiva od *crown* stakla sa većim Abbeovim brojem.

Debljine sočiva ne utiču značajno na korekciju aberacija pa se zato retko dopušta njihova promena. Njihov uticaj se mnogo preklapa sa uticajem rastojanja na korekciju aberacija.

Detaljno izložen matematički model za projektovanje triplea se može naći u [2,3].

Metode optimizacije triplea

Problem automatskog projektovanja triplea, kao i njegove optimizacije, spada u klasu nelinearnih optimizacionih problema. To je kompleksan problem koji su mnogi naučnici pokušavali da reše, odnosno da poboljšaju već postojeća rešenja. Sve postojeće metode se mogu podeliti u dve velike grupe:

- metode klasične optimizacije i
- savremene optimizacione metode.

Klasične optimizacione metode zasnovane su na poznatim matematičkim teorijama pronalaženja lokalnog optimuma. U optimizaciji optičkih sistema najčešće se koristila neka od varijanti metode najmanjih kvadrata. One su veoma efikasne i davale su dobre rezultate, ali su zahtevale pažljiv izbor polazne tačke optimizacije, odnosno inicijalnog optičkog sistema. Od toga koliko je projektant optičkog sistema bio u mogućnosti da pronađe dobar polazni optički sistem zavisila je efikasnost i uspešnost samog procesa optimizacije. To je zahtevalo od projektanta iskustvo i veliko predznanje o optičkom sistemu koji se optimizuje.

Savremene optimizacione metode su zasnovane na analogijama u prirodi. Tako su naučnici, tragajući za uspešnim metodama optimizacije tehničkih sistema, došli na ideju da pokušaju sa metodom organske evolucije (poznata Darwinova teorija evolucije), koja predstavlja optimalnu strategiju adaptacije živih bića na njihovu okolinu. Razvijeno je nekoliko metoda koje predstavljaju pokušaje pojednostavljenog modelovanja teorije evolucije. Genetski algoritmi stavljaju akcenat na proces selekcije i različite genetske operatore, dok evolucione strategije stavljaju akcenat na mutacije zasnovane na normalnoj raspodeli.

Koncept optimizacije je jednostavan ali njegova implementacija može biti veoma komplikovana. Optimizacija se, u principu, može definisati na sledeći način: za zadati polazni sistem i skup željenih performansi tog sistema odrediti skup sistemskih promenljivih koji

minimizuje odstupanje stvarnih performansi od željenih performansi sistema bez povrede bilo kojeg graničnog uslova. Ovaj, na jednostavan način definisan problem, postaje veoma složen kada je velik broj sistemskih promenljivih i željenih vrednosti performansi sistema, 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, nazvan 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. Sa matematičke tačke gledišta, 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 ovom radu. Sa matematičke tačke gledišta, najviše odgovara da se funkcija za ocenu predstavi u kvadratnoj formi kao zbir kvadrata aberacija:

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

gde su: ψ - vrednost funkcije za ocenu, m - broj promenljivih parametara optimizacije, ω_i - težinski faktor za svaku aberaciju posebno i f_i - aberacije optičkog sistema.

Taj tip funkcije za ocenu je korišćen i u svim optimizacionim metodama koje su korišćene u ovom radu (metoda prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivni stacionarni genetski algoritam, evolucione strategije EVOL, GRUP, REKO i KORR).

Težinski faktor za svaku proračunatu aberaciju je neophodan, jer se proračunavaju različiti tipovi aberacija (poprečne, ugaone i talasne) koje mogu da se veoma 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 poznate Newton-Raphsonove metode, koju je razvio Levenberg [4], a u optimizaciji optičkih sistema prvi su je primenili Rosen i Eldert [5], Merion [6,7], Wynne [8]. Metoda najmanjih kvadrata se najintenzivnije razvijala krajem 1950-ih i tokom 1960-ih godina. Klasična metoda najmanjih kvadrata je numerički nestabilna zbog mogućih velikih vrednosti koraka optimizacije. Zato se prišlo razvoju metode prigušenih najmanjih kvadrata, kod koje se prigušenje oscilacija u vrednosti koraka optimizacije vrši sabiranjem ili množenjem. Sada skoro svaki program za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema ima neku varijantu te metode. Autorova implementacija metode prigušenih najmanjih kvadrata zasnovana je na radovima istraživača sa *Imperial Collegea* u Londonu (Wynne, Wormell i Kidger [9-12]). Detaljan opis same metode je dat u autorovoj magistarskoj tezi [13] i u [14].

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. Ova metoda, obično, dovodi funkciju za ocenu optičkog sistema u lokalni minimum koji je najbliži polaznom optičkom sistemu. Projektant optičkih sistema ima nekoliko mogućnosti da pronađe optički sistem koji zadovoljava sve polazne kriterijume. 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 konstrukcijskih parametara koji se mogu optimizovati. Neadekvatan 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) ili mogućnost modifikovanja kompletne funkcije za ocenu.

Sve ove mogućnosti veoma zavise od veštine i iskustva projektanta optičkih sistema. Čak i iskusan projektant može imati teškoća u traženju zadovoljavajućeg rešenja za projekat optičkog sistema vrhunskog kvaliteta.

Adaptivni stacionarni genetski algoritam

Genetski algoritmi (GA) su adaptivne metode koje mogu da se koriste prilikom rešavanja kompleksnih problema pretraživanja i optimizacije. Zasnovani su na uprošćenoj simulaciji genetskih procesa u okviru bioloških organizama. Tokom mnogo generacija, prirodne populacije razvijaju se prema principima prirodne selekcije i "preživljavanja najboljih", koje je prvi opisao Charles Darwin u svojoj čuvenoj knjizi *Poreklo vrsta*. Imitirajući taj proces, genetski algoritmi mogu da "razviju - evoluiraju" rešenja za stvarne kompleksne probleme.

U radu je korišćena metoda adaptivni stacionarni genetski algoritam (ASGA) koju je prvi opisao Davis u [15] i prilagođena je optimizaciji optičkih sistema. Ona je izabrana zato što se, za razliku od drugih metoda koje uglavnom koriste nizove bitova (bit stringove), koriste realni brojevi za predstavljanje jedinki populacije. Ovo je bitno jer se sve važne informacije o optičkom sistemu nalaze u jednom rekordu koji može da predstavlja jednu jedinku u populaciji. Detaljan opis same metode se nalazi u autorovoj doktorskoj disertaciji [16] i radu [17], a ovde će biti objašnjen u grubim crtama.

Populacija optičkih sistema se inicijalizuje na slučajan način. Pošto dobre polazne tačke za optimizaciju obično nisu poznate unapred, najbolji način je da se optimizacija počne sa tačkama, odnosno optičkim sistemima raspoređenim na slučajan način.

U sva tri tipa optimizacija (metoda prigušenih najmanjih kvadrata, genetski algoritam, evolucione strategije) funkcija za ocenu je definisana na isti način kao zbir kvadrata aberacija. Zbog slučajno izabranih polaznih tačaka optimizacije, funkcije za ocenu optičkih sistema se obično razlikuju. Da bi bili u mogućnosti da poredimo funkcije za ocenu, uvodi se linerana normalizacija koja vrši interpolaciju vrednosti funkcija za ocenu u zadati interval.

Izbor roditelja u populaciji se vrši pomoću simulacije ruleta koja daje veću šansu za reprodukciju optičkim sistemima koji imaju manju funkciju za ocenu, tj. manje aberacije. Za reprodukciju se koristi stacionarna tehnika bez duplikata, jer su svi članovi populacije različiti i najbolje

jedinke iz svih generacija su zajedno tako da se nijedna bitna genetska informacija neće izgubiti. Kada se izaberu dva različita roditelja, na njima se izvršava samo jedan genetski operator koji se, takođe, bira pomoću simulacije ruleta iz skupa sledećih operatora:

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

Evolucione strategije

Evolucione strategije su algoritmi koji u rešavanju problema parametarske optimizacije imitiraju principe prirodne evolucije kao što su mutacija, rekombinacija i selekcija. One su specifično razvijene za potrebe optimizacije složenih tehničkih sistema, dok su genetski algoritmi opšte metode za pretraživanje i optimizaciju. Teorija evolucionih strategija je opisana u radu Schwefela [18] koji je ujedno i njihov tvorac zajedno sa Bienertom i Rechenbergom. Detaljan opis evolucionih strategija i njihova primena u optimizaciji optičkih sistema data je u [16,19].

Sve optimizacije izabranog optičkog sistema urađene su sa sledećim evolucionim strategijama:

- EVOL - osnovne evolucione strategije kod kojih postoje samo dve jedinke – roditelj i potomak koji je nastao mutacijom roditelja. Mutacije se vrše prema Gaussovom zakonu normalne raspodele. Bolja jedinka, tj. optički sistem sa manjom funkcijom za ocenu, a samim tim i aberacijama, prelazi u sledeću generaciju.
- GRUP - višočlane evolucione strategije razvijene polazeći od metode EVOL, kod kojih postoji μ roditelja koji proizvode λ potomaka ($\lambda > \mu$). Samo μ najboljih jedinki prelazi u sledeću generaciju. Potomci u metodi GRUP kao i u metodi EVOL, nastaju mutacijom po Gaussovom zakonu normalne raspodele.
- REKO - višočlane evolucione strategije koje su u svemu identične sa metodom GRUP samo što omogućavaju da potomci mogu nastati na dva načina: mutacijom kao i u metodi GRUP i rekombinacijom dve slučajno izabrane jedinke u novu jedinku.
- KORR - najsloženije višočlane evolucione strategije koje imaju dve mogućnosti za izbor roditelja za sledeću generaciju, pet genetskih operatora koje mogu primeniti na promenljivim konstrukcijskim parametrima optičkog sis-tema, koracima optimizacije i uglovima rotacije mutacionog hiperelipsoida.

Rezultati i analiza aberacija optimizovanih triplea

Kao primer za testiranje svih opisanih optimizacionih metoda izabran je standardni Cookeov triple koji je preuzet iz [20] i ima oznaku Cox design no. 401 (Cox projekat br. 401). Tu je prikazan veliki broj gotovih optičkih sistema koji su obično već patentirani. To su veoma dobri optički sistemi koje su projektanti već optimizovali da bi mogli da rešavaju određene probleme sa njima. Svi objektivni prikazani u [20] svedeni su na istu žižnu dužinu od 1". Da bi mogli da se optimizuju u programu APOS, potrebno je

sve konstrukcijske podatke prevesti sa anglosaksonskog sistema mera na međunarodni sistem mera. Ovakvo prerađeni optički sistemi možda malo odstupaju od polaznih optičkih sistema prikazanih u [20], ali to je neophodno da bi se ovakvi objektivni uopšte mogli proračunavati i dalje optimizovati u programu APOS. Osnovni optički podaci za izabrani Cookeov triple su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni optički podaci za rastavljeni duble

žižna dužina	$f = 25$ mm
relativni otvor	$f / 5$
položaj aperturne dijafragme	na petoj prelomnoj površini objektiva
ugao vidnog polja	$\omega = 20^\circ$

Izabrani Cookeov triple ispunjava sve preporuke: relativni otvor je manji od $f/4$, dok je ugao vidnog polja manji od 30° . Konstrukcijski podaci za njega su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Konstrukcijski podaci za polazni Cookeov triple

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	6,668	0,000	vazduh	5,00
2	304,800	1,250	LaKN12	5,00
3	-21,280	1,000	vazduh	5,00
4	6,546	0,300	SF12	5,00
5	ravan	1,400	vazduh	4,00
6	76,560	1,400	vazduh	6,40
7	-13,932	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,716	vazduh	-

Aberacije polaznog optičkog sistema su prikazane u tabeli 3. Proračunate su sve primarne monohromatske aberacije:

- podužna i poprečna sferna aberacija se računaju za maksimalnu visinu upadnog zraka i visinu $H=0,7 \cdot H_{\max}$ i tri spektralne linije koje simuliraju područje vidljive svetlosti. Izabrane su tri Fraunhoferove spektralne linije d ($\lambda=587,6$ nm) za sredinu spektra, C ($\lambda=656,3$ nm) za kraj spektra i F ($\lambda=480,0$ nm) za početak spektra.
- astigmatizam, krivina polja i distorzija se računaju za maksimalni ugao vidnog polja i ugao vidnog polja $\omega = 0,7 \cdot \omega_{\max}$.
- koma se računa za maksimalni ugao vidnog polja i ugao vidnog polja $\omega = 0,7 \cdot \omega_{\max}$ i maksimalnu visinu upadnog zraka i visinu $H=0,7 \cdot H_{\max}$ za sve tri spektralne linije.

Tabela 3. Aberacije polaznog Cookeovog triplea

Aberacije		Linije spektra		
		d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm]	$H=H_{\max}$	-0,01671	-0,05034	0,12150
	$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,05286	-0,07437	0,05307
Poprečna sferna aberacija [mm]	$H=H_{\max}$	-0,00168	-0,00508	0,01217
	$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,00372	-0,00524	0,00372
Astigmatizam [mm]	$\omega = \omega_{\max}$	-0,42502		
	$\omega = 0,7 \cdot \omega_{\max}$	-0,23005		
Krivina polja [mm]	$\omega = \omega_{\max}$	0,09103		
	$\omega = 0,7 \cdot \omega_{\max}$	0,00340		
Distorzija [%]	$\omega = \omega_{\max}$	0,02330	0,02468	0,00045
	$\omega = \omega_{\max}$	0,04429	0,004598	0,02173
Koma [mm]	$\omega = \omega_{\max}, H = H_{\max}$	0,01843	0,01774	0,02034
	$\omega = \omega_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	0,01235	0,01214	0,01241

$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	-0,00795	-0,00835	-0,00683
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	-0,00029	-0,00037	-0,00038

Analizom aberacija Cookeovog triplea, prikazanih u tabeli 3, vidi se da objektiv ima dobro korigovane aberacije što se i moglo očekivati, jer je on već optimizovan i patentiran i kao takav preuzet iz [20]. Vrednosti sferne aberacije (podužne i poprečne) nalaze se u okviru dozvoljenih vrednosti za taj tip objektiva. Poprečna sferna aberacija, iako nije u potpunosti korigovana, ima veoma male vrednosti za maksimalnu visinu ulaznog zraka i ona iznosi $\approx 2 \mu\text{m}$, a za visinu $H=0,7 \cdot H_{\max}$ upadnog zraka ona iznosi približno $4 \mu\text{m}$. Krivina polja je izuzetno dobro korigovana i iznosi $91 \mu\text{m}$ za puni ugao vidnog polja, odnosno samo $3 \mu\text{m}$ za $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$. Astigmatizam se nalazi u zadovoljavajućim granicama za objektiv tipa Cookeov triple. Interesantno je primetiti da je ovaj objektiv imao izuzetno dobro korigovanu distorziju što pokazuje da formira izuzetno jasnu i ostru sliku predmeta. Iz teorije je poznato da se prilikom optimizacije Cookeovih triplea akcenat stavlja na korekciju sferne aberacije, kome i krivine polja, dok je u ovom slučaju najviše korigovana distorzija i krivina polja. To ukazuje da se težilo da lik bude što verniji predmetu, a osnovne aberacije (podužna i poprečna sferna aberacija i koma) nisu bile dominantne.

Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata prikazani su u tabeli 4. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva. Debljine sočiva nisu varirane tokom optimizacije jer se u teoriji pokazuje da one imaju zanemarljivo mali uticaj na promene aberacija, a njihova slabo kontrolisana promena može dovesti do pojave sistema sa velikom debljinom sočiva koji su neprihvatljivi.

Tabela 4. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	7,713	0,000	vazduh	5,00
2	242,915	1,250	LaKN12	5,00
3	-19,247	1,567	vazduh	5,00
4	7,553	0,300	SF12	5,00
5	ravan	0,926	vazduh	4,00
6	50,963	2,229	vazduh	6,40
7	-13,932	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,559	vazduh	-

Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0,01379	0,00922	0,07514
$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,02117	-0,01840	0,02063
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0,00139	0,00093	0,00753
$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,01490	-0,00129	0,00145
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,18040		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,15048		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,09836		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,07272		
Distorzija [%] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,17478	-0,18223	-0,16840
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,05072	-0,05665	-0,04730

Koma [mm] $\varpi = \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	0,00933	0,0889	0,01100
$\varpi = \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	0,00333	0,00298	0,00424
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	-0,00292	-0,00337	-0,00125
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	-0,00125	-0,00152	-0,00047

Prilikom optimizacije usvojeno je klasično teorijsko stanovište da je najbitnije da su dobro korigovane podužna i poprečna sferna aberacija i koma. Ostale aberacije, ako ne mogu da se poprave, ne bi trebalo da se znatno pogoršaju. Analizom aberacija Cookeovog triplea, prikazanih u tabeli 5, vidi se da su ispunjeni svi optimizacioni ciljevi. Iz tabele se vidi da je podužna i poprečna sferna aberacija potpuno korigovane za d i C spektralne linije. Poprečna sferna aberacija za maksimalnu visinu upadnog zraka iznosi približno $1 \mu\text{m}$, odnosno $\approx 15 \mu\text{m}$ za visinu $H=0,7 \cdot H_{\max}$ upadnog zraka. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv. Interesantno je primetiti i veliko smanjenje astigmatizma, sa $-0,42 \text{ mm}$ kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na $-0,18 \text{ mm}$ kod optimizovanog triplea, dok je krivina polja ostala nepromenjena. Kao posledica dobre korekcije sferne aberacije i kome, distorzija je povećana u odnosu na polazni Cookeov triple.

Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću metode adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma prikazani su u tabeli 6. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva.

Tabela 6. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću metode adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	8,339	0,000	vazduh	5,00
2	422,618	1,250	LaKN12	5,00
3	-17,836	1,630	vazduh	5,00
4	8,388	0,300	SF12	5,00
5	ravan	1,348	vazduh	4,00
6	69,783	1,601	vazduh	6,40
7	-12,510	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,974	vazduh	-

Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću metode adaptivni stacionarni genetski algoritam prikazane su u tabeli 7.

Tabela 7. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	-0,00452	-0,00815	0,05357
$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,02768	-0,02419	0,01150
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	-0,00045	-0,00082	0,00538
$H=0,7 \cdot H_{\max}$	-0,00195	-0,00170	0,00081
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,22256		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,14218		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,14212		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,10927		
Distorzija [%] $\varpi = \varpi_{\max}$	-0,03692	-0,04342	-0,03716
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	0,00422	0,00041	-0,00142
Koma [mm] $\varpi = \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	0,00554	0,00529	0,00677
$\varpi = \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	0,00140	0,00123	0,00178
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	-0,00210	-0,00230	-0,00122
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	-0,00095	-0,00102	-0,00080

Prilikom optimizacije pomoću metode adaptivni

stacionarni genetski algoritam postavljeni su isti uslovi za optimizaciju kao i kod klasične optimizacije pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata, a to su minimizacija podužne i poprečne sferne aberacije i kome. Analizom aberacija, prikazanih u tabeli 7, može se videti da su svi ciljevi optimizacije ispunjeni. Poprečna sferna aberacija je smanjena i iznosi za maksimalnu visinu upadnog zraka samo $-0,45 \mu\text{m}$, odnosno $-1,95 \mu\text{m}$ za visinu $H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$ upadnog zraka za centralnu d spektralnu liniju. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv. Interesantno je primetiti i veliko smanjenje astigmatizma, sa $-0,42 \text{ mm}$ kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na $-0,22 \text{ mm}$ kod optimizovanog triplea, odnosno sa $-0,23 \text{ mm}$ kod polaznog optičkog sistema za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$ na $-0,14 \text{ mm}$ kod optimizovanog triplea. Distorzija je u potpunosti korigovana za d i C spektralne linije i iznosi za maksimalni ugao vidnog polja $-0,03692 \%$ i za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$ $0,00422 \%$. Interesantno je primetiti da je distorzija potpuno korigovana iako je sferna aberacija (podužna i poprečna) dobro korigovana. Krivina polja je povećana u odnosu na polazni optički sistem, ali se još uvek nalazi u granicama tolerancija za ovaj tip optičkih sistema.

Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda EVOL prikazani su u tabeli 8. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva.

Tabela 8. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću evolucionih strategija metoda EVOL

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	8,363	0.000	vazduh	5,00
2	319,328	1,250	LaKN12	5,00
3	-17,584	1,708	vazduh	5,00
4	8,337	0,300	SF12	5,00
5	ravan	0,887	vazduh	4,00
6	65,554	2,069	vazduh	6,40
7	-12,348	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,943	vazduh	-

Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda EVOL prikazane su u tabeli 9.

Tabela 9. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću evolucionih strategija metoda EVOL

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,00860	0,00638	0,06330
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,02171	-0,01688	0,01422
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,00086	0,00064	0,00635
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,00152	-0,00119	0,00100
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	0,25182		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,16097		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,09084		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,08313		
Distorzija [%] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,08082	-0,08696	-0,07650
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,01695	-0,02111	-0,01664
Koma [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,01244	0,01212	0,01404
$\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00496	0,00475	0,00571
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,00200	0,00167	0,00342
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00068	0,00054	0,00123

Prilikom optimizacije pomoću evolucionih strategija metoda EVOL postavljeni su isti uslovi za optimizaciju kao i kod prethodno opisanih optimizacionih metoda a to su minimizacija podužne i poprečne sferne aberacije i kome. Analizom aberacija, prikazanih u tabeli 9, može se videti da su svi ciljevi optimizacije ispunjeni. Iz tabele se vidi da su podužna i poprečna sferna aberacija potpuno korigovane za d i C spektralne linije. Poprečna sferna aberacija za maksimalnu visinu upadnog zraka iznosi $0,86 \mu\text{m}$, odnosno $-1,52 \mu\text{m}$ za visinu $H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$ upadnog zraka što predstavlja smanjenje poprečne sferne aberacije od 50% u odnosu na polazni optički sistem. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv za sve uglove vidnog polja i visine ulaznih zraka. Interesantno je primetiti i veliko smanjenje astigmatizma, sa $-0,42 \text{ mm}$ kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na $-0,25 \text{ mm}$ kod optimizovanog triplea. Krivina polja je približno jednaka kod polaznog i optimizovanog triplea za maksimalni ugao vidnog polja, dok je za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$ povećana kod optimizovanog triplea u odnosu na polazni optički sistem. Kod optimizovanog triplea u odnosu na polazni optički sistem distorzija je povećana za maksimalni ugao vidnog polja, a smanjena za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$. Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda GRUP prikazani su u tabeli 10. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva.

Tabela 10. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću evolucionih strategija metoda GRUP

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	8,189	0.000	vazduh	5,00
2	344,164	1,250	LaKN12	5,00
3	-18,002	1,876	vazduh	5,00
4	7,850	0,300	SF12	5,00
5	ravan	0,909	vazduh	4,00
6	47,158	2,644	vazduh	6,40
7	-13,288	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,518	vazduh	-

Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda GRUP prikazane su u tabeli 11.

Tabela 11. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću evolucionih strategija metoda GRUP

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,02237	0,02838	0,05647
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,01303	-0,00125	0,00558
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,00225	0,00285	0,00567
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,00091	-0,00009	0,00039
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,11195		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,16193		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,07278		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,03944		
Distorzija [%] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,51921	-0,52163	-0,52334
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,21505	-0,21562	-0,22309
Koma [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,00851	0,00910	0,00766
$\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00335	0,00379	0,00239
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,00335	0,00353	0,00367
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00162	0,00189	0,00128

Prilikom optimizacije pomoću evolucionih strategija metoda GRUP postavljeni su isti uslovi za optimizaciju kao

i kod prethodno opisanih optimizacionih metoda, a to su minimizacija podužne i poprečne sferne aberacije i kome. Analizom aberacija, prikazanih u tabeli 11, može se videti da su svi ciljevi optimizacije ispunjeni. Iz tabele se vidi da su podužna i poprečna sferna aberacija potpuno korigovane za d i C spektralne linije. Poprečna sferna aberacija za maksimalnu visinu upadnog zraka iznosi oko 2 μm , odnosno oko -1 μm za visinu $H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$ upadnog zraka. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv za sve uglove vidnog polja i visine ulaznih zraka. Interesantno je primetiti i veliko smanjenje astigmatizma, sa -0,42 mm kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na -0,11 mm kod optimizovanog triplea. Krivina polja za maksimalni ugao vidnog polja je kod optimizovanog triplea smanjena u odnosu na polazni optički sistem, dok su krivine polja, za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$, približno jednake kod polaznog i optimizovanog triplea. Distorzija je kod optimizovanog triplea povećana u odnosu na polazni optički sistem. Povećanje distorzije kod ovog optimizovanog objektiva se može objasniti činjenicom da ova klasa objektiva može da ima ili odlično razlaganje (minimalna sferna aberacija i koma) ili verno formiranje lika (minimalna distorzija). Bitno je napomenuti da se aberacije ovog objektiva, kao i svih do sada opisanih objektiva, nalaze u dozvoljenim granicama. Analiza objektiva pokazuje na šta je stavljen naglasak prilikom optimizacije i kako su u optimizovanom optičkom sistemu uravnotežene aberacije.

Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda REKO prikazani su u tabeli 12. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva.

Tabela 12. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću evolucionih strategija metoda REKO

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	7,699	0,000	vazduh	5,00
2	154,496	1,250	LaKN12	5,00
3	-19,818	1,787	vazduh	5,00
4	7,299	0,300	SF12	5,00
5	ravan	0,942	vazduh	4,00
6	37,732	2,659	vazduh	6,40
7	-14,525	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,296	vazduh	-

Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda REKO prikazane su u tabeli 13.

Tabela 13. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću evolucionih strategija metoda REKO

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,01357	0,01800	0,05211
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,01792	-0,00741	0,00430
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,00136	0,00181	0,00523
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,00126	-0,00052	0,00030
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,07727		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,15502		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,07029		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,03246		
Distorzija [%] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,80975	-0,81218	-0,81454
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,32581	-0,32826	-0,33023
Koma [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,00831	0,00892	0,00729
$\varpi = \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00315	0,00358	0,00210

$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = H_{\text{max}}$	0,00237	0,00248	0,00280
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}, H = 0,7 \cdot H_{\text{max}}$	0,00130	0,00147	0,00115

Prilikom optimizacije pomoću evolucionih strategija metoda REKO postavljeni su isti uslovi za optimizaciju kao i kod prethodno opisanih optimizacionih metoda a to su minimizacija podužne i poprečne sferne aberacije i kome. Analizom aberacija, prikazanih u tabeli 13, može se videti da su svi ciljevi optimizacije ispunjeni. Iz tabele se vidi da su podužna i poprečna sferna aberacija potpuno korigovane za d i C spektralne linije. Poprečna sferna aberacija za maksimalnu visinu upadnog zraka iznosi 1,36 μm odnosno -1,26 μm za visinu $H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$ upadnog zraka. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv za sve uglove vidnog polja i visine ulaznih zraka. Interesantno je primetiti i jako veliko smanjenje astigmatizma, sa -0,42 mm kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na -0,077 mm kod optimizovanog triplea. Krivina polja za maksimalni ugao vidnog polja je kod optimizovanog triplea smanjena u odnosu na polazni optički sistem, dok su krivine polja, za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$, približno jednake kod polaznog i optimizovanog triplea. Distorzija je kod optimizovanog triplea povećana u odnosu na polazni optički sistem. Povećanje distorzije kod ovog optimizovanog objektiva, kao i kod triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda GRUP, se može objasniti činjenicom da ova klasa objektiva može da ima ili odlično razlaganje (minimalna sferna aberacija i koma) ili verno formiranje lika (minimalna distorzija). Bitno je napomenuti da se aberacije ovog objektiva kao i svih do sada opisanih objektiva nalaze u dozvoljenim granicama. Analiza objektiva pokazuje na šta je stavljen naglasak prilikom optimizacije i kako su u optimizovanom optičkom sistemu uravnotežene aberacije.

Konstruktivski podaci za Cookeov triple optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda KORR prikazani su u tabeli 14. Prilikom optimizacije varirani su svi radijusi i vazдушna rastojanja između sočiva.

Tabela 14. Konstruktivski podaci za optimizovani Cookeov triple pomoću evolucionih strategija metoda KORR

Redni broj	Radius	Rastojanje	Staklo	Svetlosni otvor
1	7,942	0,000	vazduh	5,00
2	201,082	1,250	LaKN12	5,00
3	-18,957	1,846	vazduh	5,00
4	7,563	0,300	SF12	5,00
5	ravan	0,925	vazduh	4,00
6	41,181	2,666	vazduh	6,40
7	-13,933	1,000	LaKN7	6,40
8	ravan	20,395	vazduh	-

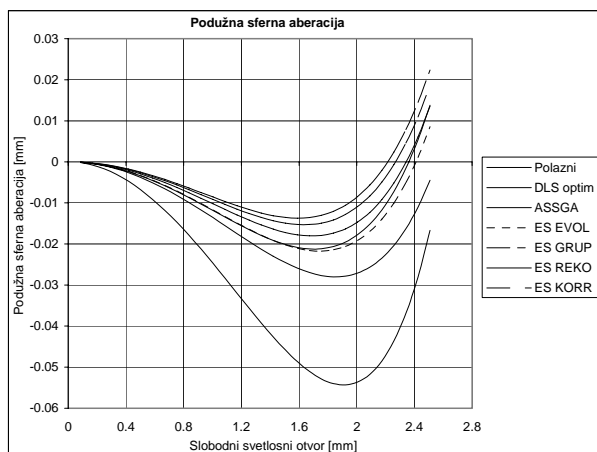
Aberacije Cookeovog triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda KORR prikazane su u tabeli 15.

Tabela 15. Aberacije optimizovanog Cookeovog triplea pomoću evolucionih strategija metoda KORR

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,01863	0,02440	0,05347
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,01492	-0,00329	0,00421
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\text{max}}$	0,00187	0,00245	0,00537
$H=0,7 \cdot H_{\text{max}}$	-0,00105	-0,00023	0,00030
Astigmatizam [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,09297		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,15847		
Krivina polja [mm] $\varpi = \varpi_{\text{max}}$	-0,07088		
$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\text{max}}$	-0,03540		

Distorzija [%]	$\varpi = \varpi_{\max}$	-0,69990	-0,70220	-0,70462
	$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$	-0,28494	-0,28647	0,29109
Koma [mm]	$\varpi = \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	0,00816	0,00880	0,00711
	$\varpi = \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	0,00314	0,00361	0,00207
	$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = H_{\max}$	0,00289	0,00306	0,00321
	$\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}, H = 0,7 \cdot H_{\max}$	0,00146	0,00169	0,00119

Prilikom optimizacije pomoću evolucionih strategija metoda KORR postavljani su isti uslovi za optimizaciju kao i kod prethodno opisanih optimizacionih metoda, a to su minimizacija podužne i poprečne sferne aberacije i kome. Analizom aberacija prikazanih u tabeli 15 može se videti da su svi ciljevi optimizacije ispunjeni. Iz tabele se vidi da su podužna i poprečna sferna aberacija potpuno korigovane za d i C spektralne linije. Poprečna sferna aberacija za maksimalnu visinu upadnog zraka iznosi $1.87 \mu\text{m}$, odnosno $-1.05 \mu\text{m}$ za visinu $H=0,7 \cdot H_{\max}$ upadnog zraka. Koma je znatno smanjena u odnosu na polazni objektiv za sve uglove vidnog polja i visine ulaznih zraka. Interesantno je primetiti i jako veliko smanjenje astigmatizma, sa $-0,42 \text{ mm}$ kod polaznog optičkog sistema za maksimalni ugao vidnog polja, na $-0,09 \text{ mm}$ kod optimizovanog triplea. Krivina polja za maksimalni ugao vidnog polja je kod optimizovanog triplea smanjena u odnosu na polazni optički sistem, dok su krivine polja, za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$, približno jednake kod polaznog i optimizovanog triplea. Distorzija je, kod optimizovanog triplea povećana u odnosu na polazni optički sistem. Povećanje distorzije kod ovog optimizovanog objektiva, kao i kod triplea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda GRUP i REKO, se može objasniti činjenicom da ova klasa objektiva može da ima ili odlično razlaganje (minimalna sferna aberacija i koma) ili verno formiranje lika (minimalna distorzija). Bitno je napomenuti da se aberacije ovog objektiva, kao i svih do sada opisanih objektiva, nalaze u dozvoljenim granicama. Analiza objektiva pokazuje na šta je stavljen naglasak prilikom optimizacije i kako su u optimizovanom optičkom sistemu uračunate i podužna i poprečna aberacija za polazni optički sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.

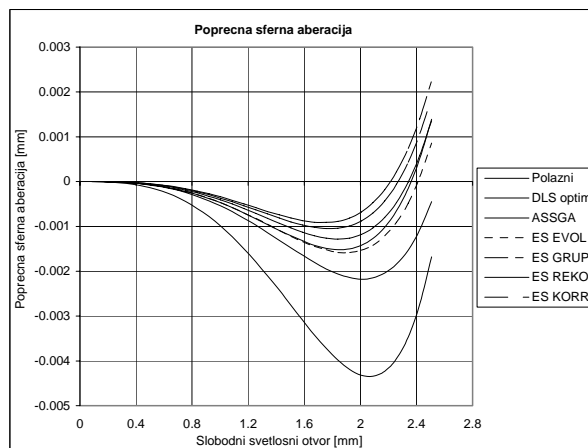


Slika 1. Dijagram podužne sferne aberacije za Cookeov triple

Sa dijagrama podužne sferne aberacije prikazanog na sl.1, vidi se da su klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata i sve metode evolucionih strategija (EVOL,

GRUP, REKO i KORR) uspele da potpuno koriguju podužnu sfernu aberaciju, iako ona nije bila korigovana kod polaznog optičkog sistema. Sve ove optimizacione metode su na sličan način korigovale podužnu sfernu aberaciju i vrednosti se veoma malo razlikuju. Metoda adaptivni stacionarni genetski algoritam se veoma približila potpunoj korekciji, mada kriva podužne sferne aberacije nije presekla osu. Interesantno je da je ova metoda pronašla optički sistem sa najmanjom podužnom sfernom aberacijom za maksimalnu visinu upadnog zraka.

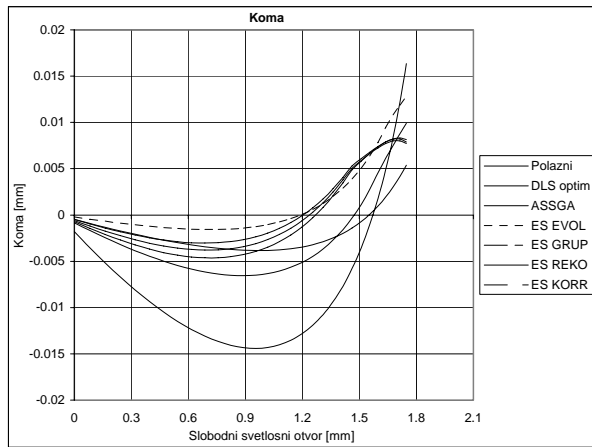
Na sl.2 dat je dijagram poprečne sferne aberacije za polazni optički sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.



Slika 2. Dijagram poprečne sferne aberacije za Cookeov triple

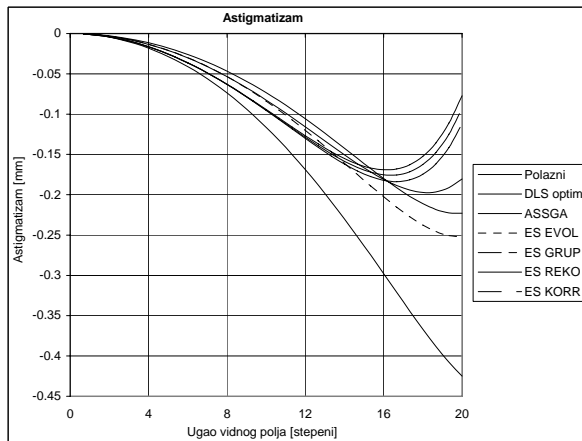
Sa dijagrama poprečne sferne aberacije, prikazanog na sl.2, vidi se da su klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata i sve metode evolucionih strategija (EVOL, GRUP, REKO i KORR) uspele da potpuno koriguju poprečnu sfernu aberaciju, iako ona nije bila korigovana kod polaznog optičkog sistema. Sve ove optimizacione metode su na sličan način korigovale poprečnu sfernu aberaciju i vrednosti se veoma malo razlikuju. Metoda adaptivni stacionarni genetski algoritam se veoma približila potpunoj korekciji, mada kriva poprečne sferne aberacije nije presekla osu. Interesantno je da je ova metoda pronašla optički sistem sa najmanjom poprečnom sfernom aberacijom za maksimalnu visinu upadnog zraka.

Na sl.3 je dat dijagram kome za polazni optički sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.



Slika 3. Dijagram kome za Cookeov triple

Sa dijagrama kome, prikazanog na sl.3, vidi se da su sve optimizacione metode uspele da pronađu optičke sisteme kod kojih je koma korigovana. Za razliku od sferne aberacije gde su sve optimizacione metode pronašle optičke sisteme sa skoro identično korigovanom sfernom aberacijom, u slučaju kome optimizacione metode su pronašle optičke sisteme koji su imali donekle različito korigovanu koma. Metoda ASSGA je pronašla optički sistem sa najbolje korigovanom komom. Zatim slede sve metode iz grupe višočlanih evolucionih strategija (GRUP, REKO i KORR) koje su na skoro identičan način korigovale koma. Posle njih dolaze dvočlane evolucionne strategije metoda EVOL i na kraju klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata. Stigmatizma za polazni optički sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.

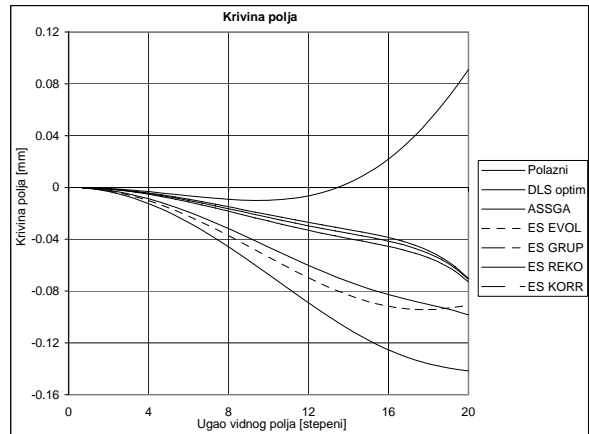


Slika 4. Dijagram astigmatizma za Cookeov triple

Sa dijagrama astigmatizma, prikazanog na sl.4, vidi se da su optimizacione metode pronašle optičke sisteme sa različito korigovanim astigmatizmom. Kod polaznog optičkog sistema astigmatizam se može prikazati kao monotono opadajuća funkcija. Optimizacione metode zasnovane na višočlanim evolucionim strategijama (metode GRUP, REKO i KORR) pronašle su optičke sisteme sa skoro identično korigovanim astigmatizmom kod kojih je astigmatizam za maksimalni ugao vidnog polja manji od astigmatizma za ugao vidnog polja $\varpi = 0,7 \cdot \varpi_{\max}$.

Na sl.5 je dat dijagram krivine polja za polazni optički

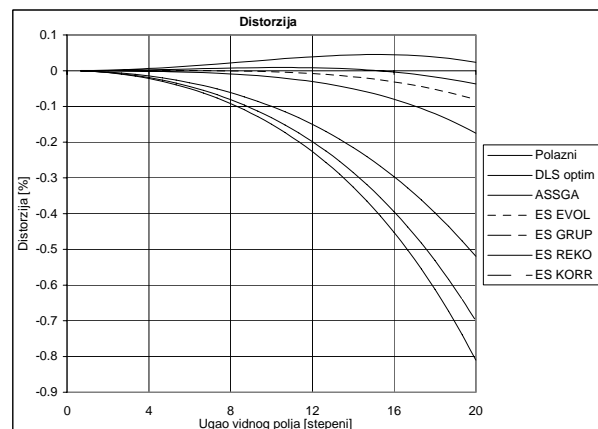
sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.



Slika 5. Dijagram krivine polja za Cookeov triple

Sa dijagrama krivine polja, prikazanog na sl.5, vidi se da su sve optimizacione metode pokušale da poprave krivinu polja tako što su potpuno promenile oblik funkcije krivine polja. Polazni optički sistem je imao potpuno korigovanu krivinu polja sa nultom vrednošću krivine polja za ugao vidnog polja $w \approx 14^\circ$. Sve optimizacione metode nisu uspele da pronađu optičke sisteme kod kojih bi krivina polja bila potpuno korigovana. One su pronašle optičke sisteme sa krivinom polja koja je monotono opadajuća ali po apsolutnoj vrednosti približno jednaka krivini polja kod polaznog optičkog sistema. Važno je primetiti da korekcija krivine polja i astigmatizma uvek idu zajedno i da, ako se dobro koriguje krivina polja kao što je to urađeno kod polaznog optičkog sistema, onda se obično ne može dobro korigovati astigmatizam. Sve optimizacione metode su pokušavale da podjednako koriguju astigmatizam i krivinu polja. Sa dijagrama astigmatizma i krivine polja vidi se da su višočlane evolucionne strategije metode GRUP, REKO i KORR pronašle optičke sisteme koji imaju dobro korigovanu astigmatizam i krivinu polja.

Na sl.6 je dat dijagram distorzije za polazni optički sistem i sve optičke sisteme optimizovane pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivnih stacionarnih genetskih algoritama i evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR.



Slika 6. Dijagram distorzije za Cookeov triple

Sa dijagrama distorzije, prikazanog na sl.6, vidi se da su optimizacione metode pronašle optičke sisteme sa različito korigovanom distorzijom. Kod polaznog optičkog sistema distorzija je veoma dobro korigovana. Jedino optimizaciona metoda adaptivni stacionarni genetski algoritam je uspela da potpuno koriguje distorziju. Optimizacione metode dvočlane evolucione strategije metoda EVOL i klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata pronašle su optičke sisteme sa dobro korigovanom distorzijom. Optimizacione metode, zasnovane na višestranim evolucionim strategijama metode GRUP, REKO i KORR, pronašle su optičke sisteme kod kojih se distorzija može predstaviti monotono opadajućom krivom, kod koje je apsolutna vrednost distorzije za maksimalni ugao vidnog polja dosta veća od vrednosti distorzije kod polaznog optičkog sistema. Ove vrednosti distorzije su posledica veoma dobre korekcije svih ostalih aberacija. Treba primetiti da su vrednosti ovako povećane distorzije u dozvoljenim granicama.

Zaključak

U radu su prikazani rezultati optimizacija Cookeovog triplea i upoređene su njihove aberacije. Za polazni sistem je izabran dobar patentirani Cookeov triple koji je prikazan u [20]. Urađene su optimizacije pomoću sledećih metoda:

- prigušeni najmanji kvadrati,
- adaptivni stacionarni genetski algoritam,
- dvočlane evolucione strategije varijanta EVOL i
- višestranne evolucione strategije varijante GRUP, REKO i KORR.

Sve optimizacione metode su pronašle slične optičke sisteme kod kojih se aberacije nisu mnogo razlikovale. Na osnovu toga se može tvrditi, da je pronađen optimalni Cookeov triple koji zadovoljava sve konstrukcijske i aberacione zahteve.

Prilikom optimizacije Cookeovog triplea, postavljeni su sledeći zahtevi:

- potpuna korekcija podužne i poprečne sferne aberacije i kome i
- što je moguće bolja korekcija astigmatizama, krivine polja i distorzije.

Analizom aberacija je utvrđeno da su ispunjeni zahtevi optimizacije kod svih optimizovanih optičkih sistema. Pošto su aberacije svih optimizovanih Cookeovih triplea dobro korigovane, analizom se sagledavalo na šta su pojedine optimizacione metode stavljale naglasak i kako su uravnotežavale aberacije.

Literatura

- [1] MARECHAL,A. *Instruments d'optique*. Librairie Polytechnique Beranger, Paris 1965.
- [2] SMITH,W. *Modern Optical Engineering - The design of optical systems*. McGraw Hill, New York 1966.
- [3] KINGSLAKE,R. *Lens design fundamentals*. Academic press, New York 1978.
- [4] LEVENBERG,K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Q. J. Appl. Math.*, 1944, vol.2, p.164-168.
- [5] ROSEN,S., ELDRET,C. Least squares method for optical correction. *JOSA*, 1954, vol.44, p.250-252.
- [6] MEIRON,J. Automatic lens design by the least squares method. *JOSA*, 1959, vol.49, p.293-298.
- [7] MEIRON,J. Damped least squares method for automatic lens design. *JOSA*, 1965, vol.55, p.1105-1109.
- [8] WYNNE, C. Lens designing by electronic digital computer. *Proc. Phys. Soc. London* 1959, vol.73, p.777-783.
- [9] WYNNE,C., WORMELL,P. Lens design by computer. *Appl. Opt.*, 1963, vol.2, no.12, p.233-1238.
- [10] KIDGER,M., WYNNE,C. The design of double Gauss systems using digital computers. *Appl. Opt.*, 1967, vol.6, no.3, p.553-563.
- [11] WORMELL,P. Version 14, a program for the optimization of lens designs. *Opt. Acta*, 1978, vol.25, no.8, p.637-65.
- [12] KIDGER,M. *The application of electronic computers to the design of optical systems, including aspheric lenses*. Ph. D. Thesis, University of London, 1971.
- [13] VASILJEVIĆ,D. *Prilog optimizaciji projektovanja optičkih sistema pomoću mikroracunara*. magistarska teza, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1990.
- [14] VASILJEVIĆ,D., RIDOŠIĆ,D. Optimizacija u procesu projektovanja optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1992, vol.XLII, no.2 p.24-31.
- [15] DAVIS,L. Ed. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [16] VASILJEVIĆ,D. *Mogućnost primene genetskih algoritama u optimizaciji performansi simetričnih objektivna pasivnih nižanskih sprava*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1998.
- [17] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje genetskog algoritma primenjenog u optimizaciji optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.XLVIII, no.3, p.30-40.
- [18] SCHWEFEL,H.P. *Evolution and Optimum Seeking*. John Wiley, New York, 1995.
- [19] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje evolucionih strategija primenjenih u optimizaciji optičkih sistema. *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.XLVIX, no.1, p.29-43.
- [20] COX,A. *A System of Optical Design*. Focal Press, London 1964.

Rad primljen: 5.1.2000.god.