

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ
DEPARTAMENTUL DE MECATRONICĂ

fiz. Marius Costache

TEZA DE DOCTORAT
CONTRIBUȚII PRIVIND SINTEZA
OPTIMALĂ A REDRESOARELOR
OPTICE LENTICULARE

Conducător științific: prof.dr.ing. Ioan Nicoară

UNIV. "POLITEHNICA"	
TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volum	101-104
Dulap	369 Lit. F

2006

CUPRINS

INTRODUCERE.....	4
1. SISTEME DE REDRESARE A IMAGINII.....	8
1.1. Considerații generale.....	8
1.2. Scheme optice ale sistemelor de redresare a imaginii.....	8
1.2.1. Redresoare cu prisme.....	8
1.2.2. Redresoare lenticulare.....	12
1.3. Concluzii și contribuții originale.....	15
2. CARACTERISTICI DE REFERINȚĂ ȘI DE CALITATE A SISTEMELOR OPTICE.....	17
2.1. Caracteristicile de referință ale sistemelor optice.....	17
2.2. Criterii de evaluare a calității imaginii.....	20
2.2.1. Considerații generale.....	20
2.2.2. Criterii ondulatorii de calitate.....	22
2.2.3. Aberațiile geometrice și cromatice.....	25
2.2.4. Parametri de calitate a imaginii derivați din funcția optică de transfer.....	33
2.3. Concluzii și contribuții originale.....	39
3. ELEMENTE DE SINTEZĂ A COMPONENTELOR OPTICE ELEMENTARE.....	41
3.1. Generalități.....	41
3.2. Sinteza lentilei singulare de cea mai bună formă privind aberația sferică.....	41
3.3. Sinteza dubletelor.....	43
3.3.1. Sinteza dubletului nelipit.....	43
3.3.2. Sinteza dubletului lipit.....	47
3.4. Sinteza tripletelor lipite.....	50
3.5. Concluzii și contribuții originale.....	52
4. SINTEZA OPTIMALĂ A REDRESOARELOR LENTICULARE ALE LUNETELOR TERESTRE.....	53
4.1. Luneta kepler.....	53
4.1.1. Descrierea lunetei.....	53
4.1.2. Calculul de gabarit al lunetei Kepler.....	55

4.1.3. Calculul de gabarit, sinteza subansamblurilor și analiza unei lunete Kepler fără redresare	56
4.1.3.1. Calculul de gabarit	56
4.1.3.2. Sinteza și analiza subansamblurilor ocular și obiectiv	57
4.2. Sinteza și analiza subansamblurilor unei lunete Kepler cu redresor conectat în planele antiprinicipale	73
4.2.1. Calculul de gabarit	73
4.2.2. Analiza redresorului	74
4.2.3. Analiza sistemului obiectiv – redresor. Lentila de câmp	79
4.3. Calcul de gabarit, sinteza și analiza redresorului afocal constituit din două dublete	85
4.4. Concluzii și contribuții originale	98
5. APLICAȚII ALE REDRESOARELOR LENTICULARE LA APARATE	
CU DISTANȚĂ OBIECT FINITĂ	102
5.1. Considerații generale	102
5.2. Aplicație a redresorului afocal în construcția microscopelor de măsurare ..	103
5.3. Concluzii și contribuții originale	114
6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE	117
ANEXE	122
BIBLIOGRAFIE	133

INTRODUCERE

Sistemele optice proiectate și executate în prezent sunt limitate la difracție în marea lor majoritate, ca expresie a efortului concurențial de a aduce pe piață produse de calitate tot mai ridicată. Tehnica de calcul reprezintă principala unealtă care permite rafinarea continuă a metodelor de sinteză și analiză accesate curent de inginerii opticieni și fizicieni.

În acest spirit este întocmită și prezenta teză, care se dorește a fi un exercițiu de demonstrație a posibilităților noi de abordare și rezolvare a unor probleme legate de aparatele optice tradiționale. Subiectul tezei se referă concret la proiectarea și analiza subansamblurilor optice de redresare a imaginii și acoperă, prin forța cauzalității directe, domenii diverse și distincte ale științei aparatelor optice, printre care luneta Kepler, binoclul de observare, microscopul de măsurare etc.

Luneta Kepler, ca schemă optică este cunoscută din 1611, când autorul ei a realizat primul instrument care îi poartă numele. De-a lungul timpului, proiectarea lunetei în ansamblul său, respectiv sinteza subansamblurilor optice, a cunoscut diverse exprimări, prin algoritmi specifici care reflectau posibilitățile de abordare matematică și tehnica de calcul la momentul considerat. În acest sens nici un sistem optic nu poate fi declarat absolut perfect, ci permite oricând reevaluări și revizuirii care contribuie la creșterea calității imaginii.

Luneta Kepler, deși are o istorie lungă, nu este nici pe departe perimată ca sistem, ci se regăsește în forme moderne într-o multitudine de aplicații, care vizează cele mai diferite domenii: aparate de observare și ochire, aparate sportive de observare, aparate de măsurare a lungimilor sau unghiurilor, periscoape de transmitere a imaginii la distanțe scurte etc.

Cu unele excepții care includ lunetele astronomice – deși era lunetei astronomice optice cu refracție s-a încheiat oarecum în secolul trecut – toate aplicațiile bazate pe schema Kepler lucrează cu imagine dreaptă și, ca urmare,

conțin un sistem de redresare.

Lucrarea de față își propune o abordare secvențială, pornind de la schema de bază până la structura cea mai complexă, a problemei proiectării de gabarit, sintezei și analizei subansamblurilor componente ale lunetei Kepler terestre, cu condiția declarată de a menține în permanență caracterul limitat la difracție al componentelor.

Pe parcursul studiului întreprins s-a formulat ca o direcție interesantă de cercetare stabilirea modului de compunere a parametrilor Fourier de calitate a imaginii, pentru care literatura conține exprimări ambigui sau rezervate.

De asemenea, având în vedere faptul că redresarea imaginii este prezentă la cele mai multe dintre aparatele de măsurare, utilizate direct de către un operator uman, în teză s-au extins cercetările, în măsura în care o impunea tratarea subansamblului redresor și asupra domeniului, altfel foarte vast, al microscopiei de măsurare.

Capitolul 1 al tezei cuprinde sinteza critică a unui material bogat în ansamblu, dar sărac în detalii privind subiectul propus, precum și formularea unor direcții concrete de cercetare definite ca obiective ale tezei.

În capitolul 2 al tezei sunt descrise și analizate succint criteriile de apreciere a calității imaginii și caracteristicile de referință ale sistemelor optice. Sunt prezentate aberațiile geometrice și cromatice, ca parametri tradiționali de evaluare a calității imaginii, la care, în ultimii ani, s-au alăturat criteriile ondulatorii bazate pe diferența optică de drum dintre frontul de undă real și cel ideal și parametrii derivați din funcția optică de transfer: MTF, PTF, PSF și raportul Strehl.

În capitolul 3 al tezei sunt rezumate metodele cele mai eficiente de sinteză a celor trei entități de bază utilizate în construcția sistemelor optice: lentila singulară, dubletul și tripletul. Acest capitol, împreună cu anexele aferente, conține toate elementele necesare unui algoritm modern de proiectare a componentelor optice de orice tip.

În capitolul 4 sunt tratate probleme referitoare la sinteza și analiza a două tipuri de redresoare lenticulare: redresorul cu conectare în punctele sale antiprinicipale și redresorul montat afocal. Ambele tipuri de redresoare au fost ilustrate numeric prin aplicații ale lunetei terestre bazate pe schema Kepler.

Capitolul 5 al tezei conține contribuții originale ale autorului, dintre care se evidențiază următoarele: proiectarea unui microscop de măsurare original, cu

subansamblu redresor, elaborarea unui program automat scris în limbajul Visual Basic și destinat efectuării calculului de gabarit al microscopului, sinteza subansamblurilor obiectiv și redresor afocal astfel încât au rezultat soluții de sisteme optice limitate la difracție, realizarea unei simulări numerice complexe care să certifice proprietățile redresorului afocal, transformarea subansamblului redresor într-un sistem zoom, cu deplasarea primului dublet, astfel încât grosismetul aparatului să fie constant, determinarea legii de deplasare a primului dublet în raport cu abscisa obiect a sistemului.

Capitolul 6 al tezei conține o succintă prezentare a contribuțiilor originale ale autorului și concluziile finale.

Prezenta teză își propune rezolvarea următoarelor obiective:

- stabilirea unor algoritmi de calcul de gabarit și de sinteză pentru cele două tipuri de redresoare lenticulare de bază
- analiza sistemelor de redresare obținute pe baza algoritmilor propuși, împreună cu subansamblurile din schema unor instrumente tradițional dotate cu redresor, cum ar fi luneta Kepler
- abordarea problemei calității imaginii pentru sisteme optice complexe, așa cum sunt cele care includ redresoare lenticulare
- aplicații numerice pe schema lunetei Kepler și a microscopului de măsurare pentru verificarea validității algoritmilor de proiectare și a proprietăților redresoarelor, în condițiile în care se urmărește ca subansamblurile și sistemul complet să fie limitate la difracție
- studiul variantei zoom derivată din modelul afocal al redresorului format din două dublete

În elaborarea tezei, s-a constatat că există o bază informațională foarte săracă în ceea ce privește literatura de specialitate, respectiv o bază informațională foarte bogată, dar cu aspect preponderent comercial, cu o densitate științifică foarte mică, oferită de web.

Totodată, autorul dorește să mulțumească membrilor comisiei – dl general prof. dr. ing. Emil Crețu de la Academia Tehnică Militară București, dl. dr. ing. Spulber, director științific la Prooptica București – pentru efortul descifrării tezei și elaborării referatelor de specialitate, respectiv dlui prof. dr. fiz. Dușan Popov, șeful

Catedrei de Fizică de la Universitatea Politehnica din Timișoara, ale cărui încurajări au reprezentat un stimulent permanent pentru cercetările întreprinse.

Eforturile de elaborare a tezei au fost susținute, încurajate și ghidate pe tot parcursul de către conducătorul științific al lucrării, dl prof. dr. ing. Ioan Nicoară, căruia autorul, la acest final de drum, îi transmite o adâncă recunoștință.

Nu în ultimul rând, mesajul de mulțumire se îndreaptă și către dna conf. dr. ing. Corina Gruescu, de la Universitatea Politehnica din Timișoara, a cărei generoasă competență a călăuzit mersul lucrării, pe întregul traseu.

1. SISTEME DE REDRESARE A IMAGINII

1.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Redresorul este un sistem optic care are rolul de a inversa imaginea și, în unele cazuri, de a introduce o mărire suplimentară, $\beta_R \neq -1$. Acest subansamblu este intercalat în schema optică de bază a aparatelor care trebuie să formeze imagini drepte. Redresorul se prevede între obiectiv și ocular, cu diverse tipuri de conectare a tuburilor optice, funcție de cerințele concrete privind gabaritul radial și axial, grosimentul instrumentului etc.

Redresorul este un subansamblu care intră în construcția unei serii largi de aparate vizuale destinate observării sau/și măsurării, cum ar fi: luneta terestră bazată pe schema Kepler, binoclul, teodolitul, periscopul, unele tipuri de microscop de măsurare etc.

Redresarea imaginii se poate realiza utilizând prisme cu reflexie totală de diferite forme constructive sau sisteme lenticulare special proiectate.

1.2. SCHEME OPTICE ALE SISTEMELOR DE REDRESARE A IMAGINII

1.2.1. Redresoare cu prisme

Redresoarele tradiționale cu prisme utilizează proprietatea prisme triunghiulare cu reflexie totală (prisma Porro) de a inversa imaginea sus-jos și stânga-dreapta (fig. 1.1).

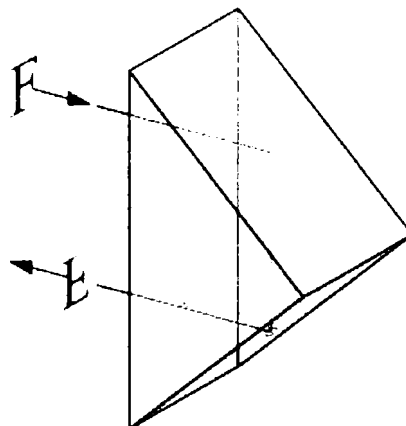


Fig. 1.1. Element prismatic din sistemul de redresare Porro

Pentru obținerea unei imagini corecte se asociază două prisme Porro, având poziții relative spațiale ortogonale. Reprezentarea din figura 1.2 definește schema clasică a redresorului cu prisme, care a fost mult timp utilizat în construcția binoculului de observare terestră (fig. 1.3).

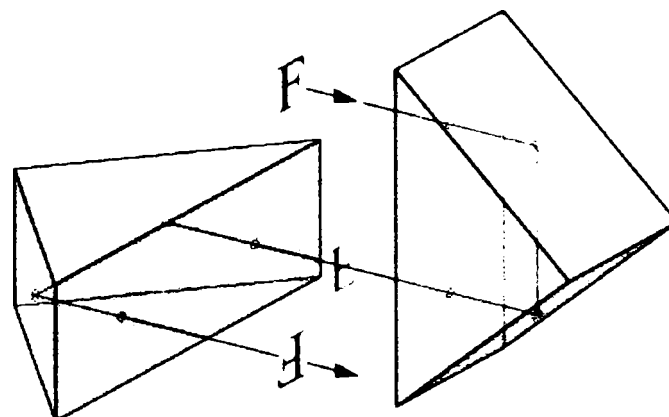


Fig. 1.2. Redresor cu prisme Porro

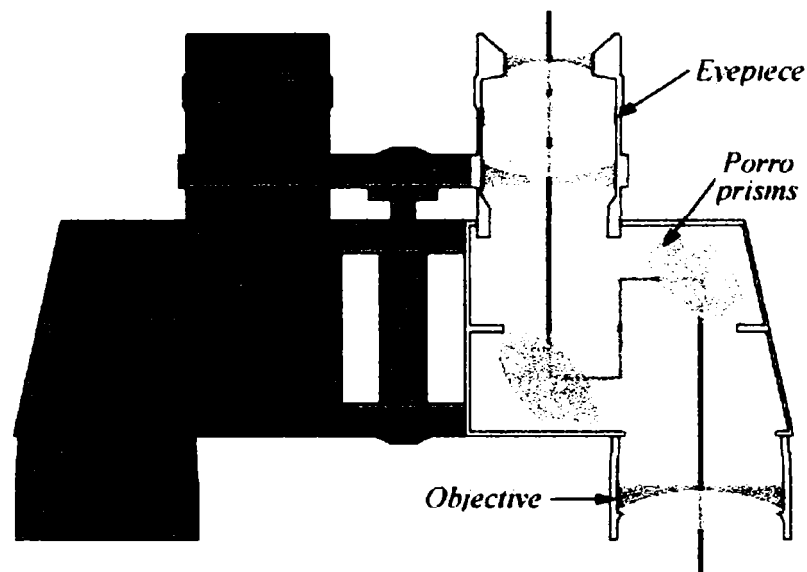


Fig. 1.3. Schema binoculului cu redresor prismatic tradițional

Redresorul cu prisme prezintă avantajul important din punct de vedere practic de a scurta lungimea drumului geometric al razelor, respectiv gabaritul axial al instrumentului. Această scurtare are două surse: frângerea traseului luminos și traversarea materialului optic al prismelor, care, în raport cu aerul, are o densitate optică superioară. Dacă n este indicele de refracție de referință al sortului de sticlă din care sunt executate prismele, scurtarea Δl a gabaritului axial datorită trecerii luminii prin sticlă este:

$$\Delta l = (n - 1)l_p \quad (1.1)$$

unde l_p este drumul geometric prin prisme.

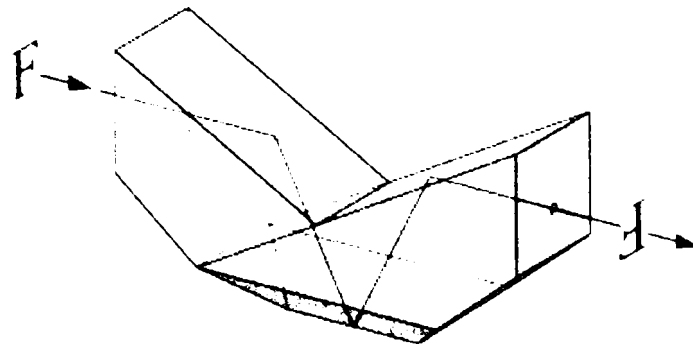


Fig. 1.4. Redresor cu prismă Abbe-König

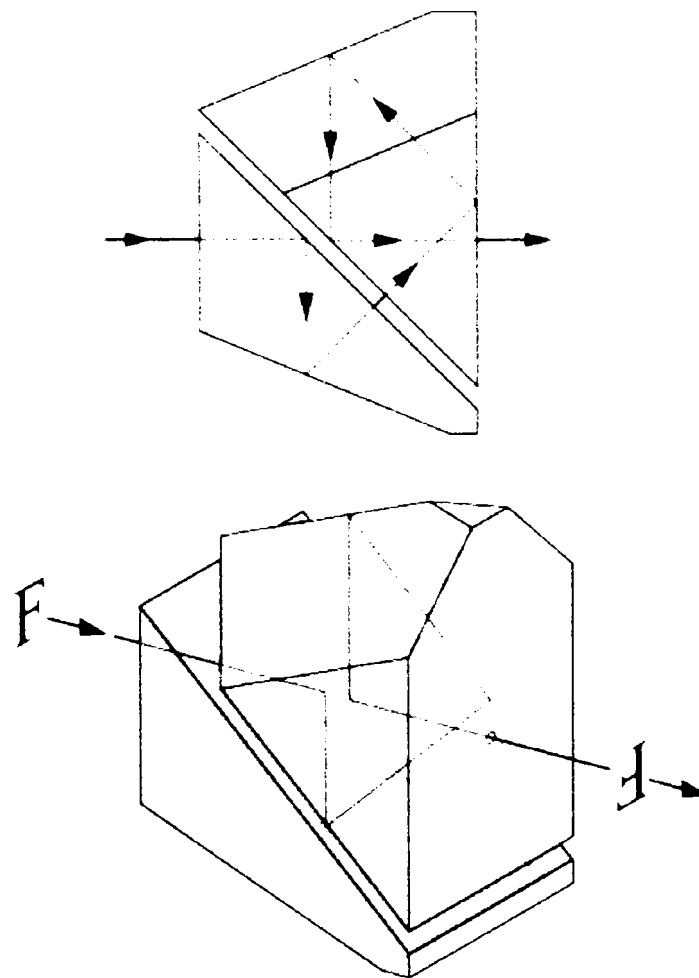


Fig. 1.5. Redresor cu prisme Schmidt-Pechan (vedere plană –sus și vedere tridimensională – jos)

Producătorii europeni de aparate de observare au înlocuit total în ultimul timp soluția de redresare cu prisme Porro (aceasta este încă utilizată în Japonia și extremul Orient). În scopul micșorării gabaritului radial și al greutateii, care reprezintă un parametru comercial important al binoculului, redresorul cu prisme Porro a fost

înlocuit cu soluții bazate pe redresarea cu o singură prismă mai complexă sau combinații de alte prisme mai mici. Pentru deschideri mari este preferată prisma Abbe-Konig (fig. 1.4), iar pentru deschideri mai mici, ansamblul Schmidt-Pechan (fig. 1.5).

În figura 1.6 este prezentat un model nou de binoclu, oferit de firma Zeiss. Se observă că forma tradițională, cu traseu frânt este înlocuită de forma liniară a lunetelor, în schema cărora au fost introduse prisme Abbe-Konig sau Schmidt-Pechan.

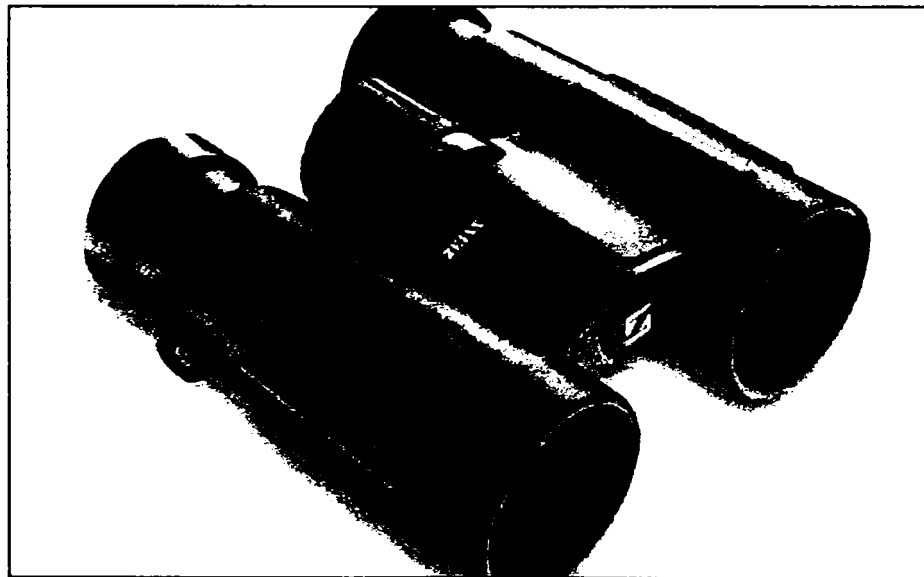


Fig. 1.6. Binoclu Zeiss cu redresare prismatică neconvențională

Redresoarele cu prisme neconvenționale, cu acoperiș, sunt foarte scumpe, dar sunt preferate de utilizatori datorită dimensiunilor și masei reduse ale instrumentului.

Din punct de vedere optic, parametrii de calitate a imaginii formate de structurile prismatice nu sunt la cel mai înalt nivel. Aberrațiile sferice și cromatice ale prismelor nu pot fi corectate la un nivel similar celui care poate fi atins în cazul lentilelor. Pentru micșorarea acestor aberrații, prismele se execută din cristale de tipul florurilor, care au indice de refracție și dispersie mică. Aceste materiale au dezavantajul prețului ridicat, la care se adaugă costuri suplimentare privind etanșarea aparatului, dat fiind caracterul lor higroscopic.

1.2.2. Redresoare lenticulare

Frecvent soluțiile de redresare de mai mare rafinament utilizează sisteme optice lenticulare.

Există în literatura de specialitate două scheme optice de bază pentru construcția redresoarelor lenticulare:

- redresorul cu conectare în punctele antiprinicipale (fig. 1.7)
- redresorul afocal (fig. 1.8).

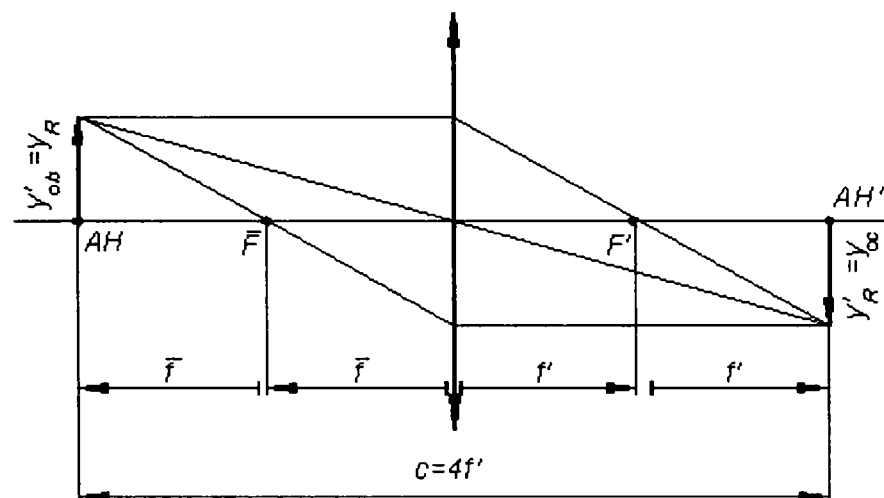


Fig. 1.7. Redresorul cu conectare în punctele antiprinicipale

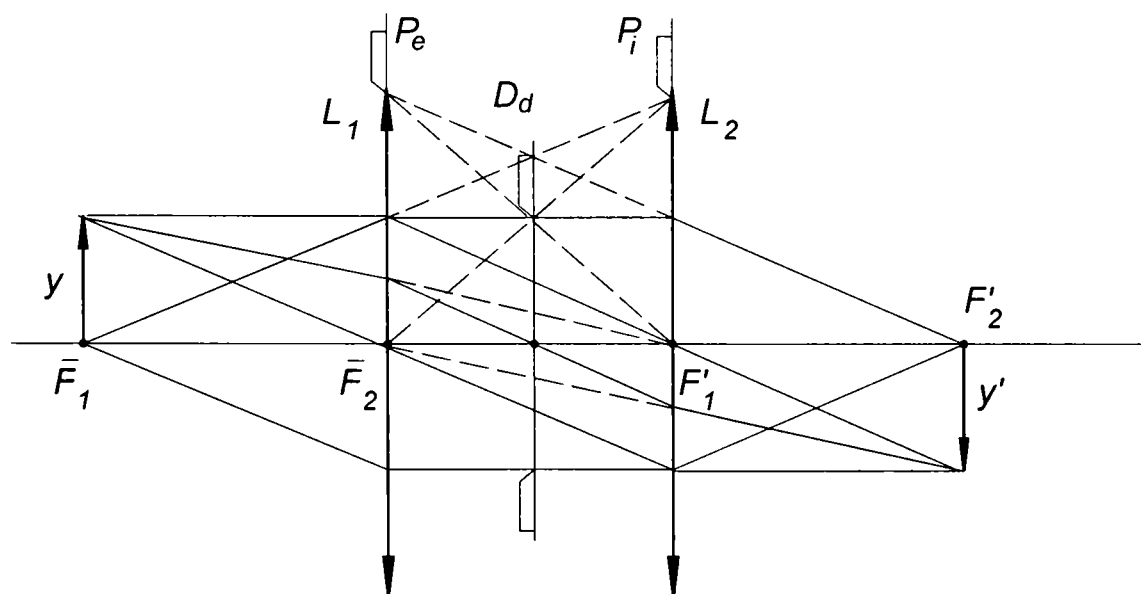


Fig. 1.8. Redresorul cu conectare afocala

Redresorul cu conectare în punctele antipincipale poate fi constituit dintr-o lentilă convergentă sau un dublet acromat. Subansamblul se introduce în schema optică de bază a aparatului care necesită redresarea imaginii astfel încât planul antiprincipal obiect al redresorului să coincidă cu planul imaginii intermediare formate de obiectiv, iar planul antiprincipal imagine al redresorului să se suprapună cu planul focal obiect al ocularului. Redresorul are doar rolul unui releu de imagine, de la obiectiv la ocular, principala funcție fiind aceea de a inversa imaginea. Din punct de vedere optic inversarea imaginii este echivalentă cu introducerea în sistem a unui subansamblu optic având mărirea liniară negativă și egală cu unitatea:

$$\beta_R = -1 . \quad (1.2)$$

Redresorul afocal este constituit din două dublete identice, simetric plasate și conectate în schema de bază astfel încât planul focal obiect al primului dublet și planul focal imagine al celui de-al doilea dublet să coincidă cu planul imagine al obiectivului și, respectiv, cu planul focal obiect al ocularului.

Caracterul afocal al redresorului este asigurat de distanța dintre dublete, egală cu suma distanțelor focale ale dubletelor. Acest subansamblu optic asigură proprietăți importante (ilustrate în figura 1.9):

- menținerea constantă a măririi liniare a redresorului pentru poziția obiectului într-un interval $\pm f'$
- păstrarea valorii măririi liniare indiferent de mărimea obiectului.

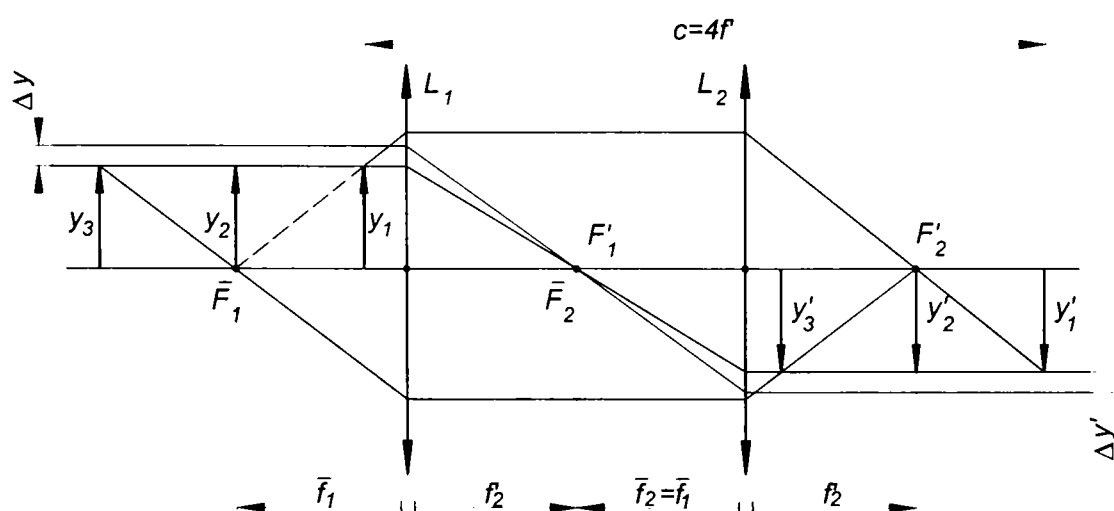


Fig. 1.9. Proprietățile redresorului afocal

Redresorul afocal poate asigura mărirea liniară constantă și proiectarea imaginii într-un plan fix prin transformarea sa într-un sistem zoom (cu interval optic variabil, de valoare finită).

În figura 1.10 este reprezentat un redresor care are primul dublet mobil. Deplasarea trebuie să aibă loc astfel încât obiectul y_R să se afle întotdeauna în planul focal obiect \bar{F}_1 . Imaginea y'_R va rezulta, pentru un anumit domeniu de variație a abscisei obiect, în planul focal F'_2 . Acest sistem optic poate servi și pentru focalizare interioară – necesară pentru lunetele de măsurare de atelier.

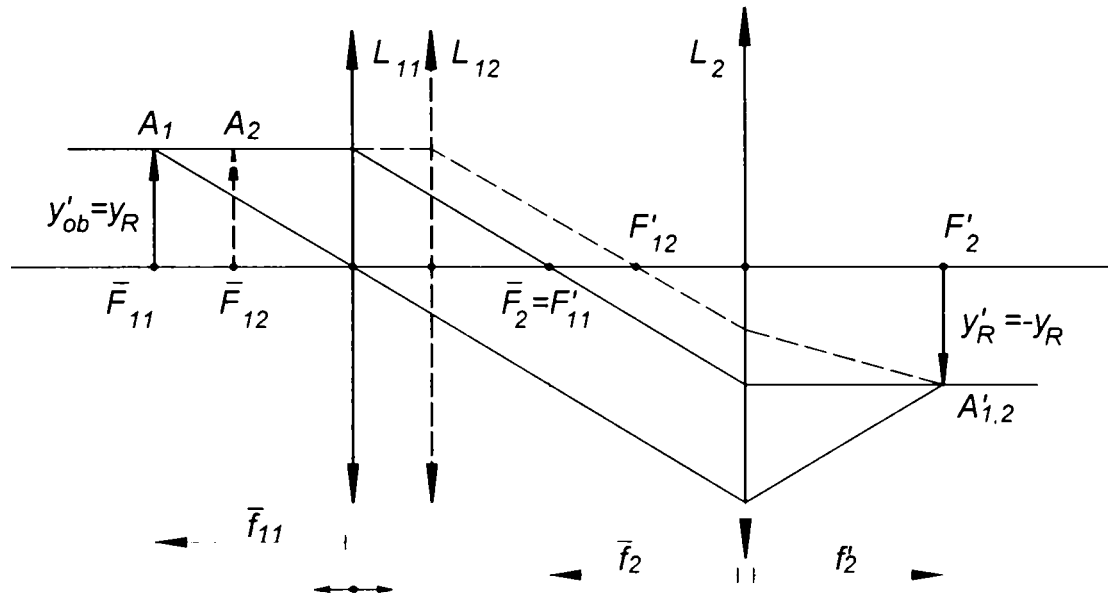


Fig. 1.10. Varianta zoom a redresorului afocal

Sistemele de redresare afocale sunt utilizate cu necesitate în cazul aparatelor de măsurare (microscopie, lunete etc.), la care grosimintele trebuie strict controlate pentru citiri corecte.

În alte cazuri, cum ar fi periscopele de dimensiuni mari, mai multe redresoare afocale conectate în serie au doar rolul de releu de transmitere a imaginii.

Sistemul de redresare format din două dublete, dar în varianta focală, este utilizat la lunetele atașate armelor de vânătoare sau de luptă. Sistemul are caracteristicile unui zoom, care asigură grosiminte variabile într-un domeniu dat, dar cu valori prestabilite prin mecanisme cu mișcare indexată. Dacă domeniile de grosiminte sunt largi, parametrii instrumentului de ochire nu sunt constanți (unghi de câmp liniar și unghiular, distanță obiect), manifestându-se, ca atare, vignetarea fasciculelor.

1.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Capitolul 1 al tezei prezintă sintetic și face unele interpretări ale informațiilor existente în literatura de specialitate referitor la sistemele de redresare a imaginii.

Materialele cercetate de autor includ literatură autohtonă, germană, engleză și americană, la care se adaugă sursa compozită oferită de internet.

Lucrările studiate, atunci când dedică un paragraf subansamblurilor de redresare a imaginii, o fac într-un mod mai ales descriptiv și mai puțin sau de loc axat pe algoritmi de sinteză și analiză. Documentația disponibilă indică existența a două tipuri de redresare: cu subansambluri prismatice și cu sisteme lenticulare.

Redresoarele prismatice, în schema tradițională, sunt formate din două prisme Porro. Modelele actuale de binoculi sau microscopie binoculare au renunțat la redresorul prismatic clasic și utilizează prisme cu acoperiș de tipul Abbe-Konig, Schmidt, Schmidt-Pechan sau Lemman. Aceste sisteme de redresare sunt rezervate însă numai unor aparate de observare. Pentru aparate de măsurare sau de ochire sunt preferate redresoarele lenticulare, ale căror proprietăți se înscriu într-o gamă mult mai largă și asigură o calitate a imaginii mult mai bună.

Redresoarele lenticulare au la bază două scheme: lentila sau dubletul conectat în punctele antiprinicipale și redresorul afocal.

Redresorul afocal, prin mobilitatea primului dublet poate deveni focal și, în acest caz, mărirea sa liniară va fi variabilă și în afara unității.

Având în vedere cele de mai sus, prezenta teză își propune rezolvarea următoarelor obiective:

- stabilirea unor algoritmi de calcul de gabarit și de sinteză pentru cele două tipuri de redresoare lenticulare de bază**
- analiza sistemelor de redresare obținute pe baza algoritmilor propuși, împreună cu subansamblurile din schema unor instrumente tradițional dotate cu redresor, cum ar fi luneta Kepler**
- abordarea problemei calității imaginii pentru sisteme optice complexe, așa cum sunt cele care includ redresoare lenticulare**

- ❑ aplicații numerice pe schema lunetei Kepler și a microscopului de măsurare pentru verificarea validității algoritmilor de proiectare și a proprietăților redresoarelor, în condițiile în care se urmărește ca subansamblurile și sistemul complet să fie limitate la difracție
- ❑ studiul variantei zoom derivată din modelul afocal al redresorului format din două dublete

În capitolul 1 al tezei contribuțiile originale ale autorului se rezumă la sinteza critică a unui material bogat în ansamblu, dar sărac în detalii privind subiectul propus și formularea unor direcții concrete de cercetare pe parcursul tezei.

BIBLIOGRAFIE: [C1, C3, D2, G2, G8, G10, H2, M4, N1, N2, N3, N5, O1, P5, S1, S5, T2, W3, W15, W26, W27, W28, W29, W30]

2. CARACTERISTICI DE REFERINȚĂ ȘI DE CALITATE A SISTEMELOR OPTICE

2.1. CARACTERISTICILE DE REFERINȚĂ ALE SISTEMELOR OPTICE

În figura 2.1 este reprezentată o lentilă considerată ca un sistem optic format din doi dioptri sferici centrați. Sunt figurate punctele și distanțele care caracterizează din punct de vedere optic lentila și dioptrii componente.

În tabelul 2.1 sunt sintetizate relațiile de calcul ale caracteristicilor optice ale lentilei sferice, precum și unele cazuri particulare.

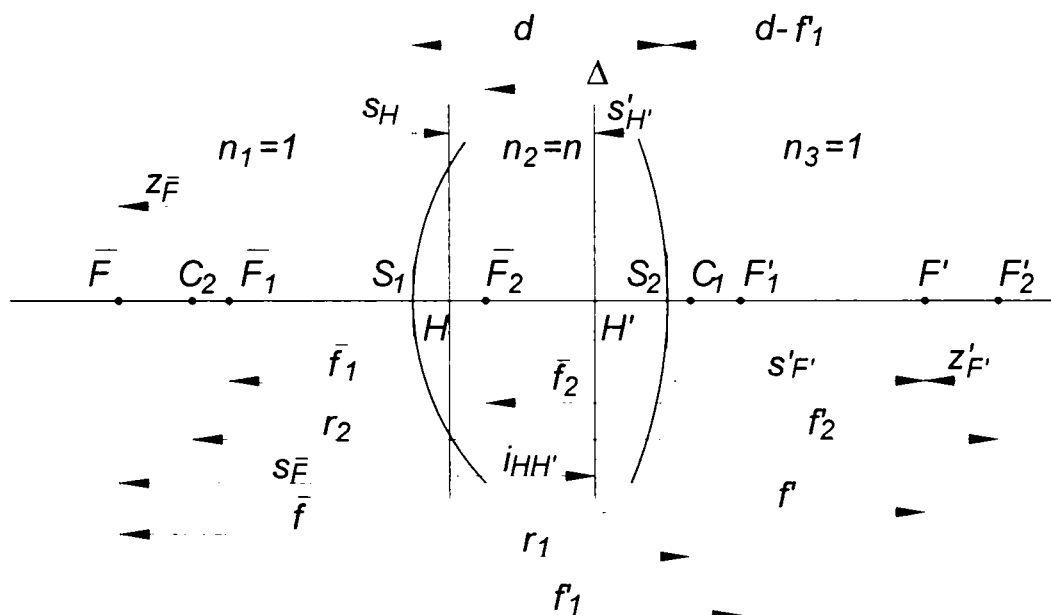


Fig.2.1. Caracteristicile optice ale unei lentile și ale dioptrilor componente

Tabelul 2.1

Nr. crt	Mărimea de calcul	Relații de calcul	Cazuri particulare
1.	Distanțele focale ale dioptrilor	$\bar{f}_1 = -\frac{r_1}{n-1} \Rightarrow \bar{F}_1$ $f'_1 = \frac{nr_1}{n-1} \Rightarrow F'_1$ $\bar{f}_2 = \frac{nr_2}{n-1} \Rightarrow \bar{F}_2$ $f'_2 = -\frac{r_2}{n-1} \Rightarrow F'_2$	$r_1 = \infty \Rightarrow f'_1 = -\bar{f}_1 = \infty$ $r_2 = \infty \Rightarrow f'_2 = -\bar{f}_2 = -\infty$
2.	Intervalul optic	$\Delta = \overline{F_1 F_2} = d - f'_1 + \bar{f}_2$	

3697
 14.10.14
 UNIV. "POLITEHNICA"
 TIMIȘOARA
 BIBLIOTECA CENTRALĂ

3.	Abscisele focarelor lentilelor raportate la focarele dioptrilor	$z_{\bar{F}} = \overline{\bar{F}_1\bar{F}} = \frac{\bar{f}_1 f'_1}{\Delta} = \frac{\bar{f}_1 f'_1}{d - f'_1 + \bar{f}_2} \Rightarrow \bar{F}$ $z'_{F'} = \overline{F'_2 F'} = -\frac{\bar{f}_2 f'_2}{\Delta} = -\frac{\bar{f}_2 f'_2}{d - f'_1 + \bar{f}_2} \Rightarrow F'$	
4.	Distanțele focale ale lentilei	$\bar{f} = \overline{H\bar{F}} = \frac{\bar{f}_1 \bar{f}_2}{\Delta} = \frac{\bar{f}_1 \bar{f}_2}{d - f'_1 + \bar{f}_2} \Rightarrow H$ $f' = \overline{H'F'} = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = -\frac{f'_1 f'_2}{d - f'_1 + \bar{f}_2} \Rightarrow H'$ <p>sau</p> $\bar{f} = -\frac{n}{n-1} \frac{r_1 r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)}$ $f' = \frac{n}{n-1} \frac{r_1 r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)}$	$d \cong 0$ $\Rightarrow f' = -\bar{f} = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}$
5.	Puterea lentilei	$\Phi' = \frac{1}{f'} = -\frac{\Delta}{f'_1 f'_2} = -\frac{d - f'_1 + \bar{f}_2}{f'_1 f'_2} \text{ sau}$ $\Phi' = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 r_2}$	$d \cong 0$ $\Rightarrow \Phi' = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) =$ $= (n-1)(\rho_1 - \rho_2)$ (pseudoputerea)
6.	Abscisele focarelor raportate la vârful dioptrilor	$s_{\bar{F}} = \overline{S_1\bar{F}} = -f' \left(1 + \frac{d}{n} \frac{n-1}{r_2} \right)$ $s'_{F'} = \overline{S_2 F'} = f' \left(1 - \frac{d}{n} \frac{n-1}{r_1} \right)$	$d \cong 0 \Rightarrow \begin{cases} s_{\bar{F}} = -f' \\ s'_{F'} = f' \end{cases}$ $r_1 = \infty \Rightarrow s'_{F'} = f'$ $r_2 = \infty \Rightarrow s_{\bar{F}} = -f'$
7.	Abscisele planelor principale raportate la vârful dioptrilor	$s_H = \overline{S_1 H} = s_{\bar{F}} - \bar{f} = -f' \frac{d(n-1)}{nr_2}$ <p>sau</p> $s_H = -\frac{r_1 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$ $s'_{H'} = \overline{S_2 H'} = s'_{F'} - f' = -f' \frac{d(n-1)}{nr_1}$ <p>sau</p> $s'_{H'} = -\frac{r_2 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$	$d \cong 0 \Rightarrow \begin{cases} s_H = 0 \\ s'_{H'} = 0 \end{cases}$ $r_2 = \infty \Rightarrow s_H = 0$ $r_1 = \infty \Rightarrow s'_{H'} = 0$
8.	Distanța dintre planele principale	$i_H = \overline{i_{HH'}} = d - s_H + s'_{H'} =$ $= d \frac{(n-1)(d + r_2 - r_1)}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$	$d \cong 0 \Rightarrow i_H = d \frac{n-1}{n}$

Pentru sistemele optice centrate, utilizând relațiile pentru (s_j, s'_j) - determinate prin drumuri paraxiale - rezultă următoarele expresii ale caracteristicilor de referință:

- distanța focală imagine:

$$f' = s_1 \frac{s_2 s_3 \dots K s_k}{s_2 s_3 \dots K s_k} = s_1 \prod_{j=2}^k \frac{s_j}{s_j} \quad \wedge \quad s_1 = \infty \quad (2.1)$$

- distanța focală obiect:

$$\bar{f} = \frac{h_1 h_2 \dots h_k}{\sigma_1 h_1} \wedge \frac{h_k}{h_{k-1}} = \frac{s_1 \sigma_1 s_2 s_3 \dots s_k}{\sigma_1 s_1 s_2 s_3 \dots s_{k-1}} \quad (2.2)$$

- abscisele punctelor principale (fig.2.2):

$$-\frac{\bar{f}}{z_H} = +1 \Rightarrow z_H = -\bar{f}, \quad -\frac{z_{H'}}{f'} = +1 \Rightarrow z_{H'} = -f'. \quad (2.3)$$

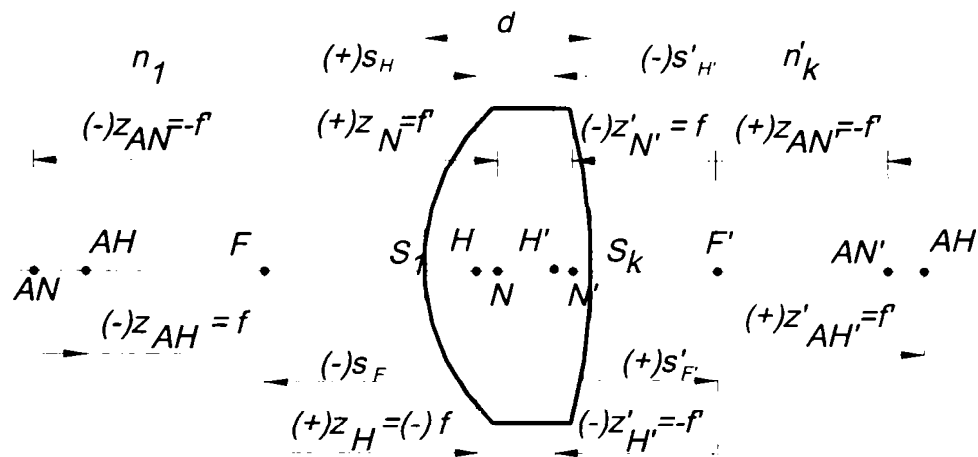


Fig.2.2. Puncte și plane cardinale

- abscisele punctelor antiprincipale:

$$-\frac{\bar{f}}{z_{AH}} = -1 \Rightarrow z_{AH} = \bar{f}, \quad -\frac{z_{AH'}}{f'} = -1 \Rightarrow z_{AH'} = f'. \quad (2.4)$$

- abscisele punctelor nodale:

$$\frac{\bar{f}}{z_N} = +1 \Rightarrow z_N = \bar{f}, \quad \frac{z_N}{f'} = +1 \Rightarrow z_N = f'. \quad (2.5)$$

- abscisele punctelor antinodale:

$$\frac{\bar{f}}{z_{AN}} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -\bar{f}, \quad \frac{z_{AN}}{f'} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -f'. \quad (2.6)$$

În cazul particular al sistemelor optice situate în aer, distanțele focale sunt egale în modul, astfel încât punctele nodale se suprapun cu punctele principale, iar punctele antinodale cu cele antiprinicipale. În figura 2.2 este reprezentat cazul general în care mediul obiect și mediul imagine au indici de refracție diferiți.

Planele perpendiculare pe axa optică și care conțin punctele cardinale reprezintă planele cardinale ale sistemului.

- mărirea transversală (liniară):

$$\beta = \frac{y_k'}{y_1} = \frac{y_1' y_2'}{y_1 y_2} \wedge \frac{y_k'}{y_k} = \beta_1 \beta_2 \wedge \beta_k = \prod_{j=1}^k \beta_j, \quad \text{sau} \quad (2.7)$$

$$\beta = \frac{s_1' s_2' K s_k' n_1}{s_1 s_2 K s_k n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \frac{s_j'}{s_j}. \quad (2.8)$$

- mărirea unghiulară:

$$\gamma = \frac{\sigma_k'}{\sigma_1} = \frac{\sigma_1' \sigma_2'}{\sigma_1 \sigma_2} \wedge \frac{\sigma_k'}{\sigma_k} = \gamma_1 \gamma_2 K \gamma_k = \prod_{j=1}^k \gamma_j = \frac{s_1 s_2 K s_k}{s_1' s_2' K s_k'} = \prod_{j=1}^k \frac{s_j}{s_j'}. \quad (2.9)$$

- mărirea axială (longitudinală):

$$\alpha = \prod_{j=1}^k \alpha_j = \left(\frac{s_1' s_2' K s_k'}{s_1 s_2 K s_k} \right)^2 \frac{n_1}{n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \left(\frac{s_j'}{s_j} \right)^2 \quad (2.10)$$

2.2. CRITERII DE EVALUARE A CALITĂȚII IMAGINII

2.2.1. Considerații generale

În mod tradițional, analiza sistemelor optice se rezuma la determinarea aberațiilor geometrice și cromatice reziduale, al căror calcul are în vedere criterii specifice opticii geometrice. În prezent, pentru exprimarea rafinată a calității imaginii, tot mai mult se apelează modelul ondulatoriu al luminii, conceptul central fiind frontul de undă. Deformația acestuia în raport cu o sferă ideală se definește ca aberație de undă sau diferență de drum optic. Acest parametru poate fi asociat aberațiilor geometrice, astfel încât se pot face interpretări imediate ale influenței aberațiilor asupra frontului de undă sau se pot impune toleranțe ale aberației de undă, care implicit stabilesc și valorile admise ale aberațiilor.

Cei mai sensibili parametri de calitate a imaginii rezultă prin analiză Fourier, respectiv prin determinarea elementelor funcției optice de transfer.

În tabelul 2.2 se prezintă, în esență, parametrii de calitate a imaginii și metodele necesare deducerii lor. Pe parcursul capitolului sunt descrise și analizate elementele înscrise în tabel.

Tabelul 2.2

Nr.crt.	Parametru de calitate a imaginii	Simbol	Metode de calcul
1	Aberația sferică transversală și axială	dy', ds'	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective
2	Coma tangențială și sagitală	k_T, k_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală
3	Curburile astigmatice de câmp tangențială și sagitală	z_T, z_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective și pupilare principale; Trasarea oblică a razelor
4	Distorsiunea	$d\tilde{y}'_{\%}$	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective și pupilare principale
5	Aberația de undă	OPD, RMS OPD	Calcul geometric
6	Diagrama spot	-	Trasare vectorială a razelor
7	Funcția imagine a punctului	PSF	Analiză Fourier
8	Funcția optică de transfer de modulație	MTF	Analiză Fourier
9	Funcția optică de transfer de fază	PTF	Analiză Fourier
10	Funcția imagine a liniei	LSF	Analiză Fourier
11	Raportul Strehl	Strehl	Funcție de OPD sau MTF
12	Criteriul Rayleigh	RL	Impune valoarea maximă $OPD=\lambda/4$ pentru sisteme limitate la difracție

Valorile efective ale parametrilor de calitate a imaginii determină calificativul de apreciere a sistemului optic analizat. În tabelul 2.3 este redată o clasificare a sistemelor optice, pe criteriul calității, conform standardelor actuale.

Tabelul 2.3

Parametru	Toleranțe pentru sistem optic comercial	Toleranțe pentru sistem optic precis	Toleranțe pentru sistem optic limitat la difracție
RMS OPD	0.25λ	0.1λ	$<0.07\lambda$
OPD	2λ	0.5λ	$<0.25\lambda$

Se observă faptul că cea mai importantă caracteristică pentru analiză este considerată *aberația de undă*, care reprezintă elementul de legătură atât cu parametrii geometrici cât și cu parametrii Fourier. Rezultă, de asemenea, că atributul de *limitat la difracție* revine sistemelor care îndeplinesc criteriul Rayleigh. Echivalența informativă între criteriul Rayleigh, Raportul Strehl, OPD, RMS OPD și toleranțele aberațiilor geometrice (pentru criteriul Rayleigh $\lambda/4$) sunt prezentate în tabelul 2.4. [O2, S5, S6].

Tabelul 2.4

OPD	RMS OPD	Raport Strehl	ds'	k_T	z_T, z_S	Calitatea sistemului
0.0	0.0	1.00				ideal
0.25 RL= $\lambda/16$	0.018 λ	0.99				
0.5 RL= $\lambda/8$	0.036 λ	0.95				
1.0 RL= $\lambda/4$	0.07 λ	0.80	$ds'_{Mmax} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin^2 \sigma'}$	$\delta = \pm 2\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	limitat la difracție
2.0 RL= $\lambda/2$	0.14 λ	0.40				precis
3.0 RL=0.75 λ	0.21 λ	0.10				comercial
4.0 RL= λ	0.29 λ	0.00				

Analiza completă a unui sistem optic, cuprinzând toate elementele descrise mai sus impune cu necesitate utilizarea calculului automat, atât datorită volumului foarte mare de lucru, cât și metodelor numerice iterative utilizate în rezolvarea integralelor necesare pentru analiza Fourier.

2.2.2. Criterii ondulatorii de calitate

În mod generic, abaterile de la forma și poziția frontului de undă ideal sunt denumite *aberație de undă* sau *diferență de drum optic*.

La sistemele optice cu aberații geometrice, frontul de undă imagine, real, diferă de cel ideal - sferic și centrat în punctul imagine. Frontul de undă real poate fi sferic dar cu o curbura diferită de cea a sferei de referință sau poate avea formă asferică, funcție de aberația care se manifestă în sistem.

În figura 2.3 este prezentat efectul aberației sferice introduse de o lentilă convergentă biconvexă, asupra fronturilor de undă emergente. Acestea își păstrează forma sferică, dar au raza de curbură mai mică decât cea a sferei de referință.

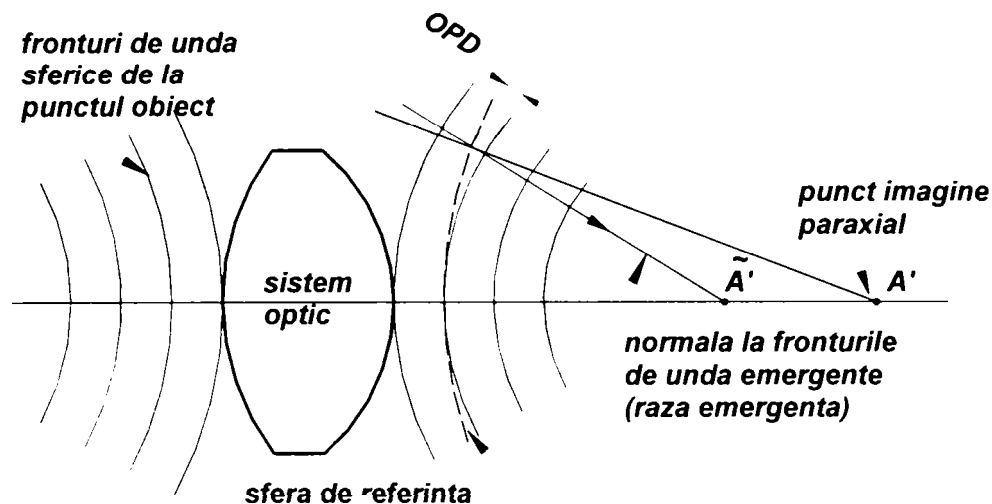


Fig. 2.3. Aberația sferică a unei lentile convergente (sistem optic convergent)

În figură este reprezentată sfera de referință centrată în punctul imagine paraxial A' și sferele având curbură mai accentuată, corespunzătoare deschiderii maxime. Raza emergentă marginală este locul geometric al unui punct pe fronturile succesive, are direcția normală la fronturi și intersectează axa optică în punctul imagine extraaxial \tilde{A}' . Pe direcția razei sferei de referință, distanța dintre sfera reală și cea de referință reprezintă aberația de undă sau diferența de drum optic (OPD).

Aberația de undă se exprimă în număr de lungimi de undă și, ca urmare, apelarea ei în interpretarea celorlalte aberații are sens numai dacă acestea au valori mici, de ordinul de mărime al lungimilor de undă.

OPD reprezintă un parametru de calitate important. Conform criteriului Rayleigh, sistemele limitate la difracție au OPD mai mic decât un sfert de lungime de undă.

Prelucrarea statistică a OPD pe întreaga deschidere a sistemului permite determinarea parametrului RMS OPD (rădăcina medie pătratică a diferenței optice de drum), care este considerat ca parametru sintetic de caracterizare a calității imaginii. Conform criteriului Rayleigh, sistemele limitate la difracție au $\text{RMS OPD} < 0.07\lambda$.

Din punct de vedere ondulatoriu, un sistem optic ideal, lipsit de aberații, este afectat de erori de formare a imaginii datorate deschiderii finite a componentelor. Un astfel de sistem nu formează imaginea unui punct obiect tot într-un punct. Acest deziderat s-ar realiza numai în cazul deschiderilor infinite. Deschiderile finite ale diaframelor și monturilor sistemului determină efecte de difracție caracteristice. Imaginea unui punct, datorită acestor efecte, este o pată de difracție, cu dimensiuni finite și o distribuție energetică neuniformă.

Iluminarea în planul imagine este distribuită într-o serie de inele luminoase și întunecate alternante. În mijlocul figurii de difracție se află un cerc de luminozitate maximă.

Pentru deschiderea circulară a diafragmei, distribuția intensității luminoase în planul imagine este de forma:

$$I = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{m^2}{2^2 2!} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{m^3}{2^3 3!} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{m^4}{2^4 4!} \right)^2 - \dots \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(m)}{m} \right]^2 \quad (2.11)$$

unde $m = \frac{\pi D \sin \alpha}{\lambda}$, D este deschiderea diafragmei (2.12)

iar $J_1(m)$ este funcția Bessel de ordinul I.

Relația (2.11) indică o scădere rapidă a iluminării de la pata luminoasă centrală numită cercul sau pata Airy la inelele luminoase concentrice dinspre periferia figurii de difracție (fig.2.4).

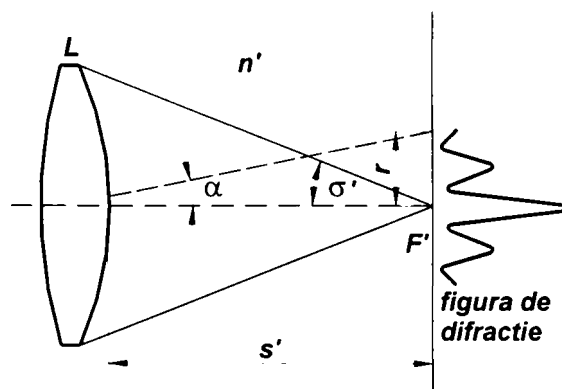


Fig. 2.4 Schemă pentru analiza fenomenelor ondulatorii în planul imagine

În tabelul 2.5 sunt prezentate caracteristicile numerice privind dimensiunile și

iluminarea petei Airy și a inelelor înconjurătoare.

Tabelul 2.5

Nr. de ordine al inelului	Raza inelului	Iluminare relativă	Energia luminoasă a inelului
maxim central	-	1.000	83.9%
primul inel întunecat	$0.61\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
primul inel luminos	$0.82\lambda/n'\sin\sigma'$	0.017	7.1%
al doilea inel întunecat	$1.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al doilea inel luminos	$1.33\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0041	2.8%
al treilea inel întunecat	$1.62\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al treilea inel luminos	$1.85\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0016	1.5%
al patrulea inel întunecat	$2.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al patrulea inel luminos	$2.36\lambda/n'\sin\sigma'$	0.00078	1.0%

Rezultă că 84% din energia totală a figurii de difracție se află în pata Airy, unde iluminarea este de aproape 60 de ori mai intensă decât în primul inel luminos. În general, sunt semnificative pata centrală și primele două inele, celelalte fiind prea slabe pentru a mai fi sesizate, indiferent care ar fi receptorul.

Prezența aberațiilor conduce la modificări ale formei, dimensiunilor și distribuției energetice a figurii de difracție.

Valoarea normată a raportului dintre iluminarea în pata Airy obținută cu un sistem optic dat și iluminarea în pata Airy a sistemului ideal (limitat la difracție) reprezintă un parametru de calitate a imaginii numit *Raportul Strehl*.

2.2.3. Aberațiile geometrice și cromatice

2.2.3.1. Aberația sferică

Aberația sferică (de deschidere sau de apertură) se manifestă în fascicule largi și are ca efect variația abscisei imagine funcție de apertură. Practic, imaginea are aspect neclar. În figura 2.5 sunt prezentate comparativ un sistem ideal și un sistem real afectat de aberație sferică.

Aberația de sfericitate se redă grafic printr-o curbă reprezentând variația abscisei imagine sau a distanței focale imagine în funcție de apertura sistemului. Analitic, aberația de sfericitate axială sau longitudinală se exprimă prin diferența maximă a absciselor sau a distanțelor focale ce provin de la un fascicul incident:

$$ds' = \tilde{s}' - s' \text{ sau } ds' = \tilde{f}' - f'. \quad (2.13)$$

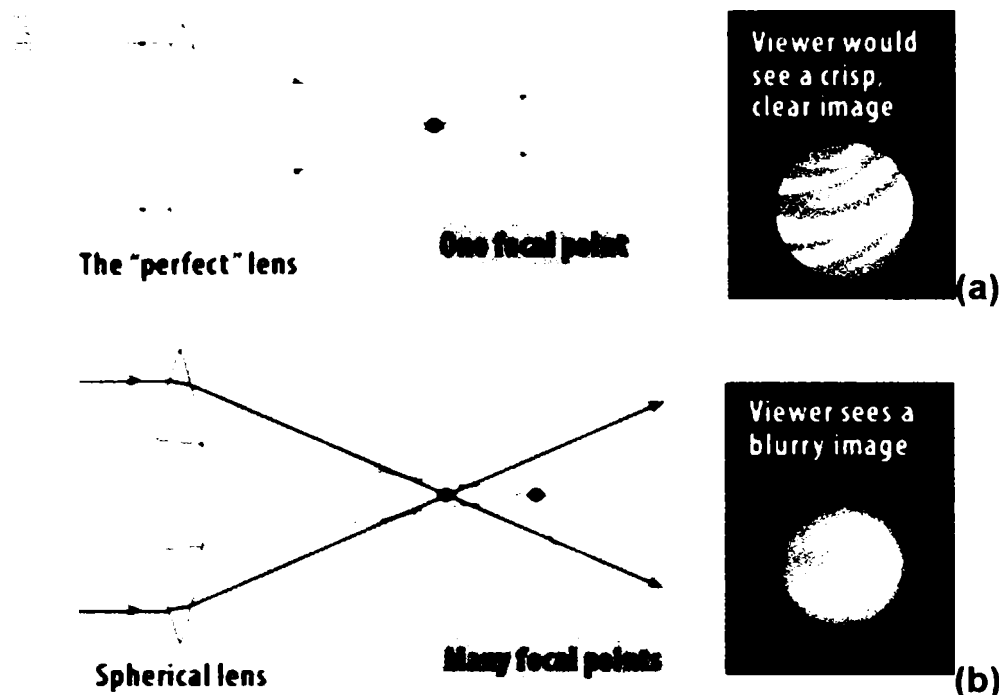


Fig.2.5 Forma fasciculului emergent la sisteme optice ideale (a) și reale, afectate de aberație sferică (b)

În cazul lentilelor convergente, aberația este negativă iar lentila se numește subcorectată. În cazul lentilelor divergente aberația se consideră pozitivă și lentila se numește supracorectată.

Pentru aceeași distanță focală și deschidere, aberația de sfericitate se schimbă în funcție de forma lentilei și de orientarea acesteia față de planele conjugate obiect-imagini.

Aberația de sfericitate transversală se notează cu dy' (fig.2.6) și se exprimă prin relația:

$$dy' = ds' \cdot \text{tg} \tilde{\sigma}'_k \tag{2.14}$$

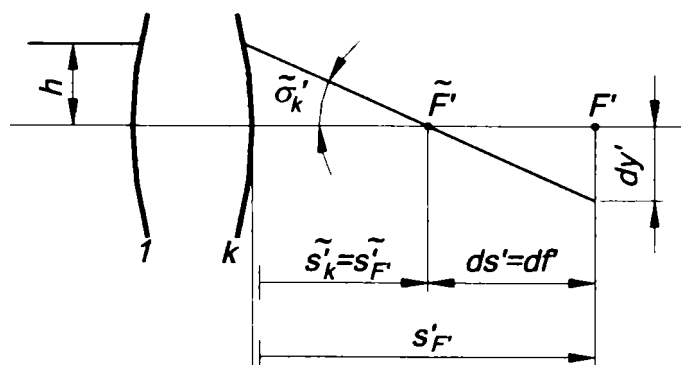


Fig.2.6 Aberația sferică transversală

Aberația sferică transversală reprezintă un parametru important de calitate a imaginii pentru că mărimea sa este o măsură a neclarității imaginii.

Stabilirea toleranțelor pentru aberația sferică se poate face aplicând criteriul Rayleigh (se impune condiția ca OPD să nu depășească $\lambda/4$):

$$ds'_{M \max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'_M} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)^2. \quad (2.15)$$

Aberația sferică transversală maximă admisă va fi:

$$dy'_{M \max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'_M} = \pm 8\lambda \left(\frac{f'}{D} \right). \quad (2.16)$$

Indicele "M" din relațiile (2.15) și (2.16) indică faptul ca acestea au fost scrise pentru razele marginale.

2.2.3.2. Coma

Coma este o aberație geometrică determinată de înclinarea și deschiderea mare a fasciculelor care pornesc de la puncte extraaxiale. Ea poate fi tratată ca o aberație sferică în cazul punctelor extraaxiale.

În figura 2.7 este prezentată o lentilă cu un fascicul incident înclinat.

Imaginea punctului S pe suprafața imagine Σ (fig. 2.7.a) are un aspect specific de cometă, care a inspirat și numele aberației. Distribuția caracteristică a iluminării este explicată în figura 2.7.b.

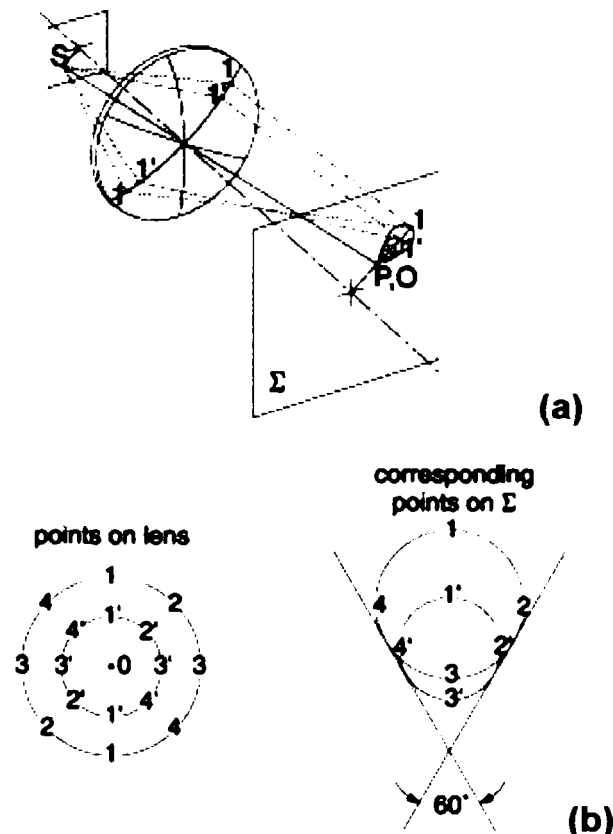


Fig.2.7 Coma determinată de un fascicul incident înclinat

Coma este o aberație cu efecte negative puternice asupra calității imaginii datorită formei asimetrice a petei luminoase și a distribuției neuniforme a luminii în această pată.

Mărimea aberației este influențată de forma lentilelor și de poziția tuturor monturilor din sistemul optic. De asemenea, este direct proporțională cu depărtarea punctului obiect față de axa optică în planul xy . Ca urmare, coma este una dintre aberațiile care limitează câmpul util obiect, respectiv imagine, deoarece, de la centru spre margine, imaginea devine tot mai neclară.

Relația pentru calculul comei tangențiale este de forma:

$$k_T = \tilde{y}'_1 - y'_p + \frac{(\tilde{y}'_1 - \tilde{y}'_2)(\operatorname{tg}\tilde{\alpha}'_1 - \operatorname{tg}\tilde{\alpha}'_p)}{\operatorname{tg}\tilde{\alpha}'_2 - \operatorname{tg}\tilde{\alpha}'_1} \cong \frac{\tilde{y}'_1 + \tilde{y}'_2}{2} - y'_p, \quad (2.17)$$

unde $y'_{1,2}$ reprezintă mărimea imaginilor determinate de razele marginale în planul imaginii paraxiale formate de raza pupilară principală.

Coma sagitală se poate determina funcție de cea tangențială:

$$k_s = \frac{1}{3} k_T. \quad (2.18)$$

Toleranța pentru aberația de comă, stabilită pe baza criteriului Rayleigh $\lambda/4$ aplicat OPD, este:

$$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin\tilde{\alpha}'}. \quad (2.19)$$

2.2.3.3. Astigmatismul și curbura de câmp

Astigmatismul este o aberație geometrică datorată înclinării mari a fasciculelor înguste față de axa optică. În figura 2.8 este pus în evidență modul în care rezultă două imagini distincte în plan tangențial, respectiv sagital (definite relativ la raza pupilară principală).

Pentru obiect situat la infinit, cele două linii imagine reprezintă liniile de focar tangențial, respectiv sagital numite focarele Sturm.

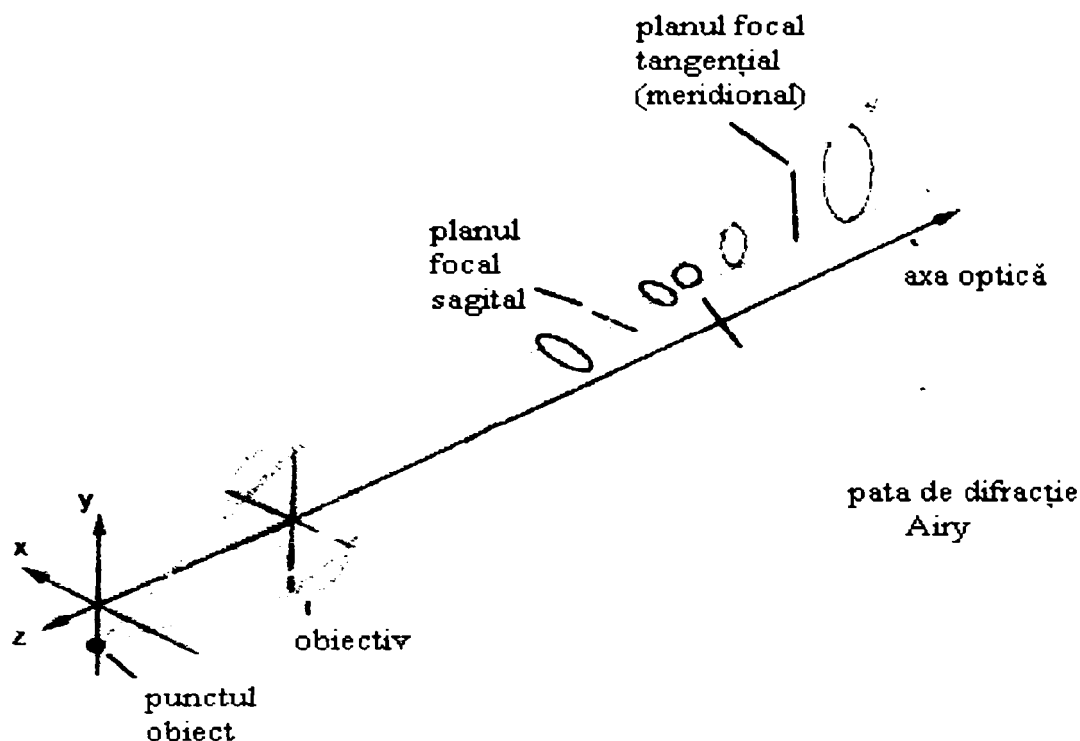


Fig.2.8 Manifestarea aberației de astigmatism

Astigmatismul se manifestă prin neclaritatea imaginii și are efecte minime într-o secțiune situată între liniile de focar, într-o zonă de difuzie minimă.

Dacă se realizează suprapunerea suprafețelor imagine curbe tangențială și sagitală astigmatismul se consideră corectat. Curbura suprafeței imagine, în absența astigmatismului, reprezintă un alt tip de aberație geometrică numită curbura de câmp. Suprafața curbă imagine poartă numele de suprafață Petzval. Spre deosebire de aceasta, care are formă sferică, suprafețele tangențială și sagitală generate de astigmatismul primar au formă de paraboloid.

Astigmatismul nu se manifestă pentru punctele axiale. În cazul punctelor extraaxiale este cu atât mai accentuat cu cât depărtarea acestora față de axa optică este mai mare. Mărimea aberației de astigmatism depinde de puterea și forma lentilei, dar și de poziția și deschiderea diafragmei de apertură care determină pupila de intrare.

Pentru o lentilă singulară astigmatismul este numeric aproximativ egal cu raportul y'^2/f' .

Considerând suprafața Petzval ca referință, dacă suprafețele astigmatice sunt curbate spre sistemul optic astigmatismul se numește negativ sau subcorectat. În caz contrar, este pozitiv sau supracorectat.

Curbura de câmp poate fi, de asemenea, pozitivă sau negativă, după cum centrul său de curbură se află între lentilă și suprafață, respectiv după aceasta. Curbura de câmp are numai o măsură axială sau longitudinală și reprezintă distanța dintre suprafața imagine de referință plană și suprafața Petzval. Pentru o lentilă singulară curbura de câmp este aproximativ $y'^2/2nf$.

Astigmatismul se apreciază prin curburile de câmp astigmatice tangențială z_t și sagitală z_s , determinate pentru diverse înclinări ale razei pupilare principale (pornind de la mai multe puncte de pe înălțimea obiectului). Mărimile z_t și z_s exprimă de fapt diferențele dintre proiecțiile pe axa optică a razelor tangențială și sagitală infinit apropiate razei pupilare principale și distanța imagine determinată de raza pupilară principală, raportată la axa optică. Aceste diferențe sunt asimilate cu distanțele de la punctele imagine astigmatice la suprafața imagine ideală plană, perpendiculară pe axa optică într-un punct corespunzător abscisei imagine meridiane date de raza pupilară principală.

Toleranțele pentru curburile astigmatice de câmp sunt date de toleranța la adâncimea focarului. În majoritatea aplicațiilor această precizie nu este atinsă, aberațiile reale fiind mult mai mari decât cele prescrise din criteriul ondulatoriu Rayleigh $\lambda/4$.

2.2.3.4. Distorsiunea

Distorsiunea este o aberație geometrică determinată de faptul că poziția imaginii punctelor extraaxiale, măsurată pe axa y diferă de poziția imaginii ideale, paraxiale. Distorsiunea se poate exprima fie prin diferența dintre înălțimea reală \tilde{y}' a imaginii extraaxiale și înălțimea de referință paraxială a imaginii y' :

$$dy' = \tilde{y}' - y', \quad (2.20)$$

fie procentual – adimensional – cu raportare la înălțimea imaginii paraxiale:

$$dy'_{\%} = \frac{\tilde{y}' - y'}{y'} \cdot 100 \quad (2.21)$$

Aberația poate fi interpretată ca o variație a măririi transversale cu înălțimea obiectului. Această variație are ca efect formarea unor imagini care nu sunt asemenea cu obiectele.

Distorsiunea poate fi pozitivă sau negativă, după cum imaginea punctului

extraaxial se formează mai aproape, respectiv mai departe de axa optică în raport cu punctul imagine de referință.

În figura 2.9 este reprezentată imaginea unui obiect de formă pătrată și imaginile sale afectate de distorsiune negativă, respectiv pozitivă.

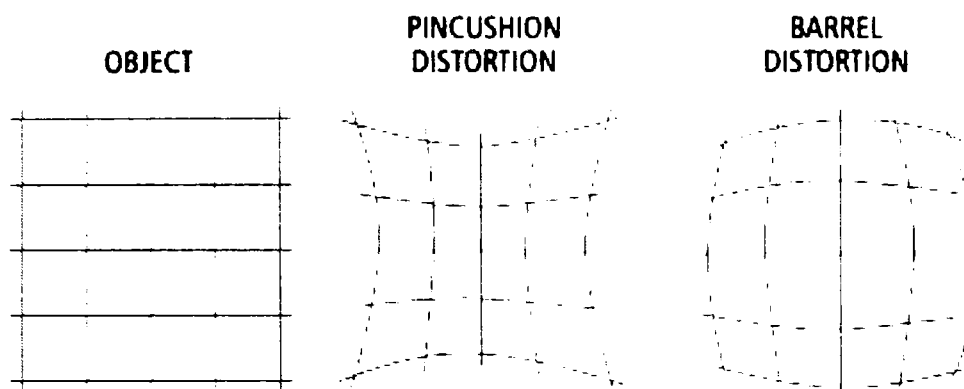


Fig.2.9 Imagini distorsionate negativ, respectiv pozitiv ale unui obiect de formă pătrată

Calculul distorsiunii presupune trasarea meridiană a razei pupilare principale, pentru determinarea înălțimii \tilde{y}'_p și trasarea paraxială a unei raze obiective și a razei pupilare principale, pentru calculul înălțimii de referință y' .

2.2.3.5. Aberații cromatice

Aberațiile cromatice sunt determinate de policromatismul luminii albe și manifestării fenomenului de dispersie. Dispersia materialelor optice în domeniul vizibil este monoton descrescătoare dar neliniară de la albastru spre roșu și, ca urmare, nu poate fi caracterizată printr-un singur parametru.

Indicatorii de dispersie utilizați în proiectarea componentelor optice sunt:

- ◆ dispersia medie (principală):

$$\Delta n = n_F - n_C \text{ sau } \Delta n = n_{F'} - n_{C'} \quad (2.22)$$

- ◆ numărul Abbe:

$$\nu_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}; \nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}; \nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.23)$$

- ◆ dispersii parțiale relative:

$$P_\lambda = \frac{n_{F'} - n_\lambda}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (2.24)$$

Indicii Fraunhofer e, F', C' corespund liniilor spectrale cu lungimea de undă 546.074 nm, 479.992 nm și respectiv 643.850 nm, care definesc radiații de culoare verde, albastră și respectiv roșie. Radiațiile e, F' și C' reprezintă liniile de referință, respectiv de delimitare a domeniului vizibil de calcul.

Aberația cromatică de poziție (longitudinală sau axială) determină formarea imaginii unui punct obiect axial sau poziția focarului în locuri distincte pe axa optică pentru lungimi de undă diferite (fig.2.10).

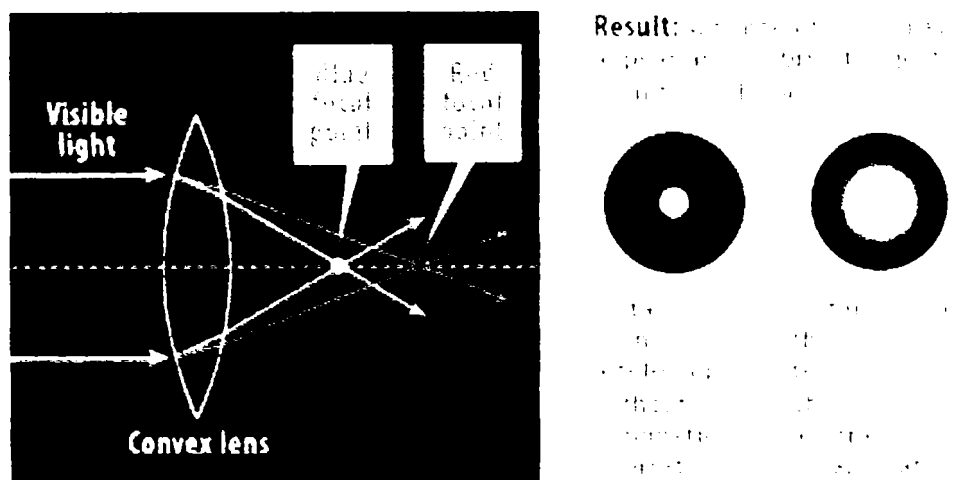


Fig.2.10 Aberația cromatică pentru lentila convergentă

Eliminarea cromatismului presupune egalitatea absciselor imagine pentru toate lungimile de undă și pentru orice înălțime de incidență, ceea ce, practic, este imposibil. În proiectarea sistemelor optice, în mod curent, se urmărește suprapunerea a două sau trei abscise imagine (pentru două sau trei lungimi de undă), ceea ce se dovedește suficient pentru o bună calitate a imaginii.

Determinarea aberației cromatice axiale presupune calculul aberației cromatice paraxiale și al aberației cromatice extraaxiale.

Aberația cromatică axială paraxială, pentru domeniul vizibil, este reprezentată de diferența absciselor imagine paraxiale pentru liniile de la marginea domeniului:

$$ds'_{cr} = s'_{F'} - s'_{C'} \tag{2.25}$$

Aberația cromatică axială extraaxială se exprimă ca diferență a absciselor imagine extraaxiale de la marginile spectrului vizibil, la diverse înălțimi de incidență:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \tilde{s}'_{F'} - \tilde{s}'_{C'} \tag{2.26}$$

Având în vedere faptul că aberația cromatică este influențată de înălțimea de incidență, variația sa poate fi privită ca o aberație sferică în dependență de lungimea de undă. Cele două aberații, sferică și cromatică se analizează de obicei împreună,

cu denumirea de sferocromatism. Curbele care definesc sferocromatismul au expresiile:

$$ds'_e = \tilde{s}'_e - s'_e, \quad (2.27)$$

$$ds'_{F'} = \tilde{s}'_{F'} - s'_e, \quad (2.28)$$

$$ds'_{C'} = \tilde{s}'_{C'} - s'_e, \quad (2.29)$$

Toleranțele pentru aberația cromatică după criteriul Rayleigh $\lambda/4$ sunt de forma:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \pm \frac{\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'}, \quad (2.30)$$

2.2.4. Parametri de calitate a imaginii derivați din funcția

optică de transfer

Funcția optică de transfer descrie capacitatea unui sistem optic de a transfera distribuția spațială a luminii din planul obiect în planul imagine.

Conceptul de funcție optică de transfer a apărut prin analogie cu funcția de transfer a sistemelor electronice. Sistemul optic răspunde la un impuls dreptunghiular - care modelează un obiect luminos punctiform - printr-o funcție de transfer numită funcția imagine a punctului sau PSF (point spread function) – sau la un semnal constituit de diverse frecvențe spațiale care pot fi asociate obiectelor luminoase extinse. În cazul acestora, sistemul optic se comportă ca un filtru spațial care permite transmiterea unor frecvențe anumite (detalii ale obiectului) în imagine, în timp ce restul frecvențelor vor fi tăiate de sistem.

Funcția optică de transfer, descrie, principial, efectele de difracție ale sistemului optic asupra frontului de undă incident. Analiza difracțională are sens pentru fronturi de undă care nu sunt puternic deformate din cauza aberațiilor geometrice și, cel puțin teoretic, este aplicată numai sistemelor optice limitate la difracție. Prin sistem optic limitat la difracție se înțelege un sistem optic care transformă o undă sferică provenită de la o sursă obiect punctiformă tot într-o undă sferică centrată într-un punct imagine. Sistemele optice reale prezintă într-o măsură mai mare sau mai mică întotdeauna aberații, ceea ce înseamnă că pot primi atributul de limitat la difracție doar cu oarecare aproximație și, eventual, pe zone limitate ale câmpului obiect.

Analiza energetică a imaginii pune în evidență faptul că o importanță deosebită pentru caracteristicile acesteia o are și modul de iluminare a obiectului, care impune tratări matematice diferite ale problemelor. În principiu, omițând aspectul spectral, se pot identifica două moduri de iluminare a obiectelor: spațial incoerentă și spațial coerentă. Iluminarea spațial incoerentă caracterizează sursele extinse, la care oscilațiile provenite de la diversele puncte componente ale sursei au faze decalate aleator, statistic. Intensitatea luminoasă în planul imagine rezultă în fiecare punct prin însumarea intensităților provenite de la punctele sursei. Admițând acest principiu, sistemele optice iluminate incoerent sunt liniare în intensitate.

Iluminarea spațial coerentă (eventual o sursă laser) asigură în toate zonele obiectului oscilații luminoase cu diferențe de fază constante în timp. În acest caz se admite că în planul imagine se însumează amplitudinile oscilațiilor luminoase, sistemele fiind considerate liniare în amplitudine.

În principiu, în cazul sistemelor optice liniare – care la acțiunea unor stimuli simultani au un răspuns egal cu suma răspunsurilor independente determinate de fiecare stimul – efectul componentelor optice și al diaframelor poate fi descris complet determinând imaginile surselor punctiforme care alcătuiesc câmpul obiect. Fiecărui punct i se asociază ca modelare matematică o funcție Dirac ($\delta(x,y) = \infty$, pentru $x = y = 0$ și $\delta(x,y) = 0$ pentru $\forall x,y \neq 0$), care are semnificația unui semnal foarte puternic și foarte îngust.

Funcția de răspuns a sistemului optic la un semnal Dirac se numește funcție imagine a punctului (PSF – point spread function [mm^{-2}]) și descrie distribuția normalizată a iluminării în imaginea punctului.

Obiectului luminos extins i se asociază funcția obiect $I_o(x,y)$, care descrie distribuția intensității luminoase în planul obiect, considerat iluminat incoerent, iar imaginii i se asociază funcția imagine $I_i(x,y)$, ca expresie a distribuției iluminării în planul imagine. Proprietatea de liniaritate a sistemului permite considerarea distribuției intensității luminoase în planul imagine ca sumă a efectelor fiecărui punct obiect. Răspunsul sistemului optic în cazul obiectelor extinse va depinde deci de funcția obiect și de răspunsul PSF. Din punct de vedere matematic funcția imagine este un produs de convoluție a funcției obiect și a PSF.

Transformata Fourier a funcției imagine a obiectului extins, iluminat incoerent, este egală cu produsul transformatelor Fourier ale PSF și funcției obiect.

Funcția optică de transfer (OTF – optical transfer function), este prin definiție, transformata Fourier a PSF și reprezintă răspunsul impulsional al sistemului optic.

OTF este o funcție complexă adimensională al cărei modul este unitar pentru frecvența spațială nulă. $OTF(r,s)$ și $PSF(x,y)$ sunt două funcții care formează o pereche Fourier, se pot deduce reciproc, una din cealaltă, leagă spațiul real (x,y) de spațiul Fourier (r,s) și au spectre reciproce.

Modulul funcției optice de transfer se numește funcție de transfer de modulație, MTF (modulation transfer function), funcție adimensională și, în cazul particular, dar frecvent, al mirei sinusoidale cu frecvență constantă are semnificația raportului dintre modulația imaginii și modulația obiectului. Modulația, cu semnificația optică de contrast se definește funcție de valorile minimă și maximă ale unei mărimi radiometrice (intensitate, iluminare, strălucire):

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (2.31)$$

Argumentul funcției optice de transfer se numește funcție de transfer de fază, PTF (phase transfer function) - funcție adimensională. PTF are valoarea nulă pentru frecvența spațială zero.

În practică, analiza Fourier bidimensională și policromatică este arareori utilizată, dat fiind că rezultate suficient de cuprinzătoare se pot obține prin analize unidimensionale repetate pentru diverse orientări ale axei de referință (axa optică, raza pupilară principală la diverse deschideri ale câmpului obiect) și pentru câteva lungimi de undă monocromatice (de obicei, cele trei de referință, de la extremitățile și mijlocul spectrului de interes).

Ca urmare, majoritatea softurilor dedicate analizei sistemelor optice vor pune la dispoziția utilizatorului, sub formă numerică și grafică, funcția de transfer de modulație și de fază funcție de o frecvență spațială relativă la o singură direcție, precizată de utilizator, eventual un set de curbe, care să caracterizeze planul tangențial și sagital, în raport cu axa de referință impusă.

Un alt motiv pentru care relațiile generale deduse din optica ondulatorie și Fourier nu pot fi direct aplicate este acela că descrierea obiectului printr-o funcție analitică privind distribuția energetică spectrală este imposibil de scris, cu excepția unor obiecte de formă foarte simplă. Acest lucru, însă, nu reprezintă un impediment și chiar ar constitui un efort inutil, având în vedere faptul că funcția optică de transfer

este o caracteristică a sistemului optic, independentă de forma, culoarea și contrastul obiectului și pentru a determina componentele sale (modulația și diferența de fază) poate fi utilizat, de fapt, orice fel de obiect. Standardele prevăd funcții obiect sinusoidale.

În tabelul 2.6 sunt redați sintetic parametrii de calitate a imaginii obținuți din analiza difracțională și semnificația lor.

Tabelul 2.6

Parametru difracțional	Caracteristici descrise din planul imagine
MTF	Rezoluția, cu precizarea frecvenței de tăiere Iluminarea globală a imaginii
PTF	Contrastul (inversări de contrast), distorsiuni ale imaginii
PSF	Distribuția iluminării în imaginea punctului, strălucirea și claritatea imaginii extinse

PSF este o caracteristică numerică normată a fiecărui sistem optic. Valoric, PSF este egal cu raportul Strehl, care mai poate fi definit și în raport cu MTF :

$$\text{Strehl} = \frac{\iint \text{MTF}_{\text{sistem real}}}{\iint \text{MTF}_{\text{sistem limitat la difracție}}}, \quad (2.32)$$

Expresia (2.32) corespunde, de fapt, raportului dintre aria de sub curba MTF a sistemului cu aberații și aria de sub curba MTF a aceluiași sistem perfect. Dacă sistemul real este caracterizat printr-o aberație de undă OPD, se pot utiliza relațiile aproximative de legătură :

$$\text{Strehl} = e^{-(2\pi \text{RMS OPD})^2} \cong 1 - (2\pi \text{RMS OPD})^2, \quad (2.33)$$

unde RMS OPD este exprimat în lungimi de undă.

MTF și PTF se analizează, în general sub formă grafică. Ambii parametri au valorile normate maxime egale cu unitatea și se reprezintă în funcție de frecvența spațială pe o direcție dată (frecvența spațială poate fi normată în raport cu frecvența de tăiere sau rămâne exprimată în perechi de linii/mm).

Limita de rezoluție sau frecvența de tăiere, r_{lim} , este de forma:

$$r_{\text{lim}} = \frac{2n' \sin \tilde{\sigma}'}{\lambda} = \frac{1}{\lambda(f'/D)}, \quad (2.34)$$

unde λ se exprimă în milimetri, iar f'/D este numărul de deschidere.

În mod practic, frecvența de tăiere nu reprezintă un criteriu de performanță în sine. Pentru fiecare aplicație, rezoluția sistemului optic este rațional să corespundă rezoluției receptorului de imagine.

Informativ, în tabelul 2.7 se redau rezoluțiile curente ale unor sisteme optice specifice și ale receptorului natural.

Tabelul 2.7

Sistem	Rezoluție	
	Distanța între două puncte rezolvate [μm]	Frecvență spațială [perechi de linii/mm]
Fax	125	4
Ochiul uman	16 (pe retină)	≈ 31
Obiectiv f/8	2.5	200
Sistem asociat scannerului	1	500
Sistem asociat microlitografiei	0.5	1000

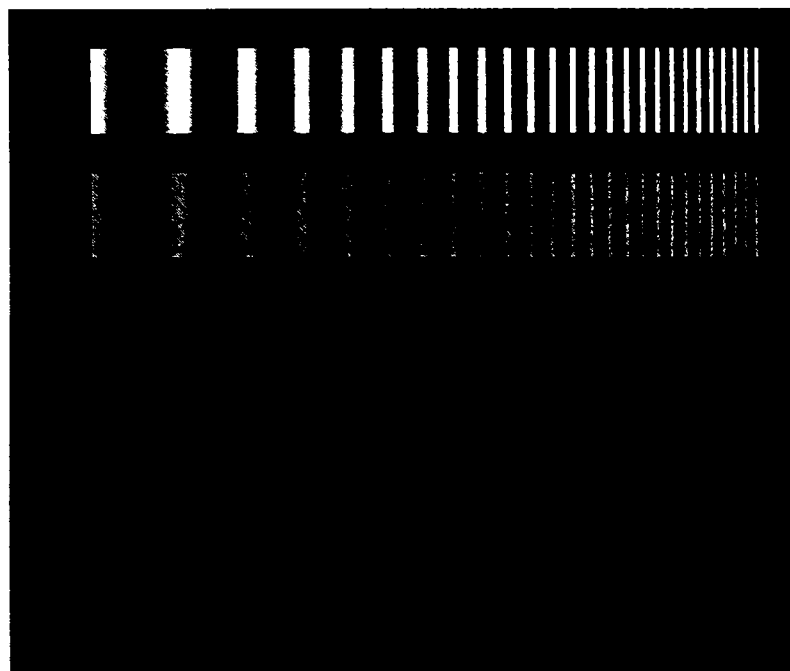
Considerând $r=r_0$ - pragul de sensibilitate al receptorului - interesează porțiunea de curbă reprezentând modulația pe domeniul $r=[0\dots r_0]$. Suprafața cuprinsă între axele de coordonate, curba de modulație și dreapta prag de sensibilitate a receptorului, este, la o anumită scară, proporțională cu contrastul și, în final, luminozitatea globală a imaginii. Rezultă că este important de urmărit și forma curbei de modulație.

Funcția optică de transfer de modulație, în cazul semnalului sinusoidal unidirecțional este egală cu raportul modulațiilor imagine și obiect:

$$\text{MTF}(r) = \frac{M_i}{M_o} \quad (2.35)$$

și reprezintă o măsură aproape universală de caracterizare nu numai a sistemelor optice formate din lentile, ci și a filmelor, ochiului, a diverși receptori fizici.

În figura 2.11 este exemplificată semnificația MTF prin imagini ale unei mire sinusoidale formate de sisteme optice având diverse valori ale MTF (de la 1 la 0.2).



**Fig. 2.11 Imaginea unei mire sinusoidale de bare la
MTF 0.02, 0.05 , 0.1, 0.2, 0.5 și 1**

În principiu, poate fi utilizată proprietatea de multiplicare a MTF a subansamblurilor care alcătuiesc un sistem mai complex, deși rezultatele pot, în general, să subestimeze caracteristicile ansamblului (pentru că, de exemplu, iluminarea este incoerentă numai pentru primul subansamblu sau lentilă și devine parțial coerentă pentru următoarele).

Partea imaginară a funcției optice de transfer - PTF – indică o deplasare a imaginii, concretizată prin distorsiune, de exemplu, dacă este liniară în frecvență. Neliniaritatea PTF poate avea și efecte vizibile în ceea ce privește distribuția energiei, în sensul că o defazare de 180° este echivalentă cu inversarea contrastului (față de figura obiect, figura imagine are poziția benzilor luminoase și întunecate inversată).

Pentru iluminarea coerentă, MTF este o dreaptă orizontală, situată la nivelul unității, pentru un domeniu de frecvențe spațiale cuprinse între 0 și frecvența de tăiere r_0 (fig.2.12).

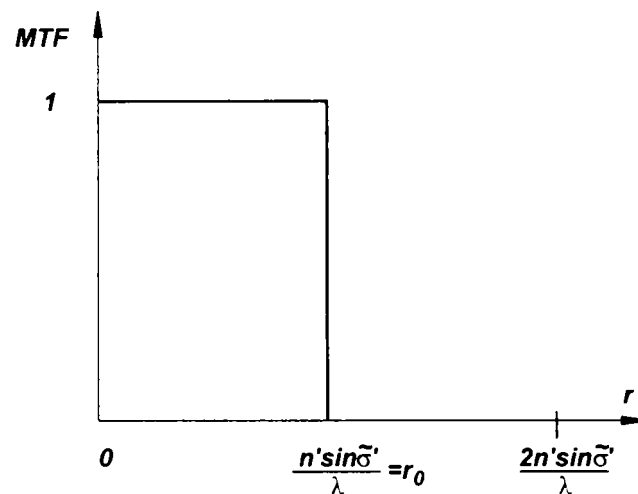


Fig.2.12 MTF în cazul iluminării coerente

Frecvența de tăiere are doar jumătate din valoarea care ar caracteriza sistemul în iluminare incoerentă:

$$r_0 = \frac{n' \sin \sigma'}{\lambda}. \quad (2.36)$$

Rezultă că iluminarea coerentă asigură contrast mai bun, iluminare globală mai mare a imaginii, dar rezoluție limită înjumătățită față de performanțele aceluiași sistem iluminat incoerent.

2.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În capitolul 2 al tezei sunt sintetizate criteriile de apreciere a calității imaginii și caracteristicile de referință ale sistemelor optice.

Sunt prezentate aberațiile geometrice și cromatice, ca parametri tradiționali de evaluare a calității imaginii, la care, în ultimii ani, s-au alăturat criteriile ondulatorii bazate pe diferența optică de drum dintre frontul de undă real și cel ideal și parametri derivați din funcția optică de transfer: MTF, PTF, PSF și Strehl.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot menționa:

- Sinteza informației dintr-un material extrem de bogat, eterogen ca metodă de abordare, provenind din lucrări de referință europene și americane de inginerie optică, cu referire la metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice

- Adaptarea metodelor de calcul prezentate de diverse surse care utilizează convenții proprii de notare și regula semnelor la prevederile din standardele românești
- Sinteza criteriilor geometrice și ondulatorii de apreciere a calității și discutarea critică a acestora

BIBLIOGRAFIE: [C2, C3, C5, C6, D1, D2, G1, G2, G4, G5, G7, G8, H2, K1, M1, M3, M4, N1, N2, N5, N6, O1, O2, P1, P6, S1, S3, S4, S5, S6, S7, S9, S10, S11, S12, W1, W2, W4, W14, W16, W26]

3. ELEMENTE DE SINTEZĂ A COMPONENTELOR OPTICE ELEMENTARE

3.1. GENERALITĂȚI

În construcția subansamblurilor optice lenticulare se utilizează trei tipuri de componente optice elementare: lentila singulară, dubletul acromat și tripletul apocromat. Fiecare tip de subansamblu are o structură sau un set de structuri tipice, care conțin combinații ale acestor entități de bază. De exemplu, obiectivele lunetelor, de regulă, sunt dublete acromate. Redresoarele utilizează un dublet acromat sau un ansamblu format din două dublete acromate asociate. Ocularele au structură mai complexă, având în vedere faptul că reprezintă ansamblurile cu câmpuri unghiulare mari. Ele conțin o lentilă singulară (convergentă sau divergentă) și un dublet acromat (ocularul Kelner, respectiv Konig), un triplet, două dublete acromate identice simetric așezate (ocularul simetric) etc.

În prima etapă de sinteză se apelează la expresiile puterii și aberațiilor primare ale lentilelor subțiri, pentru care grosimea la centru se neglijează. Aberațiile primare rezultă din dioptrica de ordinul trei și furnizează valori suficient de apropiate de cele reale pentru a fi utilizate ca ecuații de bază pentru determinarea razelor.

În teoria aberațiilor primare ale lentilelor subțiri se determină expresii pentru aberațiile longitudinale și transversale, geometrice și cromatice, deduse ca sume ale contribuției fiecărei lentile din șirul dat. Expresiile aberațiilor primare devin ecuații având ca necunoscute razele, coeficienții fiind determinați numeric cu ajutorul datelor rezultate din drumuri paraxiale. Termenul liber al ecuațiilor conține valoarea impusă de către proiectant pentru aberația respectivă. În general, calculul pornește cu valorile impuse acestor aberații.

3.2. SINTEZA LENTILEI SINGULARE DE CEA MAI BUNĂ FORMĂ PRIVIND ABERAȚIA SFERICĂ

Lentila singulară are două grade de libertate, corespunzătoare celor două raze și, ca urmare algoritmul poate avea la bază două condiții, dintre care una trebuie să fie rezervată puterii. În general, a doua condiție vizează minimizarea aberației sferice, rezultând așa-numita "lentilă de cea mai bună formă", pentru că, funcție de

indicele de refracție forma lentilei poate fi biconvexă, plan convexă sau menisc.

Cele două ecuații conțin expresia puterii lentilei infinit subțiri și a primei curburi deduse din condiția de minim al aberației sferice primare:

$$\Phi' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n-1)(c_1 - c_2) = (n-1)c \quad (3.1)$$

$$-G_2c^2 + 2G_4cc_1 - G_5cp = 0, \quad (3.2)$$

unde Φ este puterea optică, n – indicele de refracție de referință, r_1, r_2 – razele lentilei, c_1, c_2 – curburile lentilei, c – curbura totală a componentei, p – inversul distanței obiect, $G_{2,4,5}$ – coeficienți care depind de indicele de refracție de referință. Sunt prezentate în continuare expresiile tuturor coeficienților G , care vor fi utilizați și în algoritmi de sinteză a dubletului și tripletului. Relațiile de tipul (3.2) utilizate în sinteza subansamblurilor optice se numesc sume- G .

$$G_1 = \frac{1}{2}n^2(n-1), \quad G_2 = \frac{1}{2}(2n+1)(n-1), \quad (3.3)$$

$$G_3 = \frac{1}{2}((3n+1)(n-1)), \quad G_4 = \frac{1}{2n}(n+2)(n-1), \quad (3.4)$$

$$G_5 = 2 \frac{(n^2-1)}{n}, \quad G_6 = \frac{1}{2n}(3n+2)(n-1). \quad (3.5)$$

$$G_7 = \frac{G_2}{n}, \quad G_8 = \frac{G_1}{n}, \quad (3.6)$$

Rezolvarea sistemului format din ecuațiile (3.1), (3.2) conduce la soluțiile:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{0.5(2n+1)c + 2(n+1)p}{n+2} \\ c_2 = \frac{c[0.5n(2n+1) - (n+2)] + 2(n+1)p}{n+2} \end{cases} \wedge s \neq -\infty. \quad (3.7)$$

Pentru cazul frecvent al distanței obiect infinite se obțin soluțiile particulare:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{n(2n+1)c}{2(n+2)} \\ c_2 = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2n+1)} c_1 \end{cases} \wedge s = -\infty. \quad (3.8)$$

Pentru păstrarea distanței focale după introducerea grosimii finite, razele r_1 și r_2 ale lentilei echivalente se pot corecta funcție de grosimea d și raportul razelor $q=r_1/r_2$. Raza r_1 este de forma:

$$r_{1(d)} = \frac{r_1}{2} + \sqrt{\frac{r_1^2}{4} - r_1 d \frac{q(n-1)}{n(q-1)}}, \quad (3.9)$$

iar $r_{2(d)}$ rezultă din expresia distanței focale a lentilei groase:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{n}{n-1} \frac{r_{1(d)} r_{2(d)}}{n(r_{2(d)} - r_{1(d)}) + d(n-1)} \Rightarrow \\ \Rightarrow r_{2(d)} &= \frac{f'(n-1)[nr_1 - (n-1)d]}{n[f'(n-1) - r_1]} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Lentilele singulare sunt arareori utilizate ca subansambluri funcționale de sine-stătătoare. La sistemele mai vechi puteau constitui chiar un ocular (convergent sau divergent). În prezent, lentila singulară este foarte utilă în calitate de lentilă de câmp, destinată micșorării gabaritului transversal al tuburilor optice.

3.3. SINTEZA DUBLETELOR

3.3.1. Sinteza dubletului nelipit

Dubletul este un subansamblu format din două lentile, lipite sau separate printr-un strat de aer. Una dintre componente, caracterizată prin dispersie mică are puterea de același semn cu acela al dubletului, iar a doua componentă, având putere de semn opus este caracterizată prin dispersie mare. Pentru proiectare, cele două lentile pun la dispoziție patru grade de libertate, corespunzătoare celor patru raze. Un grad de libertate este întotdeauna rezervat condiției care exprimă puterea dubletului. Celelalte pot fi utilizate pentru a corecta trei aberații. Acestea, în general, sunt cromatismul axial, aberația sferică și coma. În cazul corecției aberației cromatice subansamblul se numește dublet acromat.

Sinteza dubletului nelipit, format din două lentile – una convergentă și una divergentă – separate printr-un strat subțire de aer, bazată pe teoria lentilelor subțiri, cuprinde următoarele etape:

- stabilirea datelor de proiectare: f – distanța focală, D – diametrul util al dubletului, 2ω - mărimea unghiulară a câmpului obiect, sorturile de sticlă Crown și Flint (cu caracteristicile n_e , n_F , n_C , v_e).
- calculul curburilor totale ale lentilelor componente

Notând cu a și b cele două lentile componente și scriind ecuația puterii sistemului (lentilele se consideră separate cu un strat de aer infinit subțire, astfel încât puterile lor se adună algebric) și condiția de acromatizare, se obțin următoarele expresii pentru distanțele focale ale componentelor:

$$f'_a = \frac{f'(v_a - v_b)}{v_a}, \quad (3.11)$$

$$f'_b = \frac{f'(v_b - v_a)}{v_b} = -f'_a \frac{v_a}{v_b}, \quad (3.12)$$

Din expresia puterii lentilei infinit subțiri rezultă curburile c_a și c_b :

$$c_a = \frac{1}{f'_a (n_a - 1)}, \quad (3.13)$$

$$c_b = \frac{1}{f'_b (n_b - 1)}. \quad (3.14)$$

unde c reprezintă notația pentru curbura totală a unei lentile ($c_a = 1/r_1 - 1/r_2 = c_1 - c_2$; $c_b = 1/r_3 - 1/r_4 = c_3 - c_4$).

□ calculul paraxial al drumului razei marginale și pupilare principale. În majoritatea cazurilor dubletele servesc drept obiective ale aparatelor afocale, care lucrează cu abscisă obiect infinită și au pupila de intrare în planul principal al obiectivului ($s = -\infty$, $\sigma_a = 0$, $h_p = 0$).

Pentru acest caz se obțin următoarele date succesive:

$$\begin{aligned} \sigma_a = 0, \quad h_a = \frac{D}{2} = h, \quad \sigma'_a = \frac{h}{f'_a}, \quad p_a = 0, \quad p'_a = \frac{1}{f'_a}, \\ \sigma_b = \sigma'_a = \frac{h}{f'_a}, \quad h_b = h, \quad \sigma'_b = h \left(\frac{1}{f'_a} + \frac{1}{f'_b} \right), \quad p_b = \frac{1}{f'_a}, \quad p'_b = \frac{h}{\sigma'_b} = \\ = \frac{1}{f'_a} + \frac{1}{f'_b}, \quad s'_b = s' = \frac{f'_a f'_b}{f'_a + f'_b} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pa} = \sigma'_{pa} = \sigma_{pb} = \sigma'_{pb} = \sigma_p, \quad h_{pa} = h_{pb} = 0, \quad Q_a = Q_b = 0, \\ y'_b = y' = -\sigma_p \frac{f'_a f'_b}{f'_a + f'_b} \end{aligned} \quad (3.16)$$

□ calculul factorilor-G

□ calculul curburilor c_1 și c_3 din condițiile de corectare a comei și aberației sferice.

Se pune condiția de anulare sau se acceptă o anumită valoare a comei:

$$\sum CC = CC_a + CC_b = 0 \quad (3.17)$$

unde CC reprezintă contribuția lentilei la coma sagitală transversală.

Rezultă o relație liniară între curburile c_1 și c_3 de forma:

$$c_3 = k_1 c_1 + k_2, \quad (3.18)$$

$$\text{unde } k_1 = -\frac{G_{5a}c_a}{G_{5b}c_b}, \quad (3.19)$$

$$k_2 = \frac{1}{0.25G_{5b}c_b} (G_{7a}c_a p_a + G_{8a}c_a^2 + G_{7b}c_b p_b + G_{8b}c_b^2). \quad (3.20)$$

Se scrie și condiția de anulare (sau se impune valoarea dorită) a aberației sferice:

$$\sum TSC = TSC_a + TSC_b = 0 \quad (3.21)$$

unde TSC reprezintă contribuția lentilei la aberația sferică transversală,

rezultând o expresie care conține ca necunoscute tot variabilele c_1 și c_3 . Se face o substituție, înlocuind curbura c_3 din relația (3.18) și se obține o ecuație de gradul doi cu necunoscuta c_1 :

$$k_3 c_1^2 + k_4 c_1 + k_5 = 0, \quad (3.22)$$

$$\text{unde } k_3 = G_{4a}c_a + G_{4b}c_b k_1^2, \quad (3.23)$$

$$k_4 = -G_{5a}c_a p_a - G_{2b}c_b^2 k_1 + 2G_{4b}c_b k_1 k_2 - G_{5b}c_b k_1 p_b - G_{2a}c_a^2, \quad (3.24)$$

$$k_5 = G_{1a}c_a^3 + G_{3a}c_a^2 p_a + G_{6a}c_a p_a^2 + G_{3b}c_b^2 p_b + G_{6b}c_b p_b^2 - \\ - G_{2b}c_b^2 k_2 + G_{4b}c_b k_2^2 - G_{5b}c_b p_b k_2 + G_{1b}c_b^3 \quad (3.25)$$

Ecuația (3.22) admite două, una sau nici o soluție reală, funcție de sorturile de sticlă alese.

Cunoscând valorile c_1 , c_3 , c_a , și c_b se pot afla și celelalte două curburi:

$$c_2 = c_1 - c_a, \quad (3.26)$$

$$c_4 = c_3 - c_b. \quad (3.27)$$

Puterea sistemului și sorturile de sticlă alese determină forma efectivă a componentelor dubletului, formă care poate fi una dintre cele schițate în figura 3.1.

Formele Fraunhofer, respectiv Steinheil se obțin după cum ordinea sticlelor

este Crown-Flint, respectiv Flint-Crown și rezultă pentru una dintre rădăcinile reale ale ecuației (3.22). Cealaltă rădăcină conduce la forma Gauss. Se preferă soluțiile Fraunhofer, cu sticla Crown în față pentru că aceasta este mai rezistentă la agresiunea mediului. Formele cu contact la centru, în general, se evită din cauza dificultăților de centrare.

Din punct de vedere al calității imaginii, forma Gauss este diferită de celelalte. Aberațiile sferice sunt cu un ordin de mărime mai ridicate, iar cele cromatice în spectrul secundar cu cca. 20% mai mari. Totuși, sferocromatismul este aproape jumătate față de celelalte variante. De asemenea, forma Gauss având curburi mari ale suprafețelor nu admite soluții pentru deschideri mari (care sunt limitate la $f/5 \dots f/7$). Formele Fraunhofer și Steinheil pot fi corectate până la deschideri sub $f/3$.

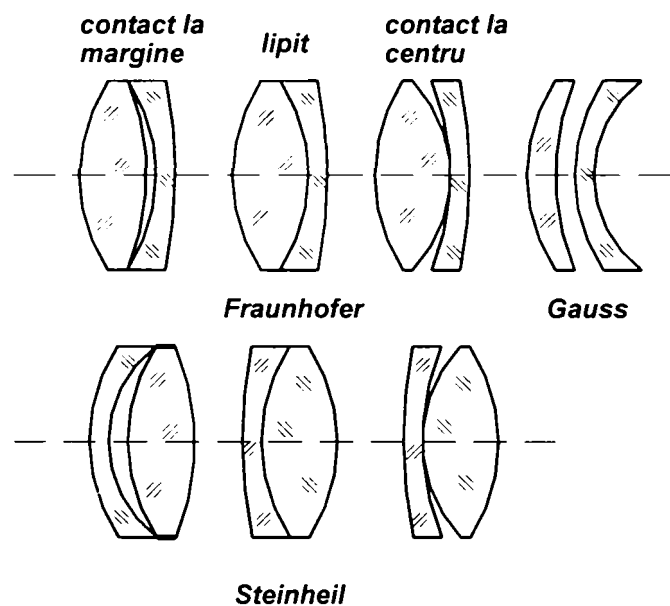


Fig.3.1. Formele dubletului acromat

Formele lipite cu $c_2=c_3$ pot rezulta numai întâmplător prin procedeul de calcul descris. Pentru obținerea dubletului lipit s-au dezvoltat tehnici separate.

- introducerea grosimii la centru a lentilelor.

Având determinate razele și cunoscând diametrul util al lentilelor se pot calcula diametrul total și grosimile la centru și la margine.

- analiza aberațiilor reziduale.

Se verifică valoarea reală a distanței focale sau a abscisei imagine și se pot face mici corecturi de raze (de regulă r_2), iterativ, până la obținerea unui rezultat situat în toleranțele impuse.

Se calculează valorile aberațiilor reziduale sferice, cromatice și de comă din teoria aberațiilor de ordinul trei sau prin drumuri. Dacă mărimea acestora nu corespunde calității impuse a imaginii se fac corecturi de raze (cele interioare sau/și r_1).

3.3.2. Sinteza dubletului lipit

Un caz particular de dublet este acela cu lentile lipite, fără strat de aer separator și având suprafețele de contact conforme ($c_2 \equiv c_3$). Dubletul lipit rezultă urmând mersul de calcul prezentat anterior. Obținerea acestei forme necesită impunerea din prima fază de proiectare a conformității suprafețelor în contact.

Dubletul lipit acromat reprezintă o soluție pentru corectarea aberației sferice și cromatice. Asocierea unei lentile convergente cu o lentiă divergentă (fig. 3.2) conduce la compensarea cel puțin parțială sau în anumite puncte a celor două aberații.

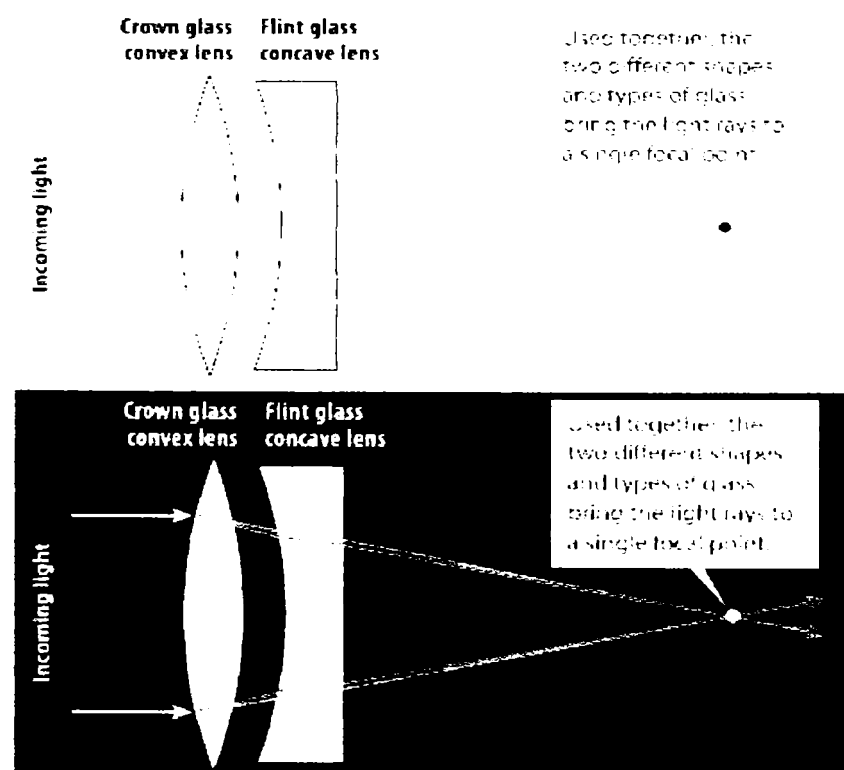


Fig. 3.2. Compensarea aberației sferice și cromatice prin asocierea unei lentile convergente cu una divergentă

Pentru proiectarea unui dublet lipit acromat, corectat la sfericitate și cromatism la deschiderea maximă (sau zonală) este indicat mersul de calcul prezentat în continuare, care include o etapă distinctă de acromatizare marginală (sau zonală).

Sinteza dubletului acromat lipit cuprinde următoarele etape:

□ declararea datelor de intrare: f' , D_u , s , $2\sigma_p$, sorturile de sticle alese. Ordinea Crown-Flint conduce la soluția din figura 3.3, în timp ce ordinea inversată a sticlelor furnizează o variantă cu lentila divergentă în față.

□ calculul curburilor c_a , c_b din condiția de acromatizare axială:

$$c_a = \frac{1}{f'(v_a - v_b)dn_a}, \quad (3.28)$$

$$c_b = \frac{1}{f'(v_b - v_a)dn_b}, \quad (3.29)$$

unde dn_a , dn_b reprezintă dispersia principală a sticlelor ($dn=n_F-n_C$).

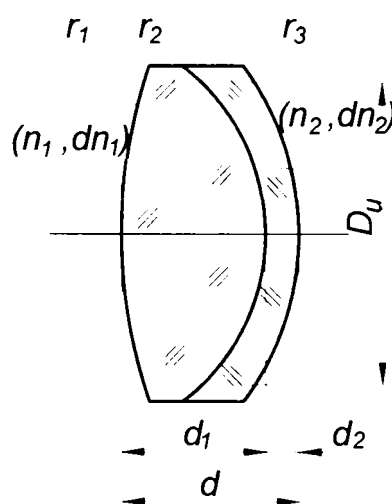


Fig.3.3. Caracteristicile geometrice ale dubletului acromat

□ calculul curburii c_1 din condiția de minim (sau anulare) a aberației sferice primare.

Expresia aberației sferice primare se scrie ca sumă a aberațiilor celor două lentile componente. Pentru prima lentilă se utilizează exprimarea funcție de c_1 , iar pentru a doua lentilă tot față de prima sa curbă, care pentru dublet este c_2 .

Se obține o expresie de gradul doi cu necunoscutele c_1 și c_2 în care se introduce substituția $c_2=c_1-c_a$, astfel încât forma finală a condiției de minim al aberației sferice primare este o ecuație de gradul doi în necunoscuta c_1 :

$$k_1c_1^2 + k_2c_1 + k_3 = 0. \quad (3.30)$$

Coeficienții ecuației se calculează cu relațiile:

$$k_1 = G_{4a}c_a + G_{4b}c_b, \quad (3.31)$$

$$k_2 = -G_{2a}c_a^2 - G_{5a}c_a p_a - G_{2b}c_b^2 - 2G_{4b}c_a c_b - G_{5b}c_b p_b, \quad (3.32)$$

$$k_3 = G_{1a}c_a^3 + G_{3a}c_a^2 p_a + G_{6a}c_a p_a^2 + G_{1b}c_b^3 + G_{2b}c_a c_b^2 + G_{3b}c_b^2 p_b + G_{4b}c_a^2 c_b + G_{5b}c_a c_b p_b + G_{6b}c_b p_b^2 \quad (3.33)$$

- determinarea grosimii la centru a lentilelor.
- calculul curburii c_3 din condiția de acromatizare marginală, prin metoda “ $\tilde{d}-d$ ”.

Condiția de acromatizare marginală (sau zonală) se exprimă sub forma:

$$\sum (\tilde{d} - d)dn = 0 \text{ sau } (\tilde{d}_a - d_a)dn_a + (\tilde{d}_b - d_b)dn_b = 0, \quad (3.34)$$

unde \tilde{d} este lungimea geometrică a razei marginale printr-o lentilă, iar d reprezintă lungimea parcursă de raza paraxială, aproximată prin grosimea la centru.

Sunt necesare următoarele date intermediare

$$\begin{cases} x_j = r_j [1 - \cos(\tilde{\sigma}_j - \tilde{i}_j)] \\ y_j = r_j \sin(\tilde{\sigma}_j - \tilde{i}_j) \end{cases} \quad (3.35)$$

Relațiile (3.18) se aplică pentru determinarea coordonatelor x_1, x_2, y_1, y_2 ale punctelor de incidență pe primele două suprafețe ale dubletului. Ele sunt necesare pentru calculul lungimilor parcurse de raza marginală prin prima lentilă:

$$\tilde{d}_a = (d_a + x_2 - x_1) / \cos \tilde{\sigma}'_1. \quad (3.36)$$

Coordonatele celui de-al treilea punct de incidență sunt:

$$\begin{cases} x_3 = \tilde{d}_b \cos \tilde{\sigma}'_2 + x_2 - d_b \\ y_3 = y_2 - \tilde{d}_b \sin \tilde{\sigma}'_2 \end{cases}, \quad (3.37)$$

unde \tilde{d}_b a fost determinat din expresia (3.19).

Se poate calcula și a treia rază:

$$r_3 = \frac{x_3^2 + y_3^2}{2x_3}. \quad (3.38)$$

- verificarea puterii și analiza aberațiilor sferice și cromatice reziduale.
- Dacă soluția obținută nu se încadrează în toleranțele admise pentru distanța

focală sau aberații, se fac mici corecții iterative de raze până la obținerea preciziei dorite.

Anexa 3.1 conține codul unui program automat de calcul al dubletului acromat, scris în limbajul Qbasic.

3.4. SINTEZA TRIPLETELOR LIPITE

Tripletele sunt subansambluri formate din trei lentile lipite sau nelipite, care prin cele șase până la opt grade de libertate corespunzătoare razelor permit controlul unui număr mare de aberații.

Cel mai frecvent, tripletul lipit este utilizat ca subansamblu apocromat, care corectează cromatismul axial și spectrul secundar.

Calculul de gabarit al apocromatului se bazează pe trei ecuații care vizează puterea impusă, acromatizarea și corectarea spectrului secundar, utilizând teoria aberațiilor lentilelor subțiri:

$$\begin{cases} v_a c_a \Delta n_a + v_b c_b \Delta n_b + v_c c_c \Delta n_c = \frac{1}{f'} \\ c_a \Delta n_a + c_b \Delta n_b + c_c \Delta n_c = 0 \\ P_a c_a \Delta n_a + P_b c_b \Delta n_b + P_c c_c \Delta n_c = 0 \end{cases}, \quad (3.39)$$

unde a,b,c reprezintă indicii de simbolizare a celor trei lentile,

v - numărul Abbe,

Δn – dispersia principală,

c – curbura totală a fiecărei lentile,

P – dispersia parțială a celor trei materiale.

Sistemul (3.22) conduce la următoarele soluții pentru curburile totale ale lentilelor:

$$\begin{cases} c_a = \frac{1}{f' E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_b - P_c}{\Delta n_a} \right) \\ c_b = \frac{1}{f' E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_c - P_a}{\Delta n_b} \right) \\ c_c = \frac{1}{f' E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_a - P_b}{\Delta n_c} \right) \end{cases}, \quad (3.40)$$

unde s-a notat

$$E = \frac{v_a(P_b - P_c) + v_b(P_c - P_a) + v_c(P_a - P_b)}{v_a - v_c}. \quad (3.41)$$

Este important de observat că valoarea mărimii E nu poate fi nulă, pentru a nu obține curburi infinite. Pentru evitarea acestui caz, alegerea sticlelor trebuie făcută astfel încât într-o reprezentare $P(v)$ cele trei materiale să nu fie coliniare, ci să se afle în vârfurile unui triunghi (fig.3.4).

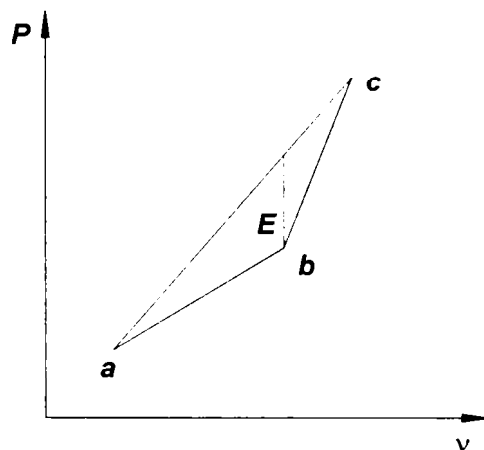


Fig.3.4. Poziția materialelor apocromatului într-o reprezentare $P(v)$

Se poate urmări acromatizarea pe un domeniu mai larg utilizând liniile spectrale g (435.830 nm), e (546.074 nm), C (656.272 nm), numărul Abbe $v_e = (n_e - 1)/(n_g - n_C)$ și dispersia parțială relativă $P_{eg} = (n_g - n_e)/(n_g - n_C)$, sau liniile spectrale F' (479.99nm), e (546.074 nm), C' (643.847 nm), numărul Abbe $v_e = (n_e - 1)/(n_{F'} - n_{C'})$ și dispersia parțială relativă $P_{eF'} = (n_{F'} - n_e)/(n_{F'} - n_{C'})$.

Pentru determinarea curburilor celor șase dioptri se impune o valoare oarecare pentru curbura c_1 (recomandabil $c_1 = (0.6 \dots 0.8)c_a$). Celelalte curburi se pot calcula din relațiile:

$$c_2 = c_1 - c_a, \quad (3.42)$$

$$c_3 = c_2 - c_b, \quad (3.43)$$

$$c_4 = c_3 - c_c. \quad (3.44)$$

Ultima curbura c_4 se poate afla și prin metoda de acromatizare marginală " $\tilde{d} - d$ ", după inserarea grosimilor la centru.

Se verifică puterea sistemului rezultat și se corectează razele, preferabil prin

metoda scalării, până la obținerea distanței focale cu precizia impusă.

Se determină aberațiile reziduale și dacă este necesar se introduc noi corecturi iterative ale razelor.

În Anexa 3.2 este redat codul unui program automat de calcul de sinteză a tripletului, întocmit în limbajul Qbasic.

Anexa 3.3 conține un extras din Catalogul Schott de sticle optice, utilizat pentru alegerea sorturilor de materiale de-a lungul întregii teze.

3.5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În capitolul 3 al tezei sunt rezumate metodele cele mai eficiente de sinteză a celor trei entități de bază utilizate în construcția sistemelor optice: lentila singulară, dubletul și tripletul.

Sinteza dubletelor acromate, respectiv a tripletelor apocromate are la bază două principii:

1. alegerea unor materiale optice având proprietăți dispersive diferite
2. asocierea lentilelor convergente cu cele divergente (atât pentru compensarea aberațiilor cromatice, cât și a celor de deschidere).

Metodele au la bază algoritmi Conrady-Kingslake-Smith, care exploatează teoria lentilelor subțiri și teoria aberațiilor de ordinul trei.

Capitolul 3 și anexele aferente conțin toate elementele necesare sintezei componentelor optice de orice tip.

Contribuția autorului constă în consultarea unui material foarte bogat, din care, pe baza a numeroase încercări practice, au fost selectate metodele considerate ca fiind cele mai eficiente. Criteriul de calificare a eficienței a constat în calitatea imaginii asigurate prin metodele de sinteză cercetate.

BIBLIOGRAFIE: [D2, G3, G4,G5, G6, J1, K1, N2, N3, N5, O1, O2, P3, P4, S5, S6, W28]

4. SINTEZA OPTIMALĂ A REDRESOARELOR LENTICULARE ALE LUNETELOR TERESTRE

4.1. LUNETEA KEPLER

4.1.1. DESCRIEREA LUNETEI

Luneta este un instrument optic care are rolul de a mări unghiul sub care se vede un obiect îndepărtat, astfel încât să se distingă mai multe detalii ale acestuia.

Luneta este un sistem optic afocal sau telescopic, având distanța focală infinită. De asemenea, obiectul se află la infinit, iar imaginea se formează tot la infinit.

Luneta este compusă din două elemente optice de bază: obiectivul și ocularul. Acestea sunt montate astfel încât focarul imagine al obiectivului să coincidă cu focarul obiect al ocularului, fiind îndeplinită astfel condiția de sistem afocal.

În funcție de caracteristicile optice ale componentelor, există două tipuri de lunete: luneta astronomică (Kepler), având convergente atât obiectivul, cât și ocularul și luneta terestră (Galilei), având obiectivul convergent și ocularul divergent. Prin introducerea unui sistem de redresare în schema optică de bază a lunetei Kepler se obține o lunetă terestră cu caracteristici superioare lunetei Galilei. Aceasta se utilizează cu scopul unic de observare.

Pentru măsurare sau localizare a unui obiect se apelează exclusiv la lunete terestre bazate pe schema Kepler, cu redresare.

Schema optică a lunetei Kepler este prezentată în figura 4.1 Acest tip de lunetă formează la infinit imagini virtuale, răsturnate, ale obiectelor situate la infinit.

În schemă este figurat traseul razelor marginale dintr-un fascicul paralel cu axa optică, traseul razei pupilare principale (2) și al razelor marginale (1) și (3), dintr-un fascicul incident înclinat cu unghiul ω față de axa optică.

Diafragma de deschidere D_d a aparatului este montura obiectivului, care devine și pupila de intrare P_i . Imaginea reală a acesteia este dată de ocular și reprezintă pupila de ieșire P_e , care în majoritatea aplicațiilor se materializează printr-o diafragmă de mărime fixă D' .

Cele trei raze trasate în fasciculul înclinat, se intersectează în planul focal comun, al imaginii intermediare y'_{ob} . Mărimea câmpului obiect $2y'_{ob}$ este determinată de deschiderea diafragmei de câmp D_c .

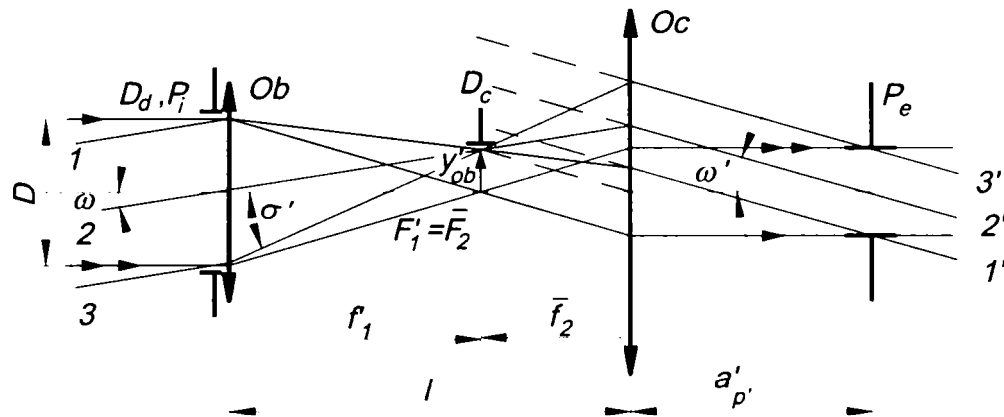


Fig.4.1. Schema optică a lunetei Kepler

Notății:

D	diametrul pupilei de intrare
ω	semiunghiul de câmp obiect
ω'	semiunghiul de câmp imagine
D_d	diafragma de deschidere (apertură)
P_i	pupila de intrare
Ob	obiectiv
σ'	unghiul razei emergente la ieșirea din obiectiv
f_1	distanța focală a obiectivului
\bar{f}_2	distanța focală obiect a ocularului
l	distanța dintre obiectiv și ocular (lungimea lunetei)
y'_{ob}	mărimea imaginii intermediare
D_c	diafragma de câmp (diametrul)
Oc	ocular
P_e	pupila de ieșire
D'	diametrul pupilei de ieșire
$a'_{p'}$	depărtarea pupilei de ieșire de la planul principal imagine al ocularului
1,3	raze marginale
2	raza pupilară principală

4.1.2. CALCULUL DE GABARIT AL LUNETEI KEPLER

Calculul de gabarit al unui sistem optic este un algoritm bazat pe optica geometrică și are ca scop determinarea puterii (sau distanței focale), a diametrului util și a poziției pe axa optică a subansamblurilor componente. Totodată rezultă poziția și mărimea diaframelor de deschidere și de câmp, respectiv a pupilelor și lucarnelor. În calculul de gabarit, subansamblurile se consideră infinit subțiri. Proiectarea unei lunete Kepler presupune cunoașterea următoarelor date:

- grosimentul lunetei, Γ
- semiunghiul de câmp, ω
- diametrul pupilei de ieșire, D'
- depărtarea minimă a pupilei de ieșire, s'_p
- lungimea aproximativă a lunetei, l .

Calculul de gabarit conține mai multe etape, din care rezultă:

- distanța focală a obiectivului:

$$f'_{ob} = \frac{l \cdot \Gamma}{\Gamma + 1} \quad (4.1)$$

- distanța focală a ocularului:

$$f'_{oc} = \frac{l}{\Gamma + 1} \quad (4.2)$$

- semiunghiul de câmp imagine:

$$\omega' = \text{arctg}(\Gamma \cdot \text{tg}\omega) \quad (4.3)$$

- diametrul util al obiectivului

$$D = \Gamma \cdot D' \quad (4.4)$$

- diametrul diafragmei de câmp:

$$D_{DC} = 2 \cdot f'_{ob} \cdot \text{tg}\omega \quad (4.5)$$

- unghiul dintre raza marginală și axa optică după refracția pe obiectiv:

$$\sigma' = \text{arctg}\left(\frac{D}{2 \cdot f'_{ob}} + \text{tg}\omega\right) \quad (4.6)$$

□ diametrul util al ocularului:

$$D_{uoc} = 2 \cdot \left(l \cdot \operatorname{tg} \sigma' - \frac{D}{2} \right) \quad (4.7)$$

□ depărtarea reală a pupilei de ieșire:

$$s'_{p'} = s'_{F'oc} + \frac{f'_{ob}}{\Gamma^2} \quad (4.8)$$

Ocularul se alege funcție de mărimea distanței focale și a unghiului de câmp imagine sau se procedează la sinteza subansamblului. Ocularele pentru lunete sunt de tip Kelner (dublet lipit + lentila convergentă) sau simetric (două dublete lipite așezate simetric).

Obiectivul, în general, este un dublet acromat care poate fi ales din catalog funcție de distanța focală și numărul de deschidere f/D sau poate fi rezultatul unui proiect original.

4.1.3. CALCULUL DE GABARIT, SINTEZA SUBANSAMBLURILOR ȘI ANALIZA UNEI LUNETE KEPLER FĂRĂ REDRESARE

4.1.3.1. CALCULUL DE GABARIT

Se consideră ca date de intrare valori uzuale ale parametrilor caracteristici lunetei Kepler:

- $\Gamma = 4x$
- $l = 300 \text{ mm}$
- $D' = 6 \text{ mm}$
- $\omega = 2^\circ$ (corespunzător unui câmp obiect liniar de $\sim 70 \text{ m}$ la distanța de 1 km)

Aplicând relațiile (4.1)...(4.8) rezultă:

- $f'_{oc} = 60 \text{ mm}$
- $f'_{ob} = 240 \text{ mm}$
- $D = 24 \text{ mm}$
- $\omega' = 8^\circ$
- $\sigma' = 4.85^\circ$
- $D_{DC} = 17 \text{ mm}$
- $D_{oc} = 26 \text{ mm}$.

4.1.3.2. SINTEZA ȘI ANALIZA SUBANSAMBLURILOR OCULAR ȘI OBIECTIV

Sinteza și analiza ocularului

Din calculul de gabarit au rezultat următoarele caracteristici ale ocularului:

- $f = 60 \text{ mm}$
- $\omega' = 8^\circ$
- $D_{oc} = 17 \text{ mm}$
- $D' = 6 \text{ mm}$
- $y = 8.38 \text{ mm}$

Din punct de vedere constructiv s-a adoptat o soluție de ocular simetric, format din două dublete lipite identice, plasate față în față și separate printr-un strat subțire de aer. Varianta a fost preferată datorită avantajelor pe care le prezintă în raport cu soluțiile mai elaborate. Pentru realizarea unui ocular simetric este suficientă sinteza unui dublet acromat, pentru care algoritmul este relativ simplu și asigură corectarea sferocromatismului. Structura simetrică de dublete implică automat compensarea aberațiilor geometrice de tipul curburilor astigmatice și distorsiunii, care, analitic sunt foarte dificil de controlat.

S-a procedat la sinteza unui dublet acromat având jumătate din puterea necesară ocularului ($f = 120 \text{ mm}$), deschiderea $D=17 \text{ mm}$ și distanța obiect infinită. Soluția obținută și simetricul acesteia au fost introduse ca date de intrare în programul OSLO pentru analiză și corectare iterativă a elementelor de geometrie, astfel încât să se obțină un sistem cu caracteristicile impuse ocularului.

Pentru analiză, sistemul este plasat în poziție inversă pentru evitarea operării cu valori infinite în spațiul imagine.

Foaia de date finală a ocularului, schema optică și mersul razelor pentru trei poziții ale razei pupilare principale (0° – linie verde, $0.7\omega'$ - linie albastră și ω' – linie roșie) sunt prezentate în figurile 4.2 și 4.3.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+30	1.4945e+29	AIR	
AST	0.000000	67.000000	3.000000	AIR	AS
2	275.800000	6.300000	13.013217	K3	S
3	-26.980000	2.700000	13.530785	F2	S
4	-59.170000	2.500000	13.824936	AIR	S
5	59.170000	1.500000	13.902735	F2	S
6	26.980000	6.300000	13.796045	K3	S
7	-275.800000	0.000000	13.537216	AIR	S
IMS	0.000000	53.021818	8.871282		S

Fig. 4.2. Foaia de date a ocularului simetric

Din foaia de date rezultă puterea sistemului optic ($Efl=f' \sim 60$ mm) și simetria acestuia (valorile razelor dioptrilor 5, 6 și 7 sunt egale și de semn contrar razelor corespunzătoare dioptrilor 4, 3 și 2). Analiza sistemului inversat a permis introducerea valorii deschiderii pupilei de ieșire (Ent beam radius = 3 mm) și a mărimii semiunghiului de câmp imagine ($\omega' = 8.5^\circ$).

Pentru analiza ocularului ca sistem separat, pupila de ieșire are rol de diafragmă de deschidere, căreia i s-a atribuit prima linie a foii. Se observă valoarea razei (APERTURE RADIUS = 3 mm) și depărtarea reală a pupilei de ieșire (THICKNESS = 67 mm). Din calculul de gabarit rezultă, conform relației (4.8) o valoare egală cu 68 mm (dacă se cunoștea $s'_{F' \infty} = 53$ mm, așa cum apare înscrisă în fereastra cu caracteristici de referință din figura 4.4).

Mărimea depărtării pupilei de ieșire s-a obținut iterativ, ținta fiind valoarea înălțimii imaginii în planul focal. Din calculul de gabarit s-a obținut $y' = 8.38$ mm. Valoarea reală pentru care ocularul asigură un câmp imagine de 17° este $y' = 8.87$ mm.

Din coloana "GLASS" rezultă că s-au ales sorturile de sticlă K3 și F2, iar soluția impusă pentru dublet a fost de tipul "crown în față".

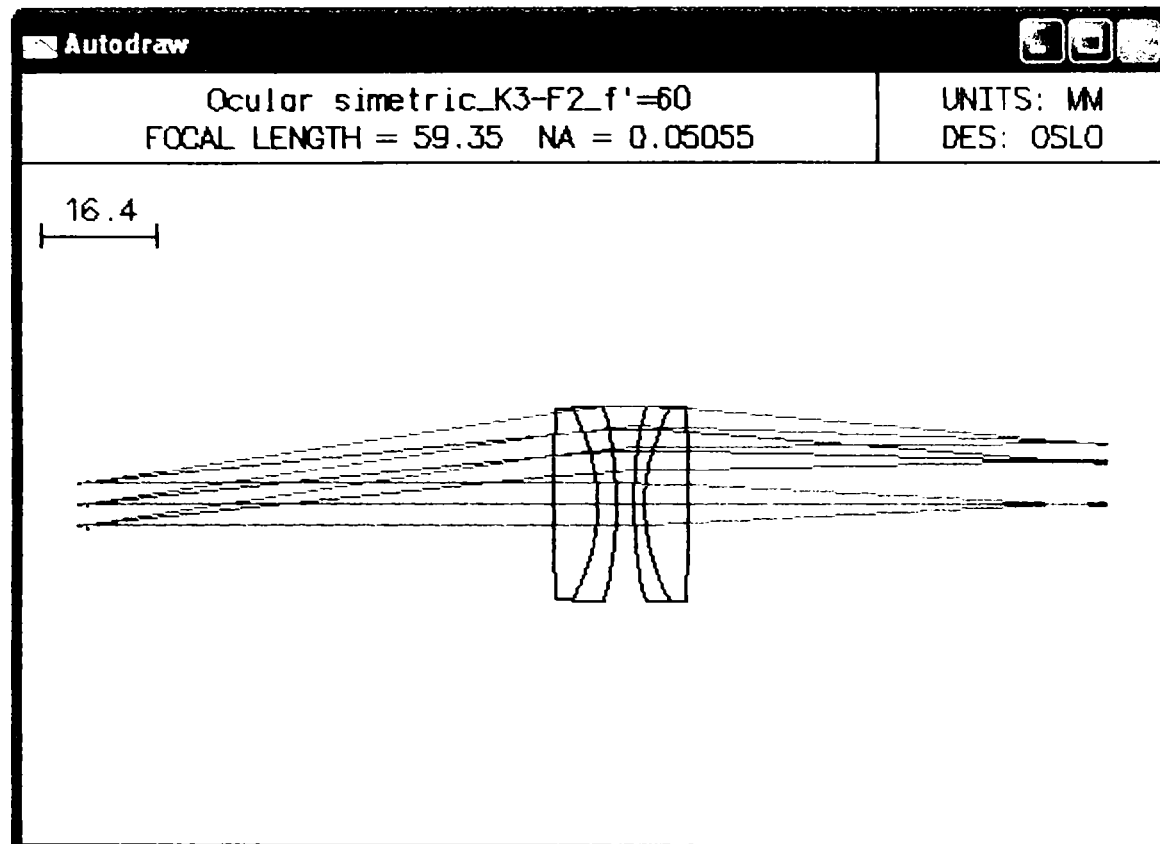


Fig. 4.3. Schema optică a ocularului simetric

În schema optică se observă clar respectarea condițiilor funcționale impuse ocularului. În poziția inversată, fasciculul paralel intră în sistem prin pupila de ieșire și este convergent în puncte din planul focal obiect, corespunzător diafragmei de câmp. Sunt reprezentate trei fascicule paralele (verde, albastru și roșu) corespunzătoare înclinărilor 0 , $0.7\omega'$ și ω' ale razei pupilare principale.

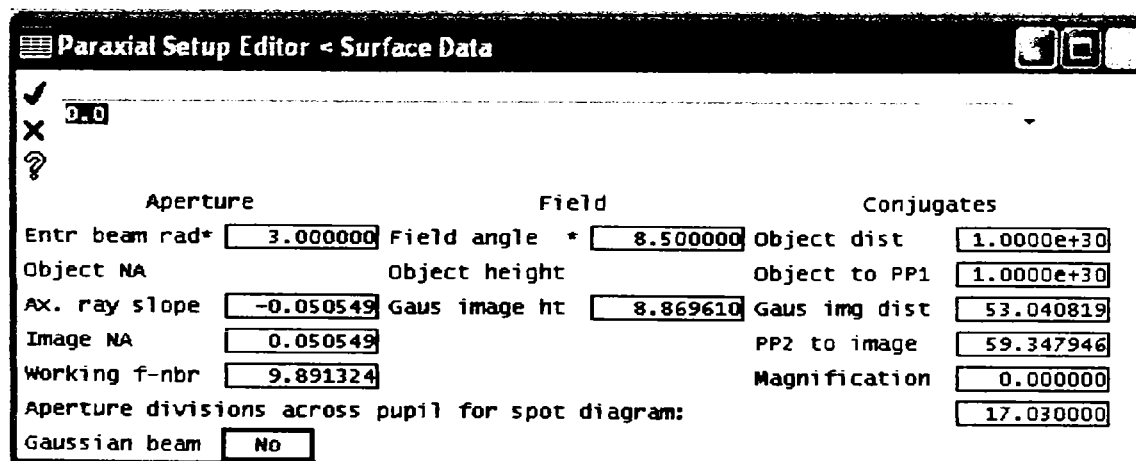


Fig. 4.4. Sinteza caracteristicilor de referință ale ocularului simetric

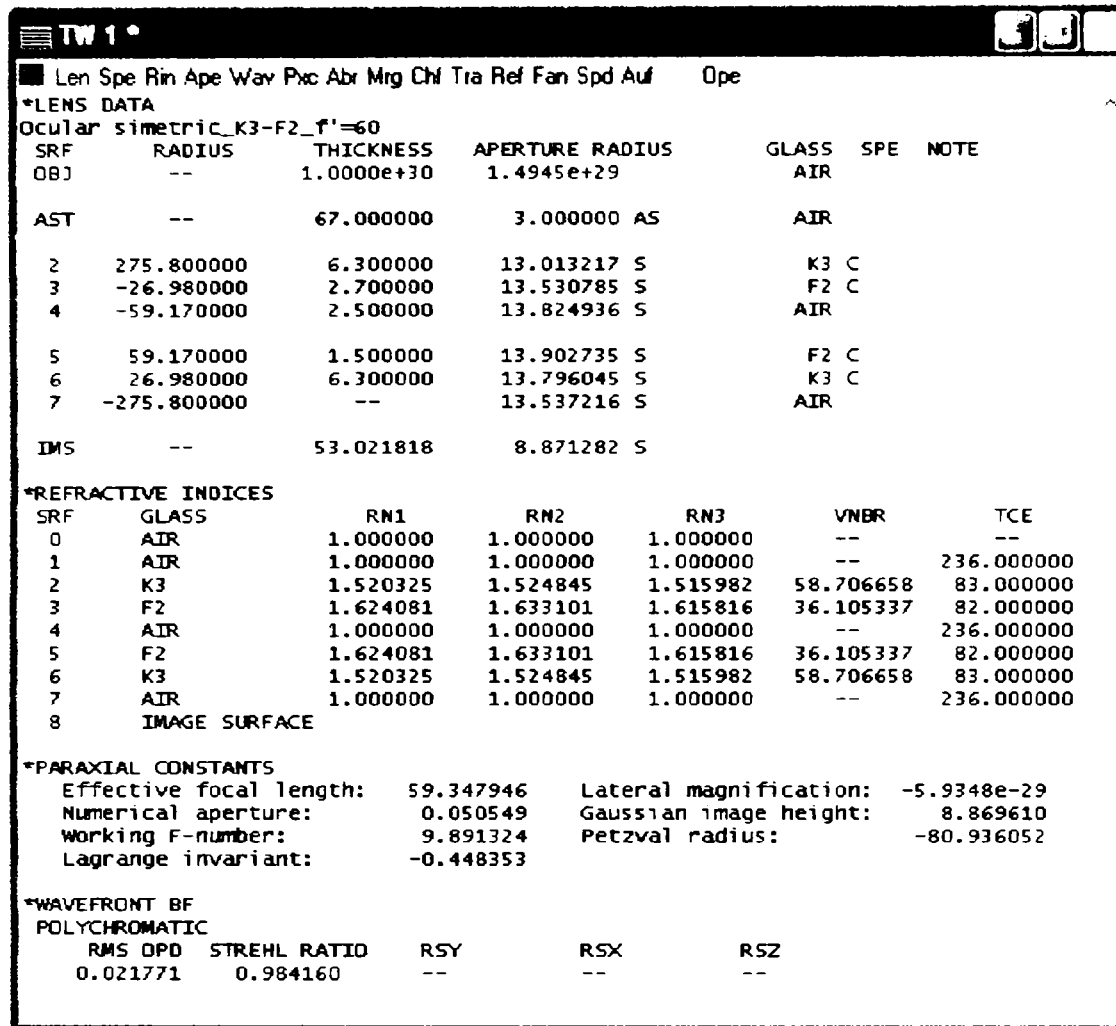


Fig. 4.5. Sinteza datelor geometrice și de material, a caracteristicilor de referință și a parametrilor de calitate a ocularului

Din fereastra caracteristicilor paraxiale rezultă frontifocalele ($s'_f = 53.04$ mm și $s_f = 59.34$ mm), mărimea imaginii paraxiale ($y' = 8.86$ mm) și panta razei pupilare principale la marginea câmpului obiect ($\text{tg}\omega = 0.05$, respectiv $\omega \sim 2.86^\circ$).

O sinteză a datelor caracteristice ocularului este redată în figura 4.5.

Secțiunea ***WAVEFRONT BF** conține rezultatele analizei statistice a frontului de undă. Valorile RMS OPD și STREHL indică o calitate foarte ridicată a sistemului. Acesta se încadrează în categoria "limitat la difracție", care, conform criteriului Rayleigh, îndeplinește condițiile $\text{RMS OPD} < 0.07\lambda$ sau $\text{STREHL} > 0.8$.

Calitatea sistemului este certificată și prin analiza aberațiilor geometrice și cromatice prezentate în figura 4.6.

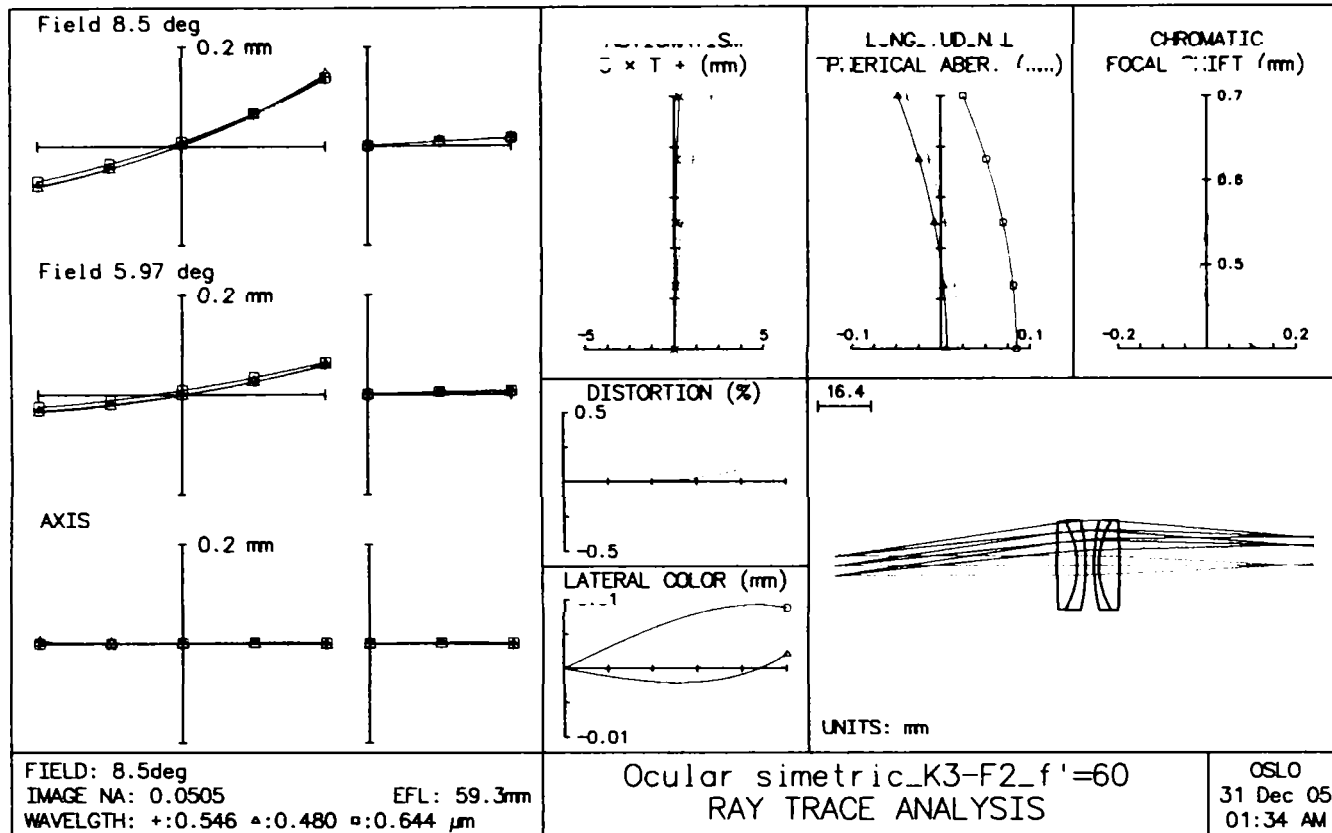


Fig. 4.6. Aberațiile geometrice și cromatice ale ocularului

Diagrama spot indică o pată de difuzie în planul imagine mai mică decât limita cercului Airy (fig. 4.7).

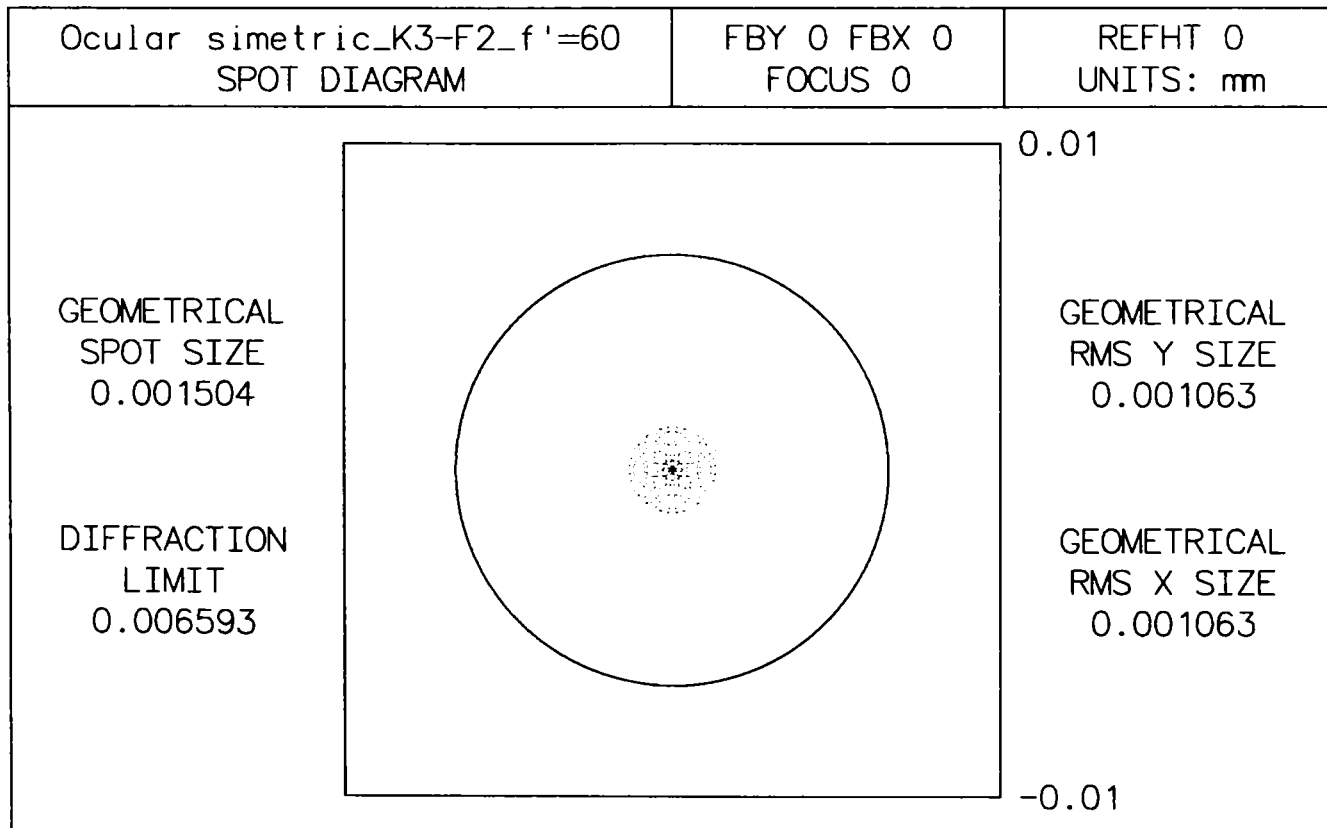


Fig. 4.7. Diagrama spot rezultată prin analiza ocularului

Variația cromatică a focarului (fig. 4.8) clasifică sistemul în categoria acromatelor, cu spectru secundar maxim de aproximativ 0.1 mm la mijlocul spectrului.

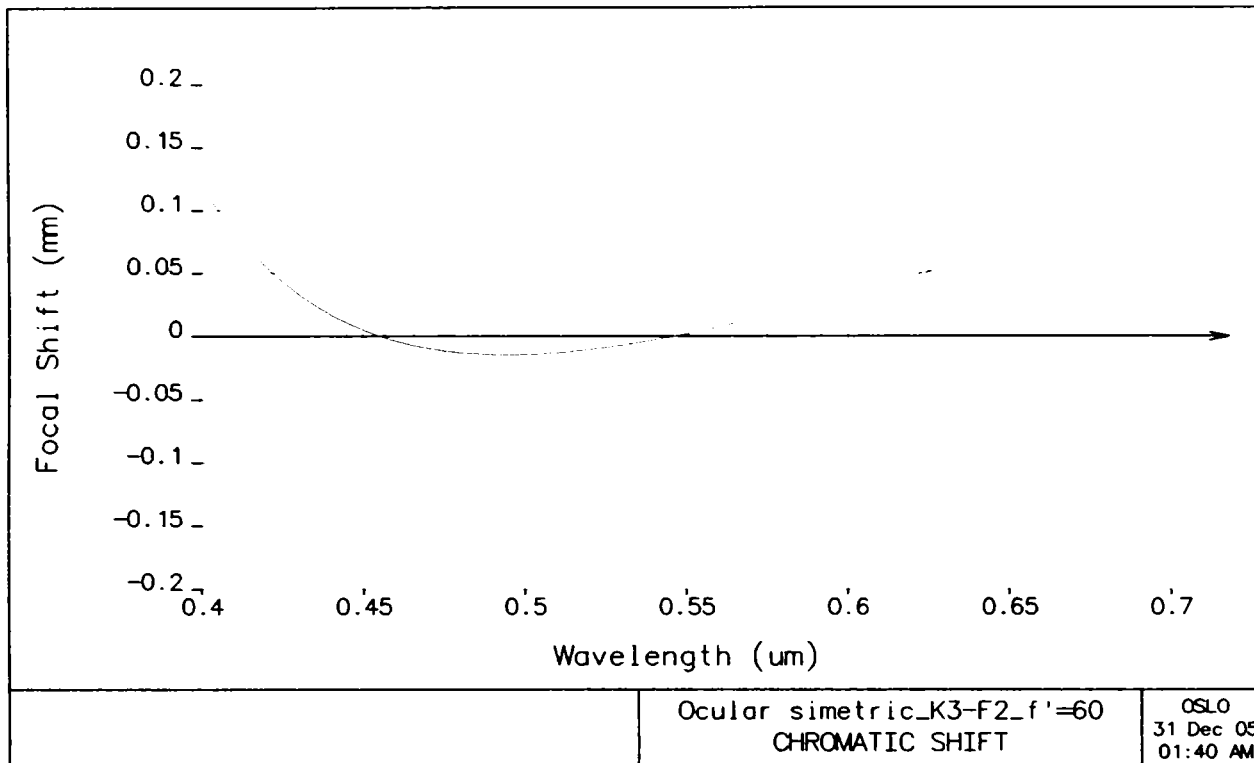


Fig. 4.8. Variația cromatică a focarului ocularului simetric

Analiza frontului de undă pune în evidență deformații neglijabile ale acestuia pe întreg unghiul de câmp (fig. 4.9).

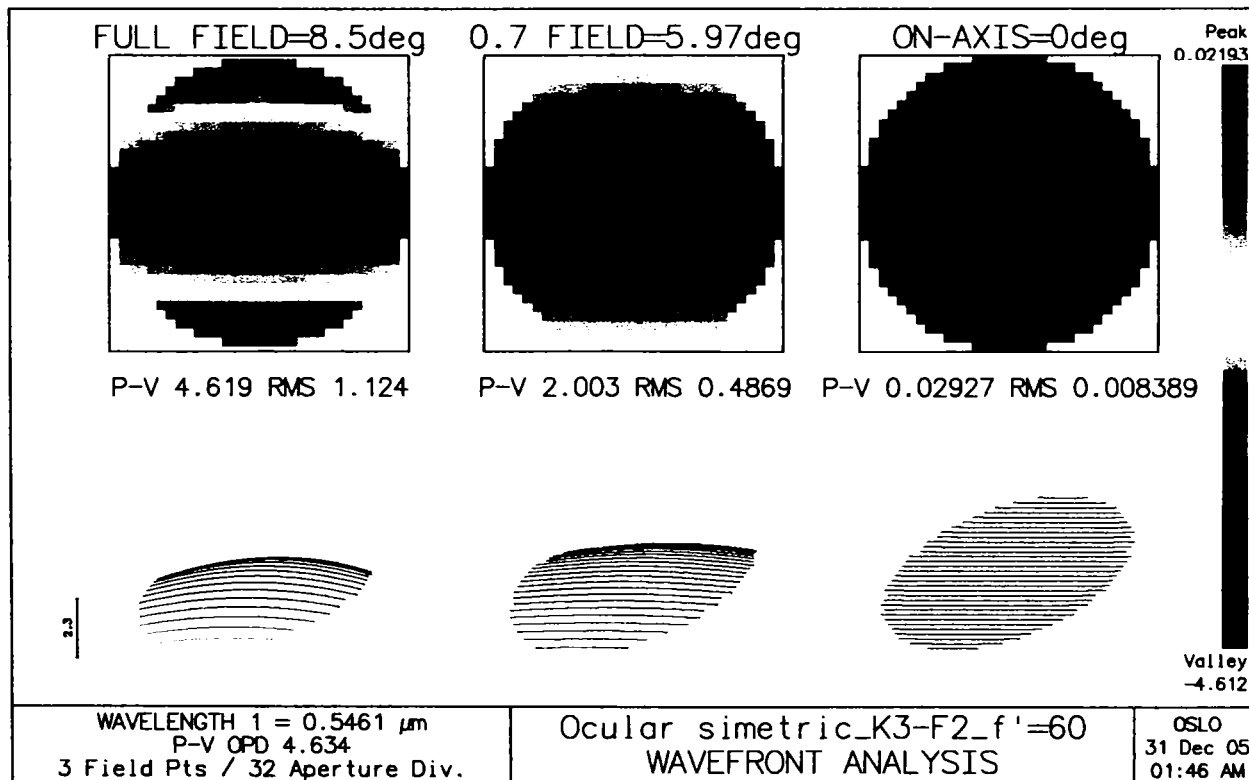


Fig. 4.9. Analiza frontului de undă pentru lungimea de undă de referință

Analiza Fourier permite evaluarea numerică a caracteristicilor legate de iluminare, contrast și rezoluție în planul imagine.

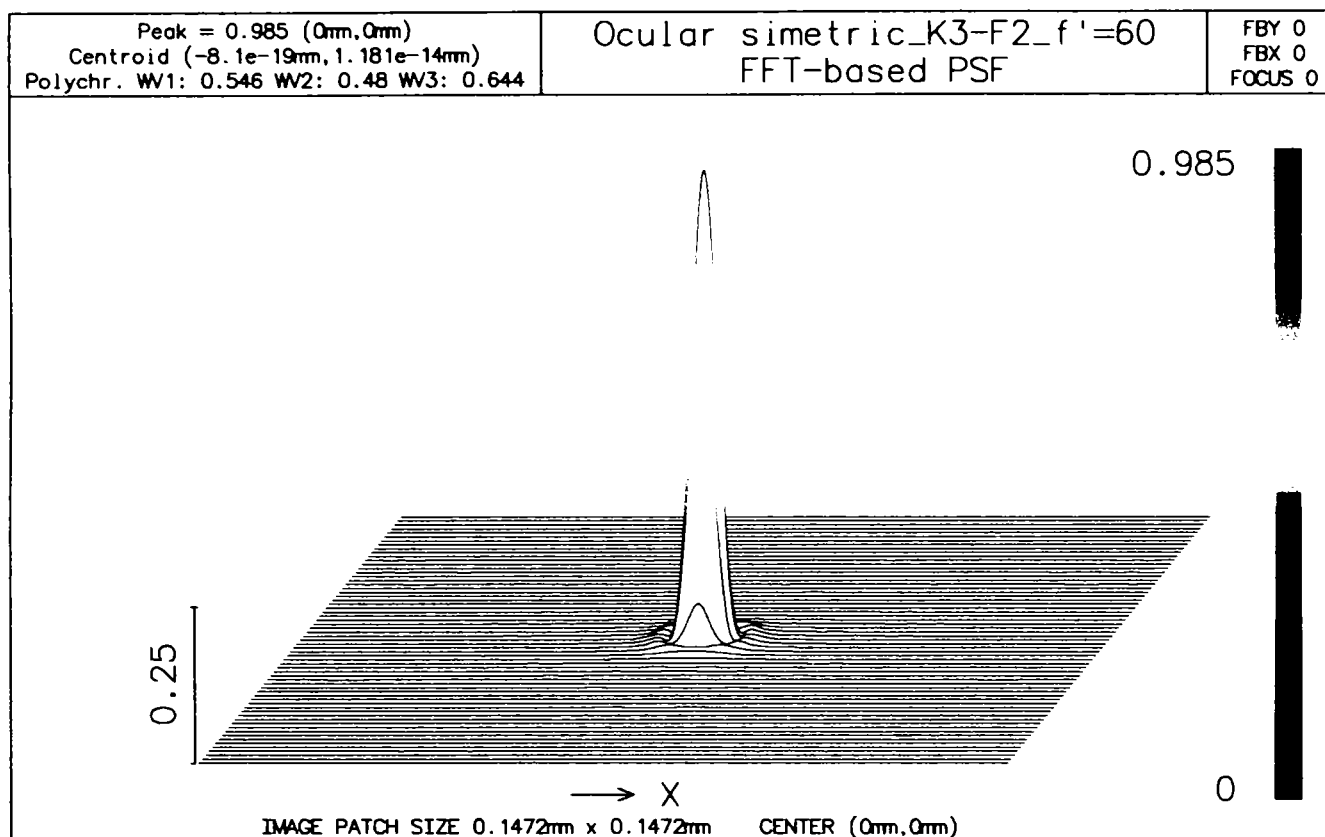


Fig. 4.10. PSF pentru ocularul simetric

În figura 4.10 este prezentată funcția imagine a punctului, PSF, a cărei valoare se apropie de cea unitară, ideală.

Funcția optică de transfer de modulație (MTF) și funcția optică de transfer de fază (PTF) sunt reprezentate în figura 4.11 în raport cu frecvența spațială măsurată în perechi de linii/mm. Valoarea limită a frecvenței spațiale de analiză a fost stabilită la 32 pl/mm, valoare caracteristică limitei de rezoluție a ochiului uman, care, în cazul ocularilor, reprezintă receptorul final de imagine.

MTF pentru sistem (reprezentare cu linie roșie) se apropie de MTF ideal (reprezentare cu linie verde), ceea ce confirmă rezultatele analizei geometrice și ondulatorii. Calitatea bună a imaginii în ceea ce privește contrastul este indicată de alura PTF, aceeași în plan tangențial și sagital și descriind o dreaptă (nu apar distorsiuni sau inversări de contrast în planul imagine).

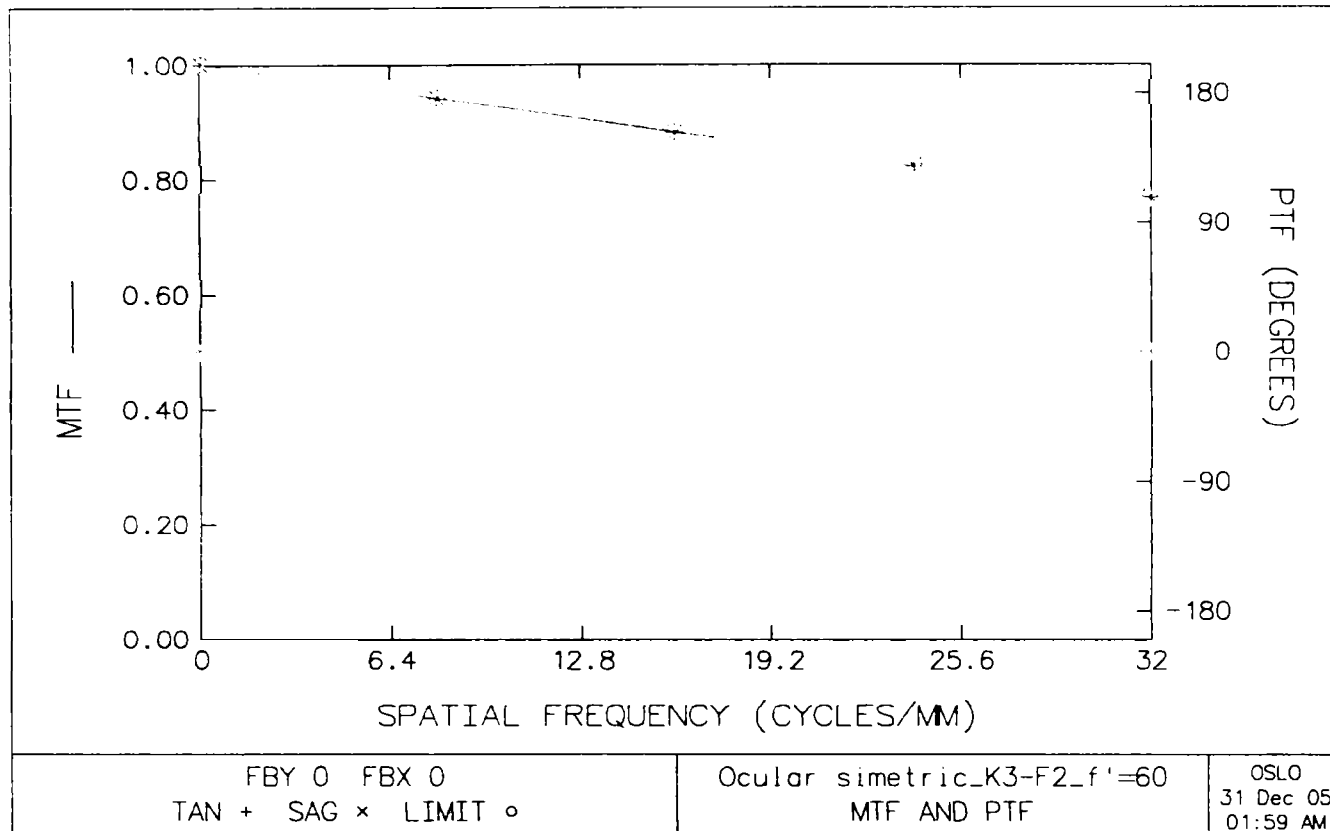


Fig. 4.11. MTF și PTF rezultate din analiza Fourier a ocularului simetric

Sinteza și analiza obiectivului

Pentru construcția obiectivelor de lunetă se utilizează dublete acromate. Obiectivele de lunetă au deschidere mare și unghiuri de câmp mici, astfel încât este importantă mai ales corectarea sferocromatismului (celelalte aberații geometrice au valori mici datorită înclinării mici a fasciculelor).

S-a procedat la sinteza unui dublet acromat, având ca date de intrare caracteristicile obiectivului de lunetă rezultat din calculul de gabarit:

- $f' = 240 \text{ mm}$
- $D = 24 \text{ mm}$
- $\omega = 2^\circ$

Soluția obținută a fost analizată cu programul OSLO. În figurile 4.12...4.21 sunt redate foaia de date (fig. 4.12), schema optică (fig. 4.13), lista caracteristicilor geometrice, de material și de calitate (fig. 4.14), caracteristicile de referință paraxiale (fig. 4.15), aberațiile geometrice și cromatice (fig. 4.16), variația cromatică a focarului (fig. 4.17), diagrama spot (fig. 4.18), analiza frontului de undă (fig. 4.19), funcția imagine a punctului (fig. 4.20), funcția optică de transfer de modulație și de fază

pentru obiectivul lunetei (fig. 4.21).

Surface Data						
Gen	Setup	wavelengths	variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Doublet LAK23-LASF36A_f/10						EFL 239.984503
Ent beam radius		12.000000	Field angle	2.000000	Primary wavln	0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	2.4000e+20	8.3809e+18		AIR	
AST	113.930000	6.000000	12.000000	AS	LAK23	C
2	-137.500000	2.000000	11.871439	S	LASF36A	C
3	981.310000	0.000000	11.844239	S	AIR	
IMS	0.000000	233.656142	8.386485	S		

Fig. 4.12. Foaia de date a obiectivului

Pentru sinteza dubletului s-a optat pentru varianta "crown în față", iar dintre cele două soluții s-a reținut forma Fraunhofer, caracteristică obiectivelor de lunetă. Pe foaia de date se observă valoarea frontifocalei imagine, $s'_F = 233.65$ mm, care impune poziția diafragmei de câmp și trebuie să coincidă cu focarul obiect al ocularului. Poziția planului imagine diferă de abscisa paraxială ($s'_F = 233.58$ mm) și a fost obținută printr-o ușoară defocusare operată pe criteriul minimizării OPD.

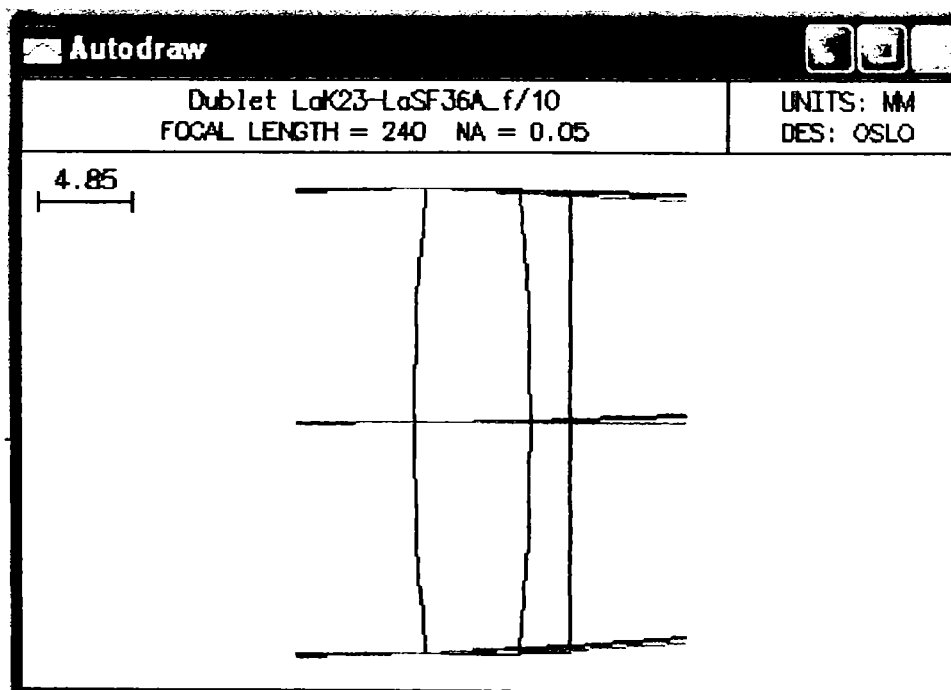


Fig. 4.13 Schema optică a obiectivului

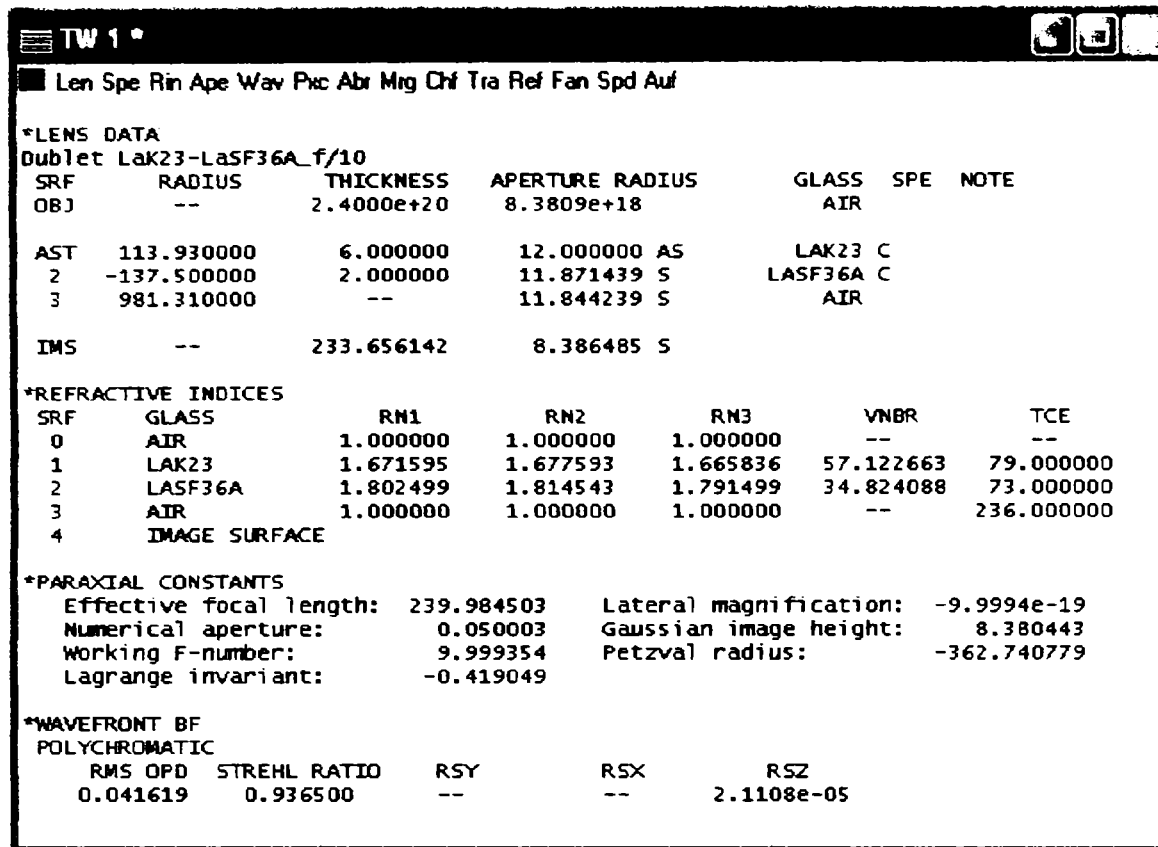


Fig. 4.14 Sinteza caracteristicilor geometrice, de material și de calitate a obiectivului

Ultima secțiune a ferestrei din figura 4.14 indică parametrii sintetici de calitate a imaginii. Se observă valoarea redusă a RMS OPD și valoarea ridicată a raportului Strehl. Acești indicatori caracterizează un sistem de foarte bună calitate, limitat la difracție.

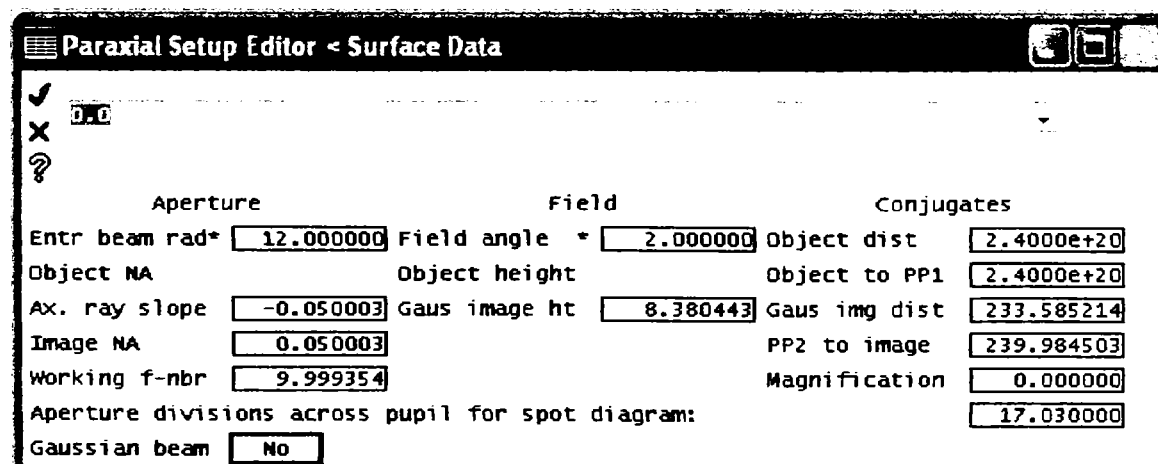


Fig. 4.15. Caracteristici de referință paraxiale ale obiectivului

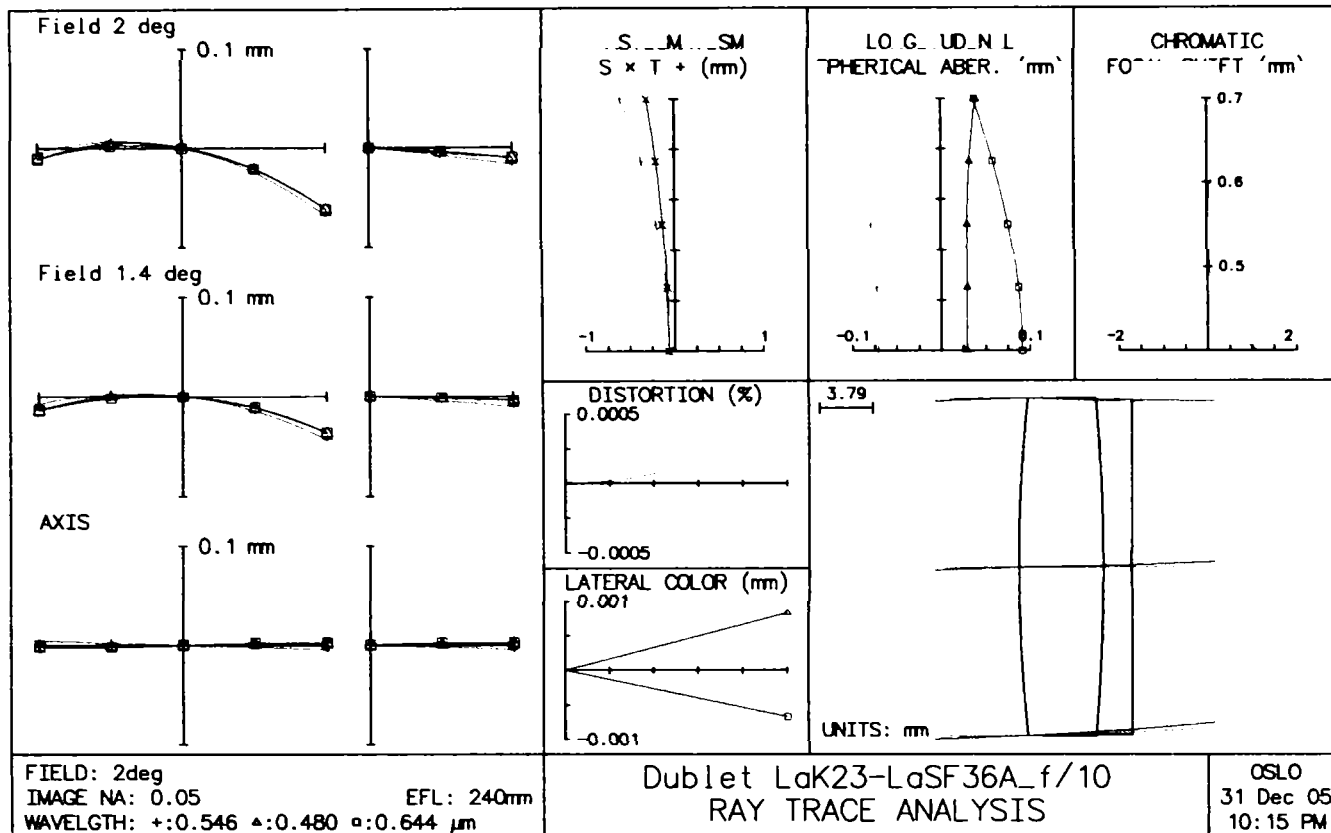


Fig. 4.16. Aberrațiile geometrice și cromatice ale obiectivului

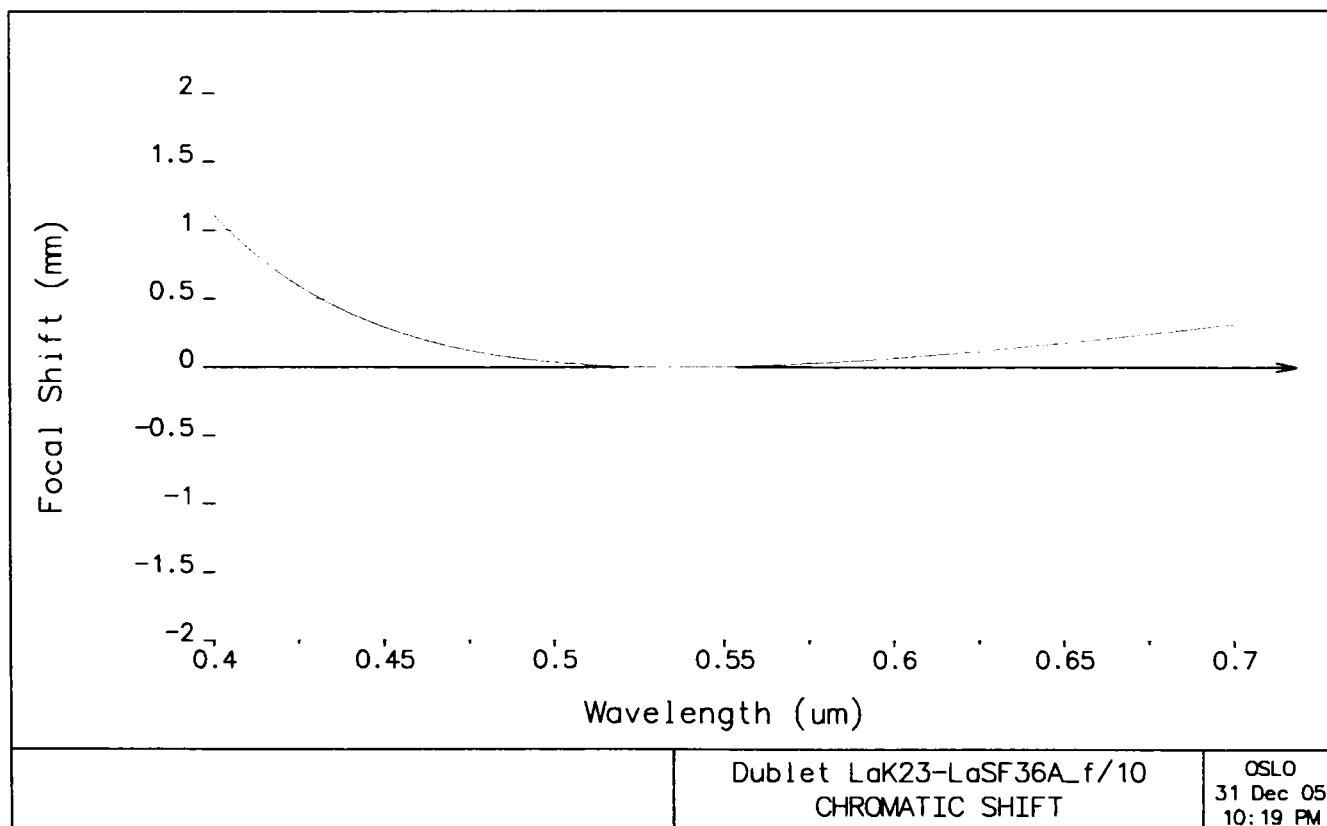


Fig 4.17. Variația cromatică a focarului pentru obiectivul lunetei

Variația cromatică a focarului este tipică dubletului acromat. Se observă realizarea acromaziei pentru lungimile de referință de proiectare (479 nm și 653 nm).

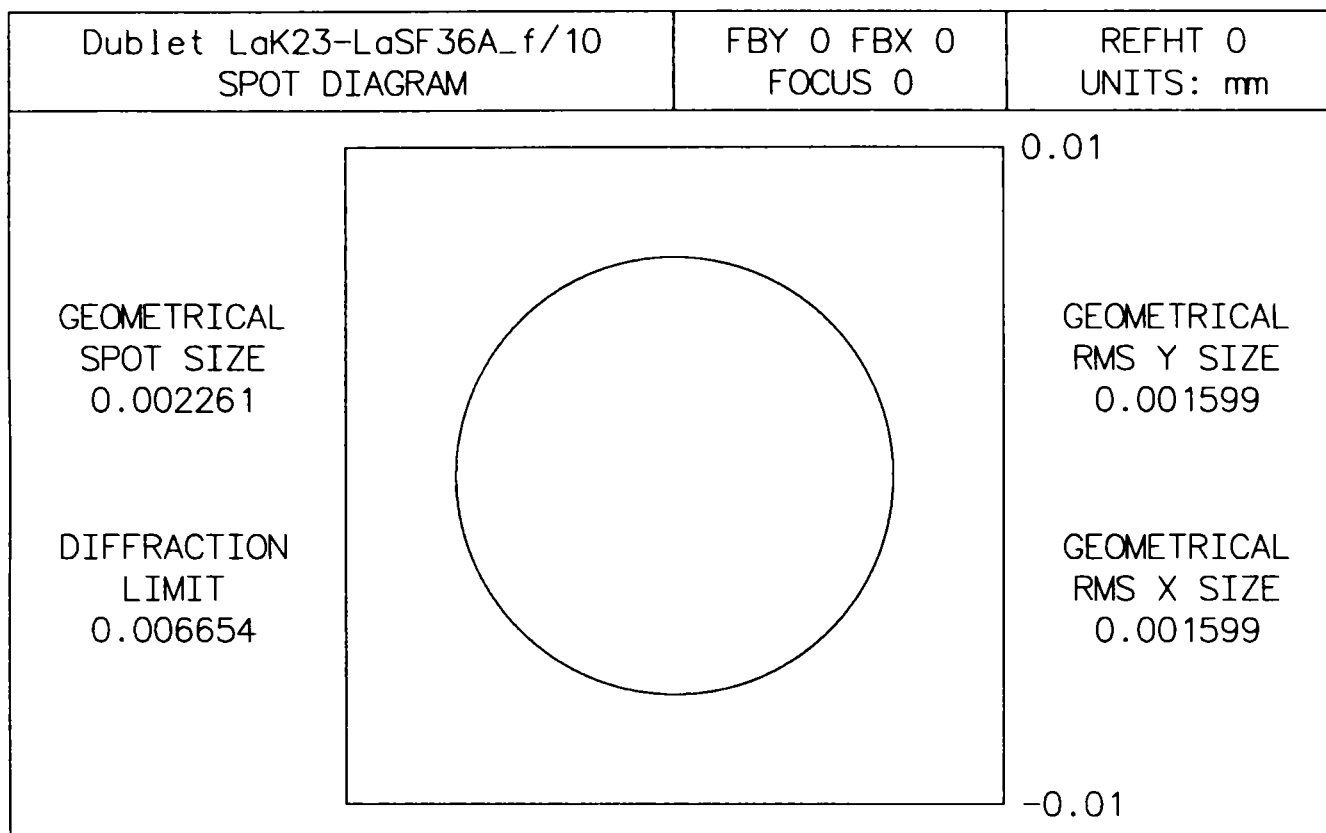


Fig. 4.18. Diagrama spot pentru subansamblul obiectiv

Pata de difracție reală se află în interiorul cercului Airy, ceea ce atestă o foarte bună corectare a aberațiilor.

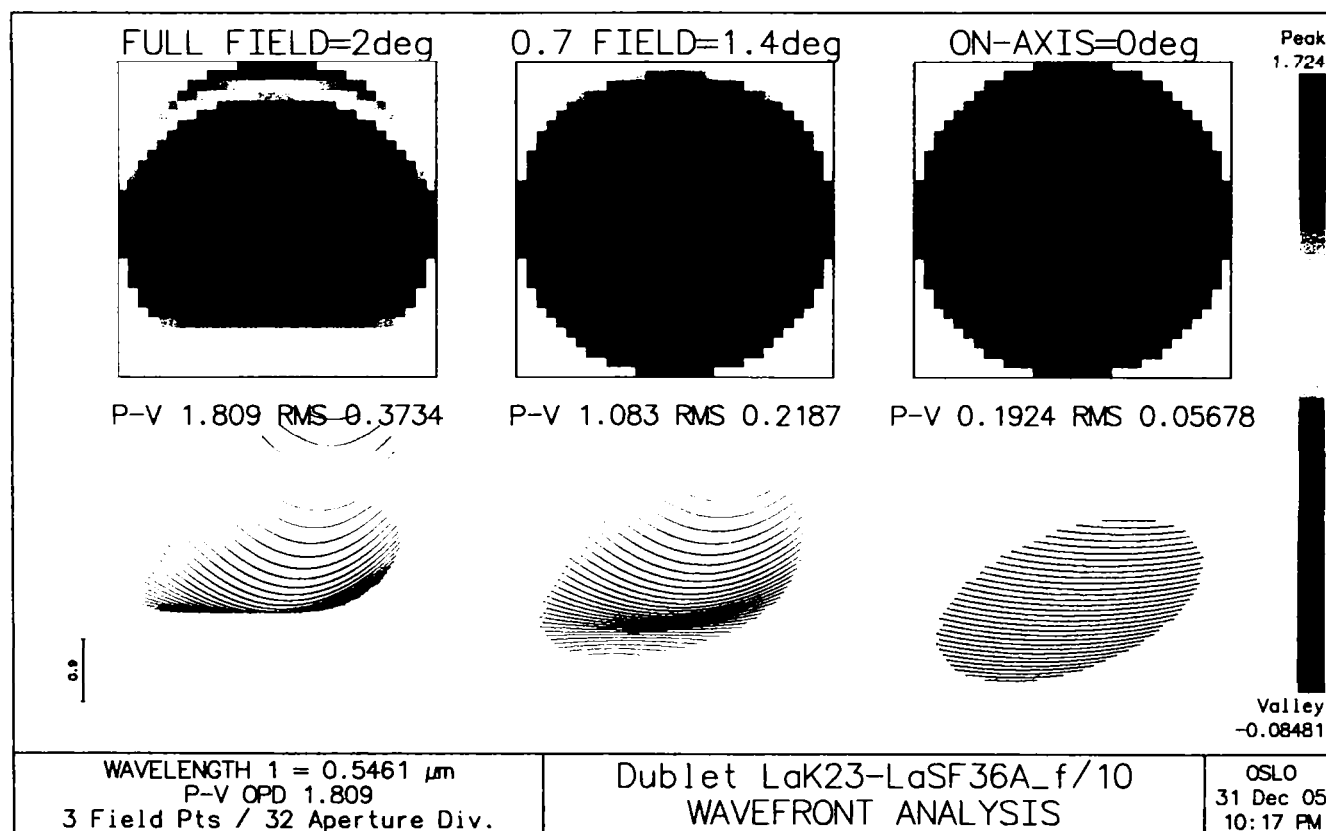


Fig. 4.19. Analiza frontului de undă pentru obiectivul lunetei

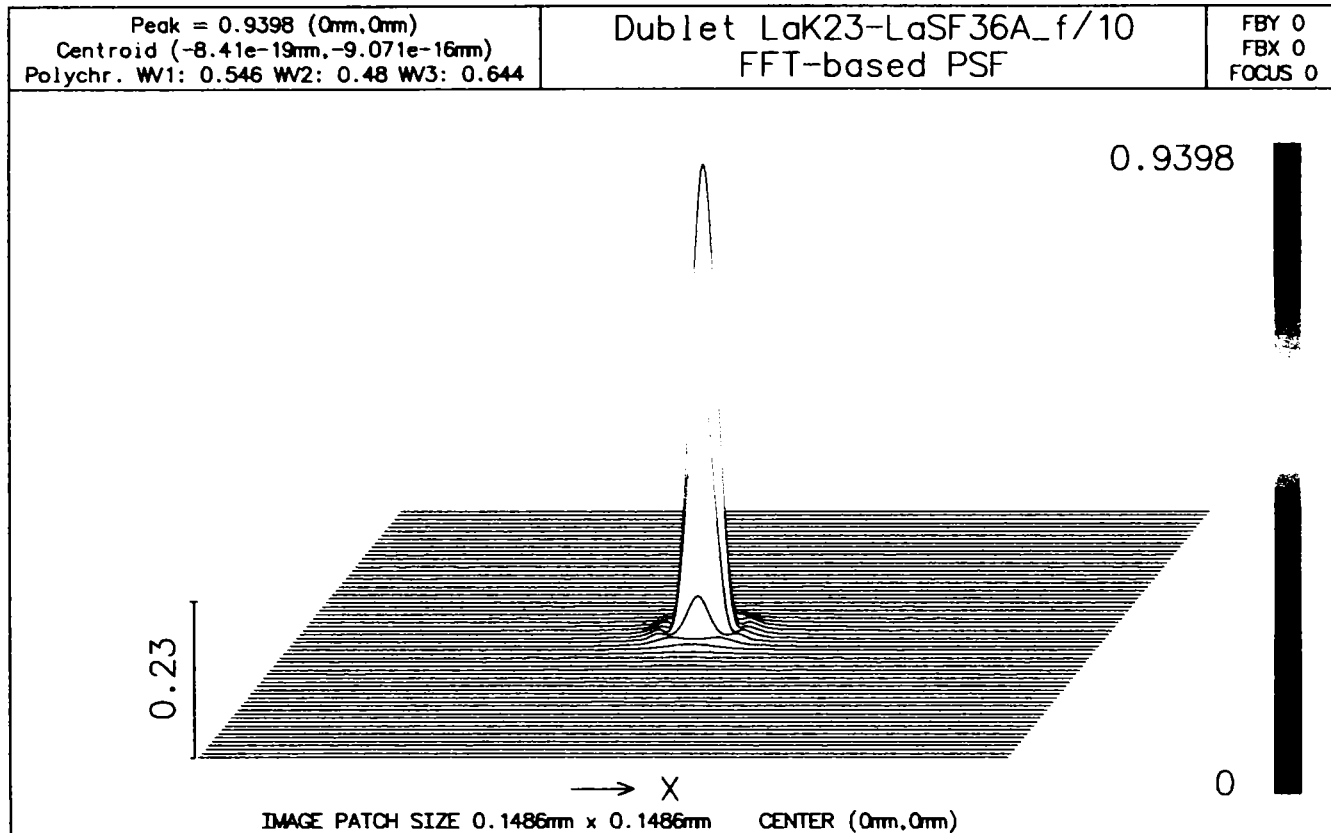


Fig. 4.20. Funcția imagine a punctului pentru obiectivul lunetei

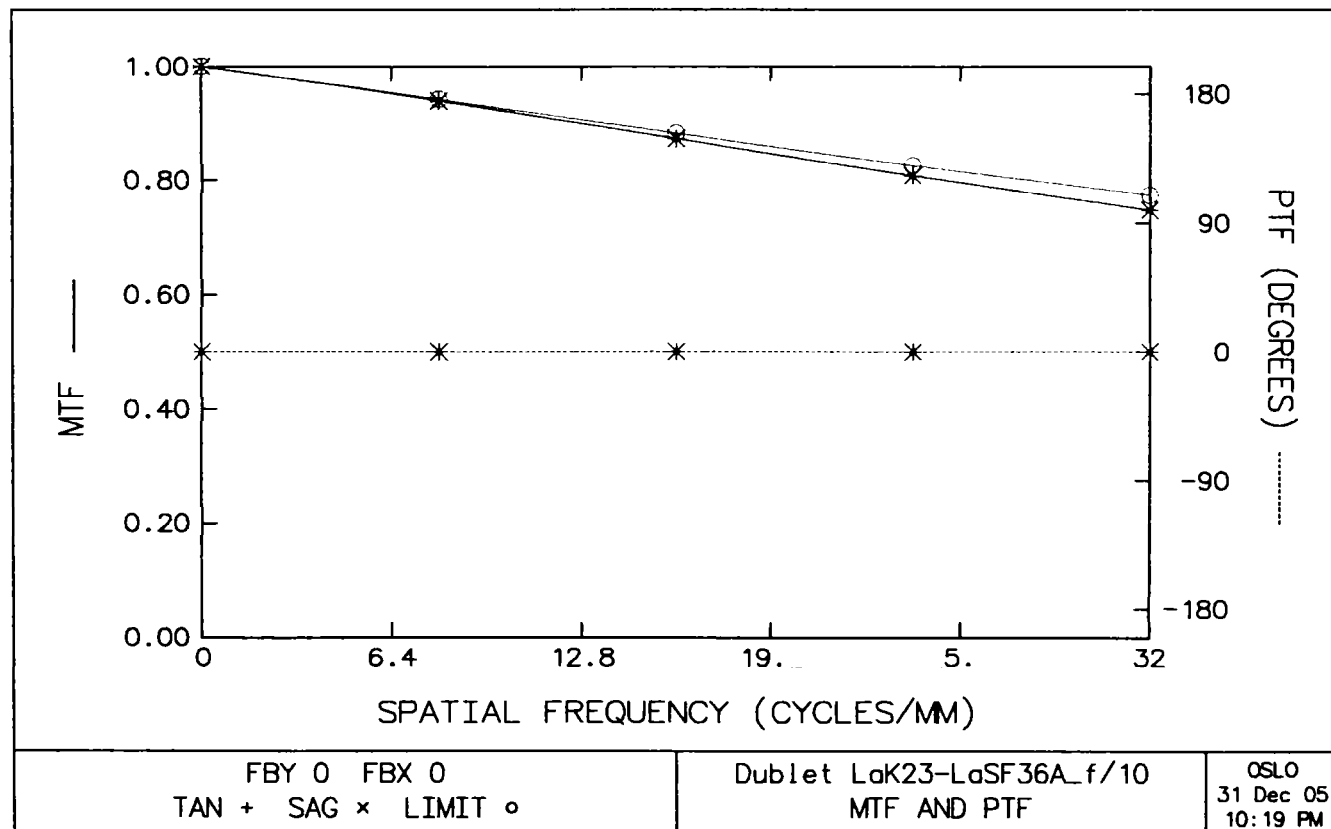


Fig. 4. 21. Funcția optică de transfer de modulație și de fază pentru obiectiv

Având cele două subansambluri proiectate și analizate, se poate face și o verificare a instrumentului optic, ca sistem compus.

În figura 4.22 este impusă distanța obiect nulă, aproximativ în planul pupilei de intrare și se poate verifica dacă poziția pupilei de ieșire a fost corect determinată din calculele parțiale anterioare. Rezultă că cele două pupile sunt conjugate (imaginea pupilei de intrare se află la abscisa 67.7 mm, distanță care a rezultat la analiza și corectarea ocularului).

În figura 4.23 este prezentată foaia de date corespunzătoare analizei întregului sistem. Rezultă și numeric (fig. 4.23) și grafic (fig. 4.24) caracterul afocal al instrumentului.

În subsolul foii de date din figura 4.23 este atașată fereastra parametrilor sintetici de calitate. Având în vedere calitatea foarte ridicată a subansamblurilor era de așteptat ca întregul sistem să asigure o imagine foarte bună.

Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
✓						
X						
?						
Lens: Luneta Kepler 4X						EFL -1.4400e+42
Ent beam radius 12.000000						Object height 12.000000
						Primary wavln 0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	1.0000e-20	12.000000	AIR		
AST	113.930000	6.000000	12.000000	LAK23	C	
2	-137.500000	2.000000	137.500000	LASF36A	C	
3	981.000000	286.670000	981.000000	AIR		
4	275.800000	6.300000	275.800000	K3	C	
5	-26.980000	2.700000	26.980000	F2	C	
6	-59.170000	2.500000	59.170000	AIR		
7	59.170000	1.500000	59.170000	F2	C	
8	26.980000	6.300000	26.980000	K3	C	
9	-275.800000	0.000000	275.800000	AIR		
IMS	0.000000	67.764979	6.4425e+09			

Fig. 4.22. Verificarea poziției conjugate a pupilelor de intrare și de ieșire

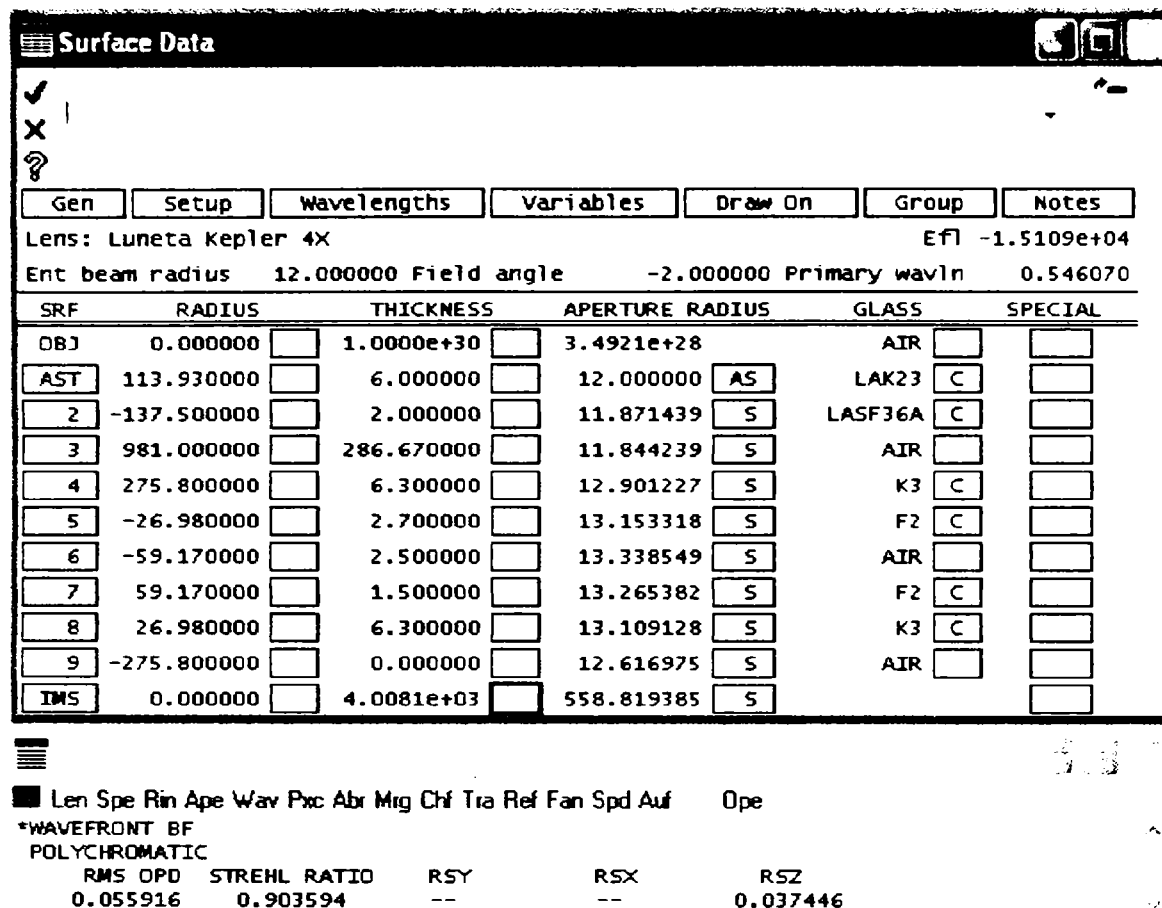


Fig. 4.23. Verificarea caracterului afocal al sistemului și parametrii sintetici de calitate RMS OPD și raportul Strehl

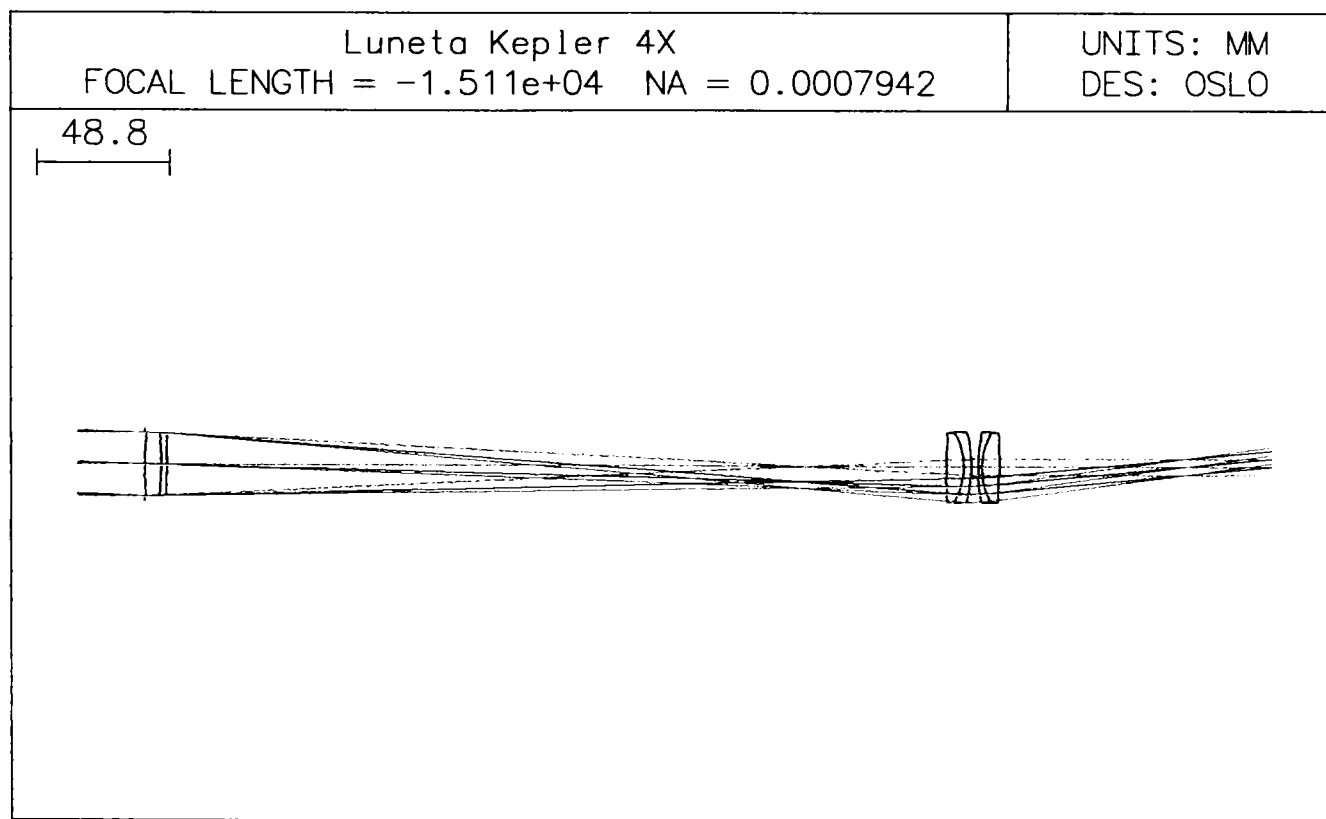


Fig. 4.24. Schema optică a lunetei proiectate

Observație:

Teoretic, valorile PSF, MTF, PTF și Strehl ale unui sistem optic complex, format din mai multe entități (lentile, dublete, triplete), se obțin prin înmulțirea valorilor parametrilor componentelor individuale. Rezultă că analiza Fourier a fiecărui subansamblu (obiectiv, ocular, condensor, redresor etc.) și multiplicarea parametrilor individuali ai acestora este suficientă pentru caracterizarea sistemului.

Considerând un sistem optic format din n componente, având caracteristicile PSF_i , MTF_i , PTF_i și $Strehl_i$, regula multiplicării va conduce la parametrii globali:

$$PSF = \prod_{i=1}^n PSF_i = PSF_1 \cdot PSF_2 \wedge PSF_n \leq \min(PSF_i) \quad (4.9)$$

$$MTF = \prod_{i=1}^n MTF_i = MTF_1 \cdot MTF_2 \wedge MTF_n \leq \min(MTF_i) \quad (4.10)$$

$$PTF = \prod_{i=1}^n PTF_i = PTF_1 \cdot PTF_2 \wedge PTF_n \leq \min(PTF_i) \quad (4.11)$$

$$Strehl = \prod_{i=1}^n Strehl_i = Strehl_1 \cdot Strehl_2 \wedge Strehl_n \leq \min(Strehl_i) \quad (4.12)$$

Având în vedere faptul că toți parametrii Fourier au valori normalizate maxime unitare, relațiile (4.9)...(4.12) conduc la observația că valoarea globală pentru sistem este dată, în cazul cel mai favorabil, de cea mai slabă componentă.

Cazul practic analizat permite o verificare a relațiilor teoretice. În tabelul 4.1 sunt prezentate comparativ rezultatele obținute prin compunere și valorile pentru sistemul optic tratat ca un întreg, în cazul lunetei proiectate.

Tabelul 4.1

Parametru	Obiectiv	Ocular	Luneta	
			teoretic (prin compunere)	real (ca sistem)
RMS OPD	0.0416	0.0217	-	0.0559
PSF	0.9398	0.9850	0.9257	0.9094
MTF (32pl/mm)	~0.75	~0.78	~0.585	~0.95
STREHL	0.9365	0.9841	0.9216	0.9035

Analizând datele din tabelul 4.1 se pot face următoarele observații:

- pentru sistemele limitate la difracție funcția imagine a punctului are valori practic egale cu raportul Strehl
- regula multiplicării, în cazul sistemelor compuse din subansambluri limitate la difracție, conduce la valori care supraestimează ușor PSF și Strehl reale, dar subestimează MTF

Exercițiul de sinteză și analiză descris anterior a demonstrat că metodele de calcul de gabarit, respectiv de sinteză a dubletului acromat lipit utilizat pentru construcția obiectivului și ocularului, permit obținerea unor sisteme optice de mare performanță, cu o calitate a imaginii deosebit de bună (contrast și rezoluție aproape ideale la frecvența de tăiere a receptorului natural).

4.2. SINTEZA ȘI ANALIZA SUBANSAMBLURILOR UNEI LUNETE KEPLER CU REDRESOR CONECTAT ÎN PLANELE ANTIPRINCIPALE

4.2.1. CALCULUL DE GABARIT

Pentru calculul de gabarit al lunetei propriu-zise se utilizează relațiile (4.1)...(4.8).

Pentru calculul redresorului (fig. 4.25) se propune un algoritm bazat pe următoarele condiții:

- gabaritul radial mai mic cel mult egal cu al obiectivului
- numărul de deschidere al dubletului cuprins în intervalul uzual (5...3).

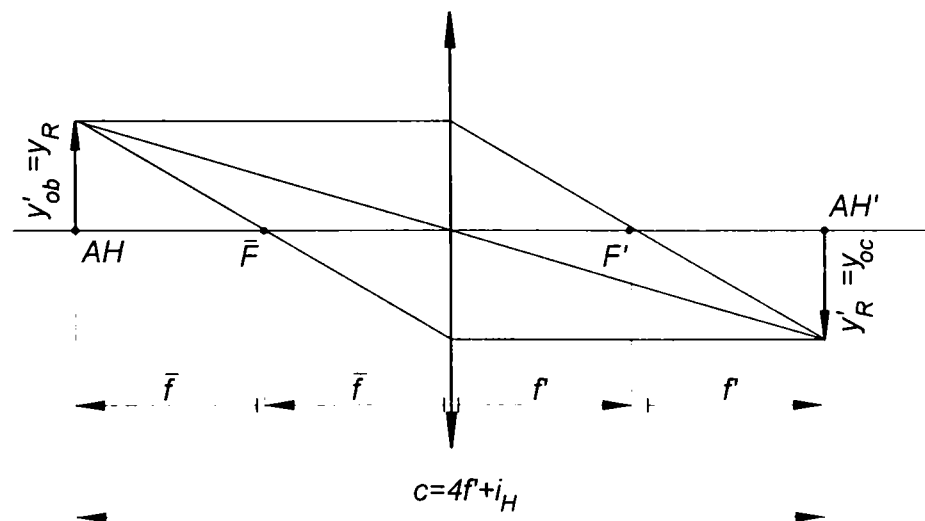


Fig. 4.25. Schema optică a redresorului conectat în punctele antiprinicipale

Considerând $D_u \leq 24$ mm și $f'/D_u \approx 3$ rezultă $f' \approx 75$ mm. În aceste condiții urmează sinteza unui dublet cu distanța obiect $s = -150$ mm. Urmărind procedurile de sinteză a dubletului acromat din paragraful 3.3 se obține sistemul cu caracteristicile (pentru sorturile de sticle K3-F2):

$$r_1 = 40.25 \text{ mm}$$

$$r_2 = -22.43 \text{ mm}$$

$$r_3 = -102.65 \text{ mm}$$

$$d_1 = 3.63 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1.44 \text{ mm.}$$

4.2.2. ANALIZA REDRESORULUI

Analiza redresorului cu programul OSLO LT permite introducerea mărimii imaginii intermediare ($y' = 8.38$ mm) și determinarea iterativă a absciselor obiect și imagine reale. Se observă că acestea diferă de cele teoretice (140 mm pentru $f' = 70$ mm). Cea mai bună pereche de abscise, pentru care s-a adoptat și defocusarea ca metodă de optimizare a calității imaginii este $s = -138$ mm, $s' = 137.40$ mm. Aceste valori asigură o mărime a imaginii $y'_R = 8.74$ (fig.4.26). Redresorul va introduce o mărime transversală ușor diferită de unitate: $\beta = y'_R / y'_{ob} = -1.021:1$ (fig.4.27).

În figurile 4.26... 4.33 este prezentată analiza completă a dubletului redresor.

Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Redresor_K3-F2_f'/D_4.16						Efl 70.209082
Ent beam radius		8.380000	Field angle	-3.550000	Primary wavln	0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	138.000000	8.561326	AIR		
AST	40.250000	6.000000	8.380000	K3	AS	
2	-22.430000	2.000000	8.436957	F2	S	
3	-102.650000	0.000000	8.502791	AIR	S	
IMS	0.000000	137.407996	8.745335	S		

Fig. 4.26. Foaia de date a dubletului redresor

```

TW 1
Len Spe Rin Ape Wav Pac Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf
*LENS DATA
Redresor_K3-F2_f'/D_4.16
SRF      RADIUS      THICKNESS  APERTURE RADIUS  GLASS  SPE  NOTE
OBJ      --          138.000000  8.561326         AIR
AST      40.250000     6.000000   8.380000 AS      K3  C
2        -22.430000     2.000000   8.436957 S      F2  C
3        -102.650000     --          8.502791 S      AIR
IMS      --          137.407996  8.745335 S
*REFRACTIVE INDICES
SRF      GLASS      RN1      RN2      RN3      VNBR      TCE
0        AIR      1.000000  1.000000  1.000000  --        --
1        K3      1.520325  1.524845  1.515982  58.706658  83.000000
2        F2      1.624081  1.633101  1.615816  36.105337  82.000000
3        AIR      1.000000  1.000000  1.000000  --        236.000000
4        IMAGE SURFACE
*PARAXIAL CONSTANTS
Effective focal length:  70.209082  Lateral magnification:  -1.021535
Numerical aperture:    0.059335  Gaussian image height:  -8.745692
Working F-number:      8.426698  Petzval radius:        -96.403777
Lagrange invariant:    0.519883
*WAVEFRONT BF
POLYCHROMATIC
RMS OPD  STREHL RATIO  RSY      RSX      RSZ
0.085974  0.793430     --        --        0.000285
    
```

Fig. 4.27. Caracteristicile geometrice, de material, optice de referință și de calitate a dubletului redresor

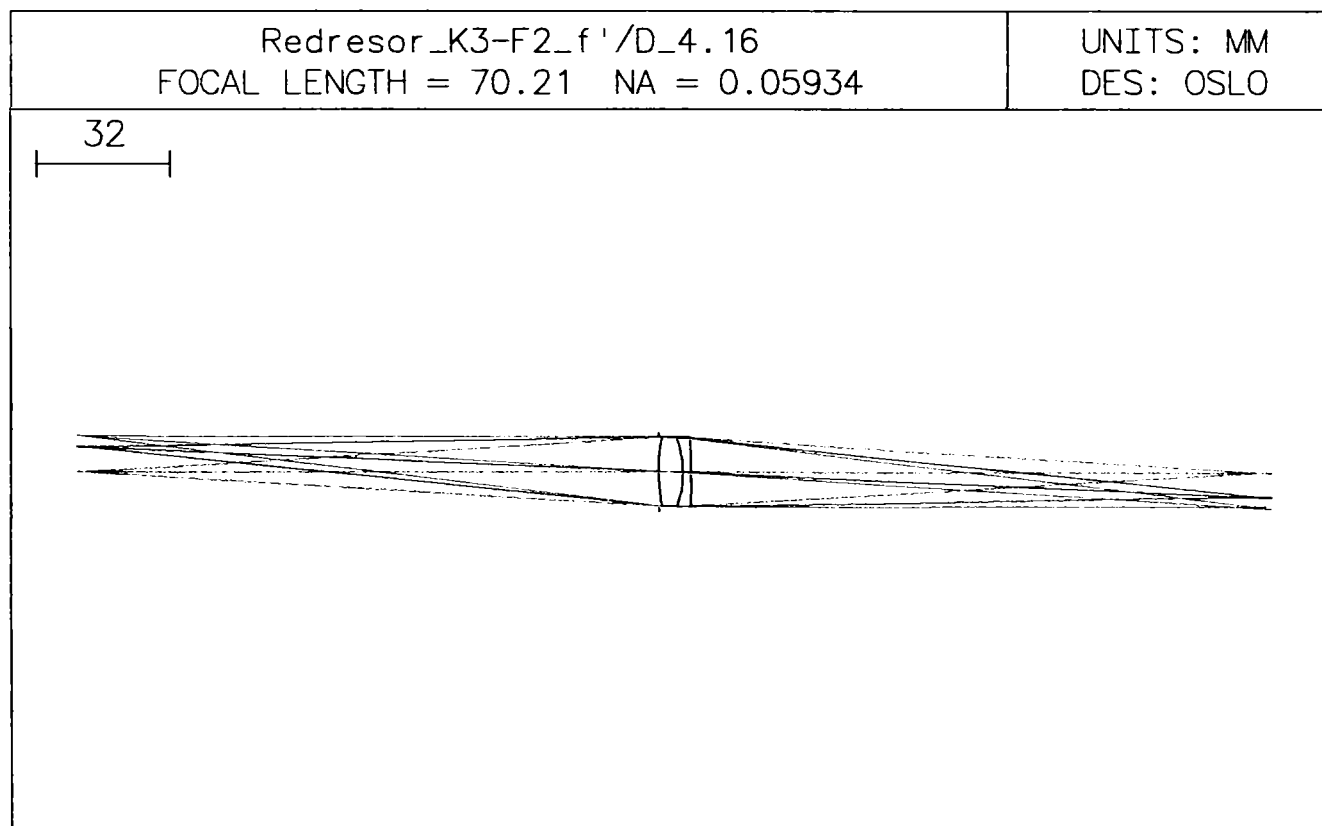


Fig. 4.28. Schema optică a dubletului redresor

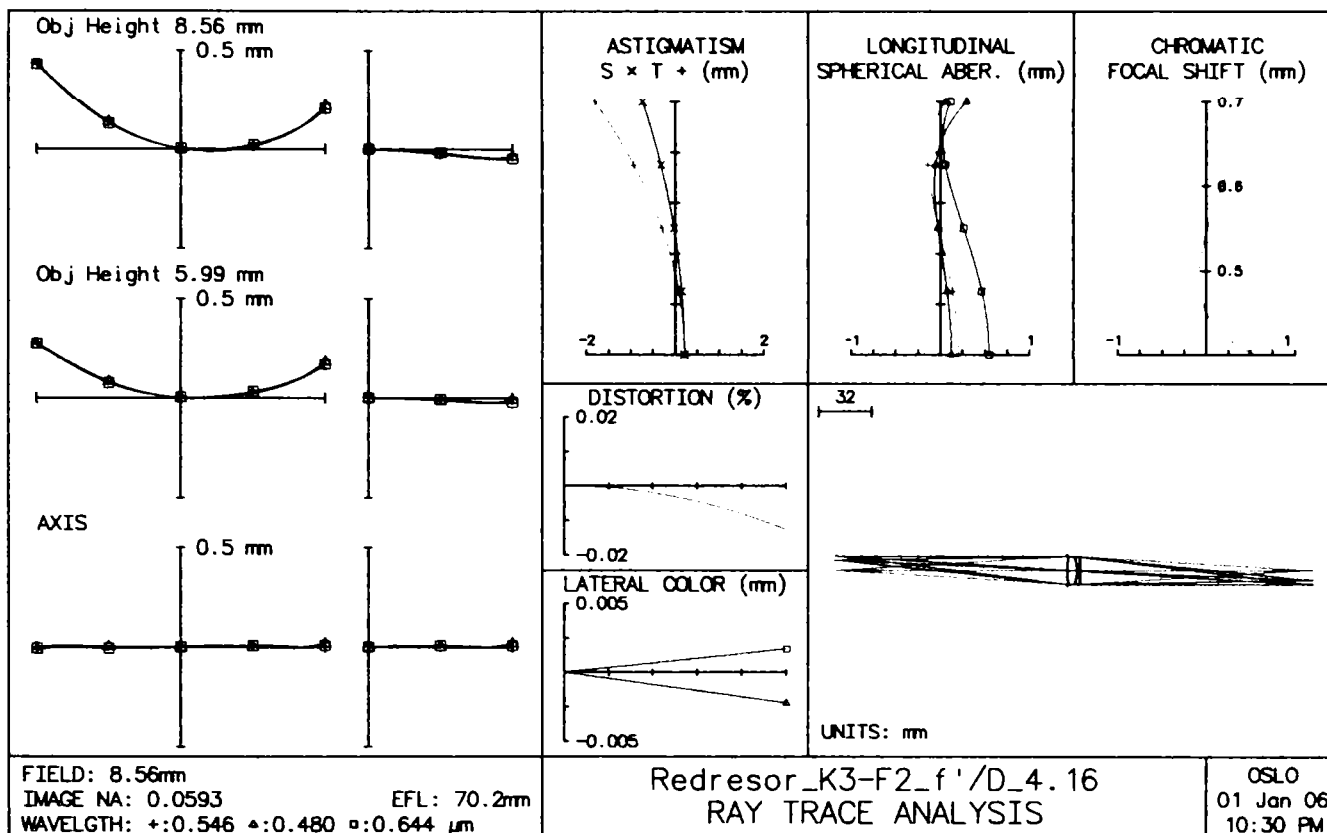


Fig. 4.29. Aberațiile geometrice și cromatice ale dubletului redresor

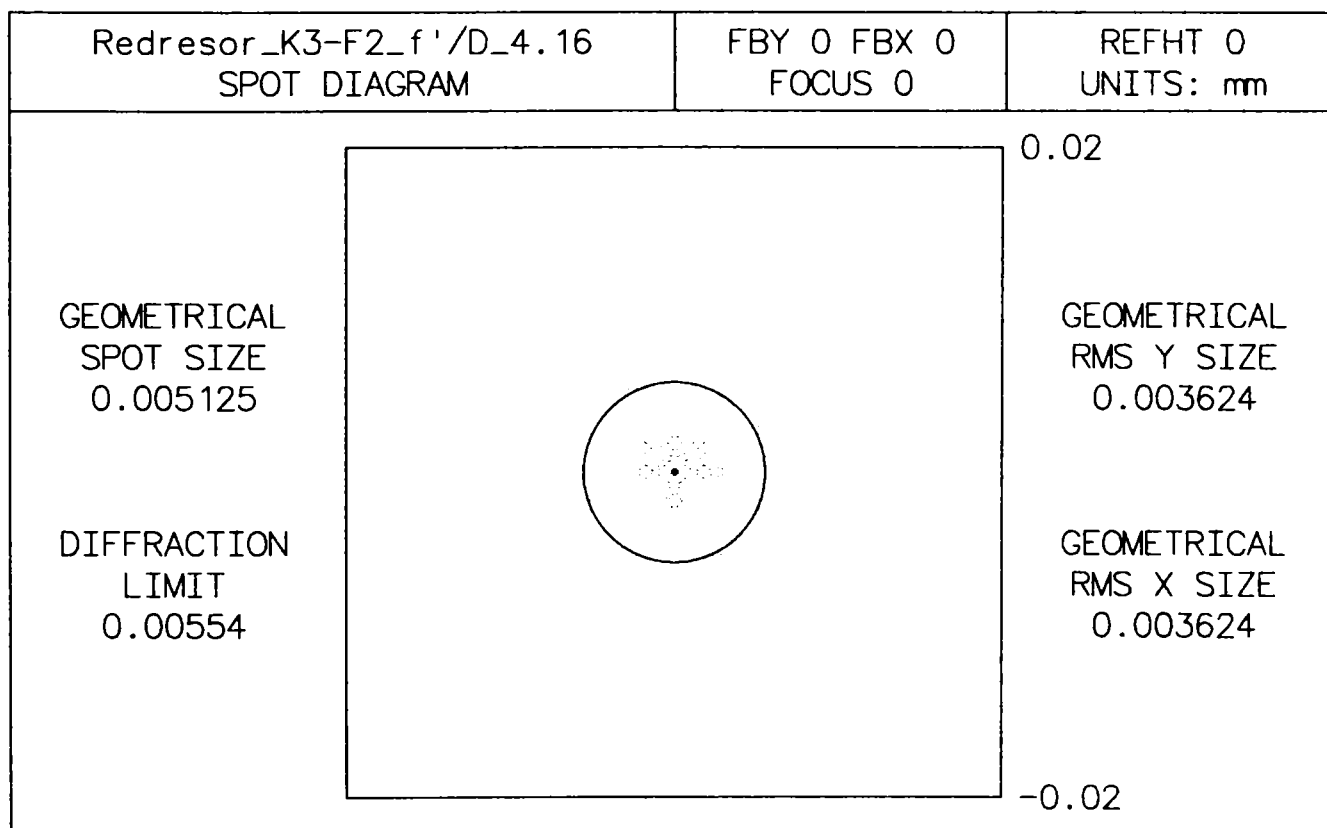


Fig. 4.30. Diagrama spot a dubletului redresor

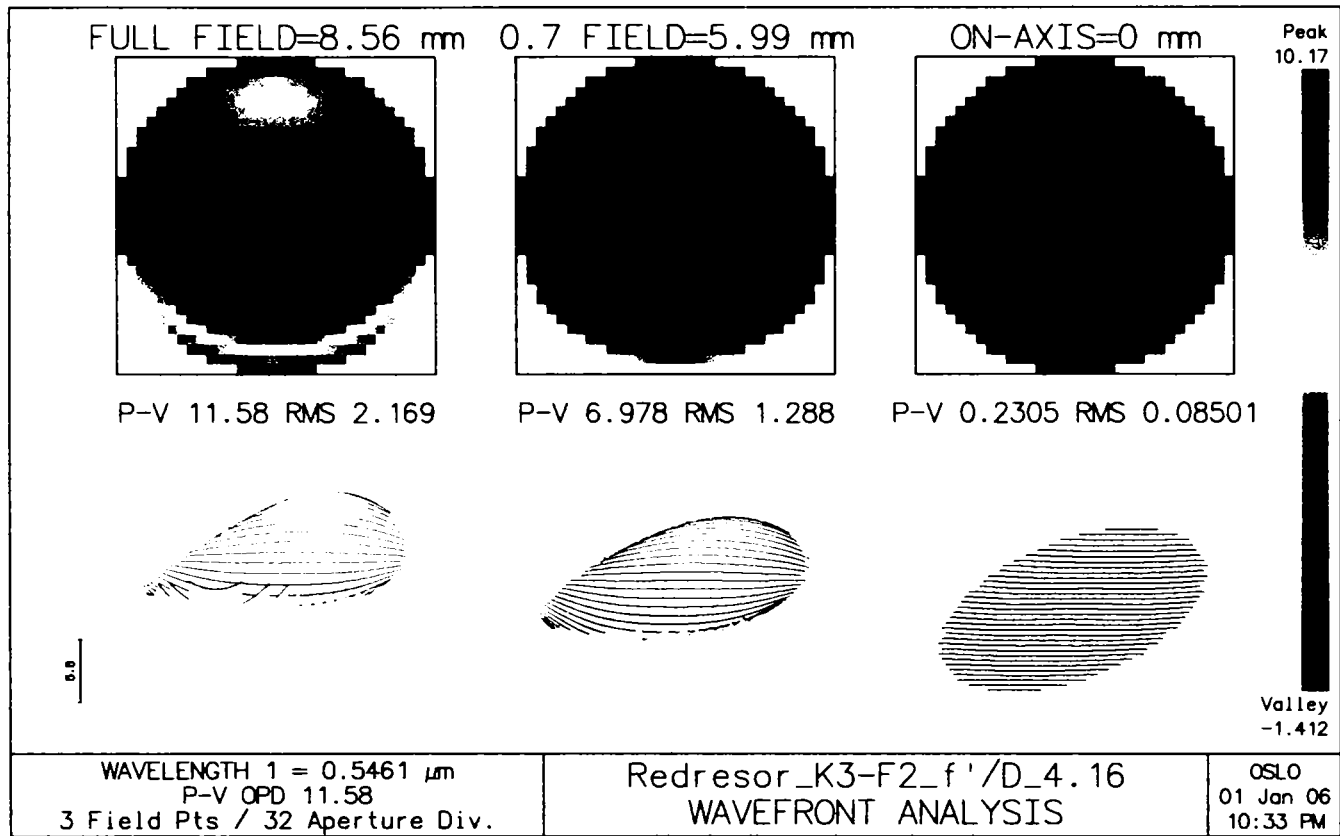


Fig. 4.31. Analiza frontului de undă pentru dubletul redresor

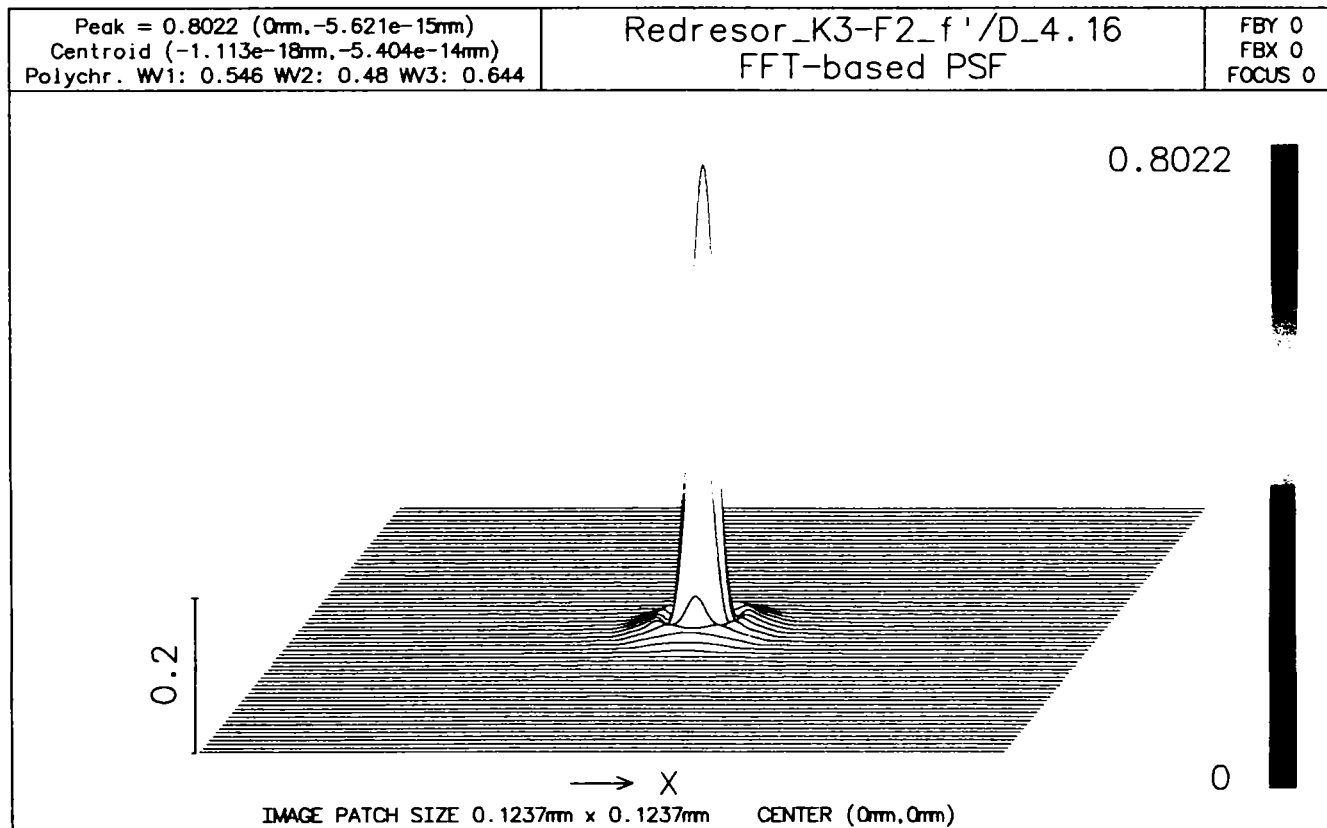


Fig. 4.32. Funcția imagine a punctului pentru dubletul redresor

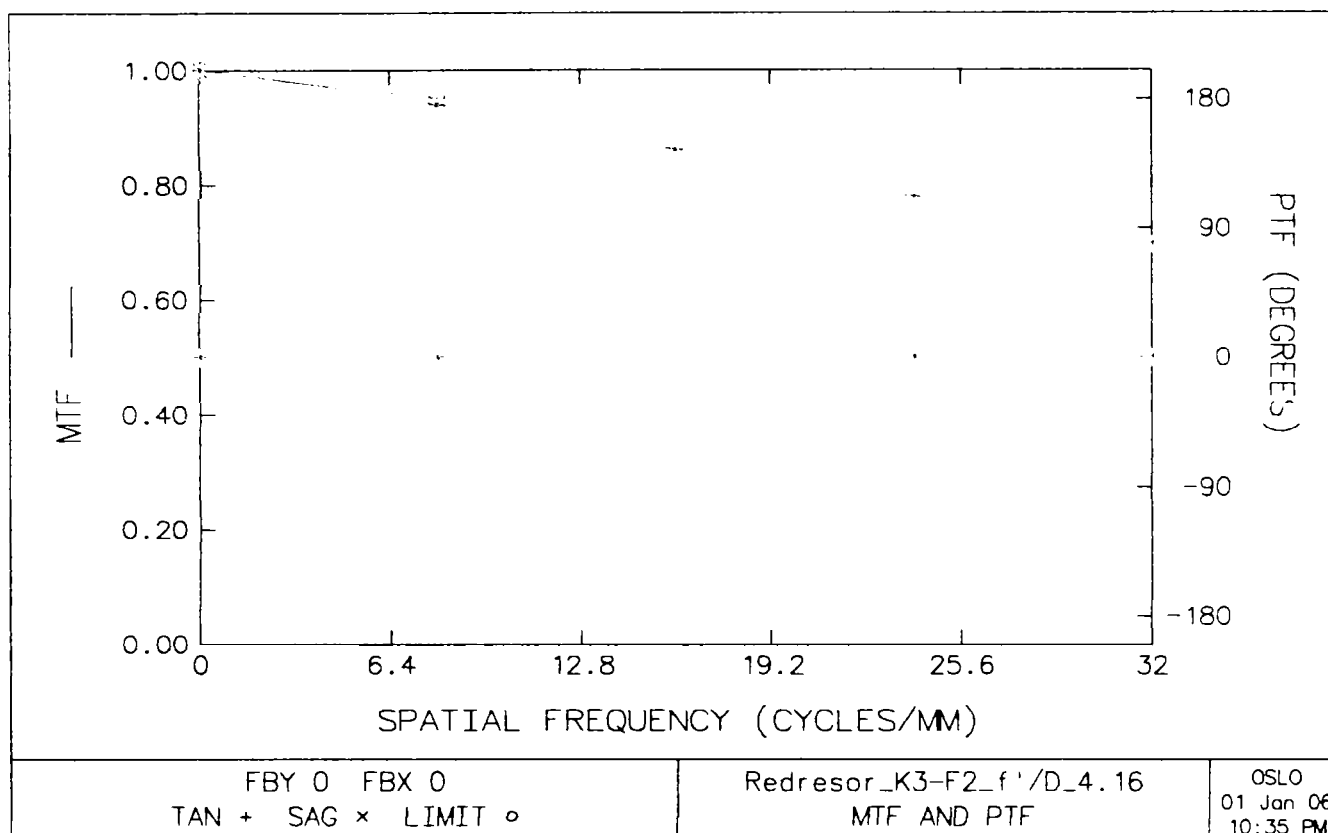


Fig. 4.33. Funcția optică de transfer de modulație și de fază pentru dubletul redresor

Dubletul prezentat oferă o bună calitate a imaginii, sistemul încadrându-se în categoria limitat la difracție, cu parametri având valori la limita inferioară a categoriei. Proiectarea dubletului a necesitat mai multe exerciții de sinteză, dintre care s-a ales cel cu rezultatele cele mai bune. Obținerea unei calități foarte bune a imaginii este direct legată de numărul de deschidere al sistemului. În cazul dubletului, numerele de deschidere se încadrează între 10 și 2.5, calitatea imaginii fiind tot mai slabă. Pentru dubletul cu rol de redresor conectat în punctele antiprincipale este necesar un număr de deschidere cât mai mic, având în vedere legătura directă între această caracteristică și focala redresorului, gabaritul radial și axial al lunetei. Pentru f/D cu valori mari rezultă focale și gabarit axial (egal aproximativ cu $f_{ob}+f_{oc}+4f_R$) inacceptabil de lungi. Din acest punct de vedere sunt preferabile redresoare cu focale mici, dar acestea impun numere de deschidere mari pentru o calitate bună a imaginii, ceea ce conduce la creșterea gabaritului radial.

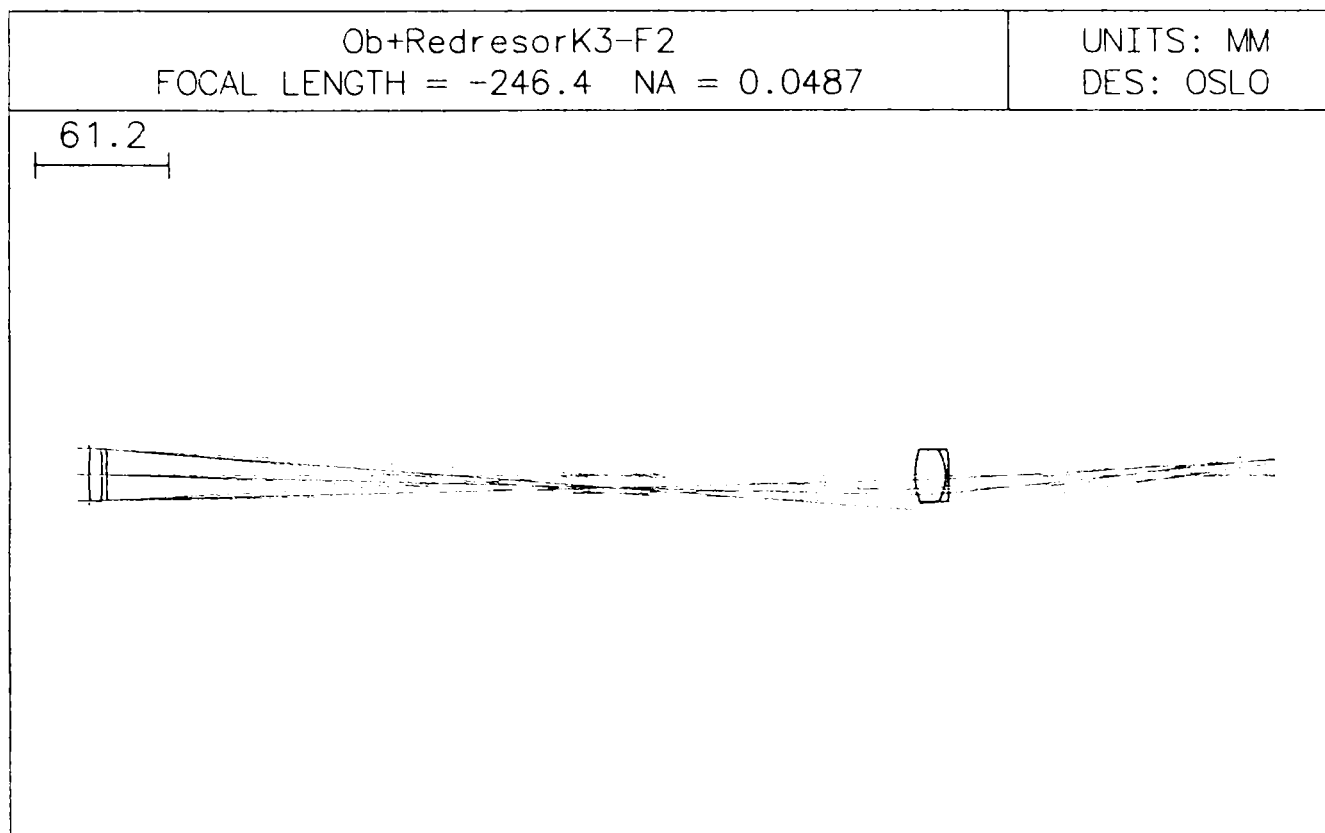


Fig. 4.34. Vignetarea fasciculului luminos datorită redresorului

4.2.3. ANALIZA SISTEMULUI OBIECTIV – REDRESOR. LENTILA DE CÂMP

Legătura între numărul de deschidere și focală reprezintă principala problemă în proiectarea dubletului. Nefiind stabilită distanța focală, nu se cunoaște nici abscisa obiect și, ca urmare, nu se poate calcula nici diametrul util, nici numărul de deschidere. De aceea s-a propus un algoritm care pornește de la limitarea gabariturii radial al redresorului la diametrul util al obiectivului și adoptarea unei valori a numărului de deschidere aproape de limita inferioară.

Acest calcul, care poate fi considerat de predimensionare, trebuie completat cu o analiză care să asigure conectarea corectă a tuburilor luminoase.

Această analiză vizează ansamblul obiectiv-redresor. Trasarea schemei optice cu mersul real al razelor pune în evidență o puternică vignetație a fasciculului care traversează tubul (fig. 4.34).

Conectarea directă a fasciculului luminos provenit de la obiectiv cu redresorul impune o deschidere mai mare a acestuia (~40 mm), ceea ce, pe lângă faptul că mărește substanțial gabaritul radial al sistemului, conduce și la scăderea drastică a calității imaginii. Acest calcul se poate realiza și geometric (după ce se cunoaște focala și abscisa obiect a redresorului), determinând diametrul util al redresorului cu

relația (4.7), în care se consideră $\sigma'=4.85^\circ$, $l=f'_{ob}+2f'_R=380$ și $D=24$ mm. Se obține $D\sim 40$ mm.

Pentru scăderea diametrului util necesar redresorului se recurge la o lentilă de câmp care se introduce în planul imaginii intermediare. Această lentilă nu are efect optic (nu introduce deplasări axiale ale imaginii și mărire transversală), ci are rolul de a proiecta imaginea dată de obiectiv pe redresor. Pentru proiectarea ei se impun deci următoarele date inițiale:

$s = -233.6561$ (abscisa imaginii intermediare date de obiectiv),

$s'=135$ (abscisa obiect a redresorului).

Din ecuația de formare a imaginii:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (4.13)$$

rezultă puterea, respectiv distanța focală a lentilei de câmp, $f'=85$ mm.

Din expresia puterii lentilei singulare:

$$\frac{1}{f'} = c(n-1) \quad (4.14)$$

și alegând ca material optic sortul K3 Schott se obține curbura totală $c=0.0224839$.

Având la dispoziție două grade de libertate (razele r_1 și r_2) se propune utilizarea relațiilor corespunzătoare lentilei de cea mai buna formă privind aberația sferică. Rezultă:

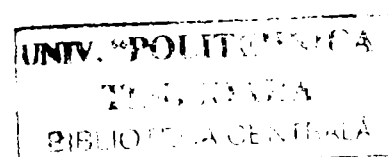
$$r_1 = 147.59$$

$$r_2 = -111.18$$

$$d = 2.05 \text{ (pentru o deschidere utilă de 19 mm).}$$

Gabaritul radial al redresorului a scăzut până la aproximativ 22 mm, ceea ce convine din punct de vedere constructiv și al aberațiilor.

Sistemul obiectiv-lentilă de câmp-redresor este prezentat și analizat în figurile 4.35...4.40.



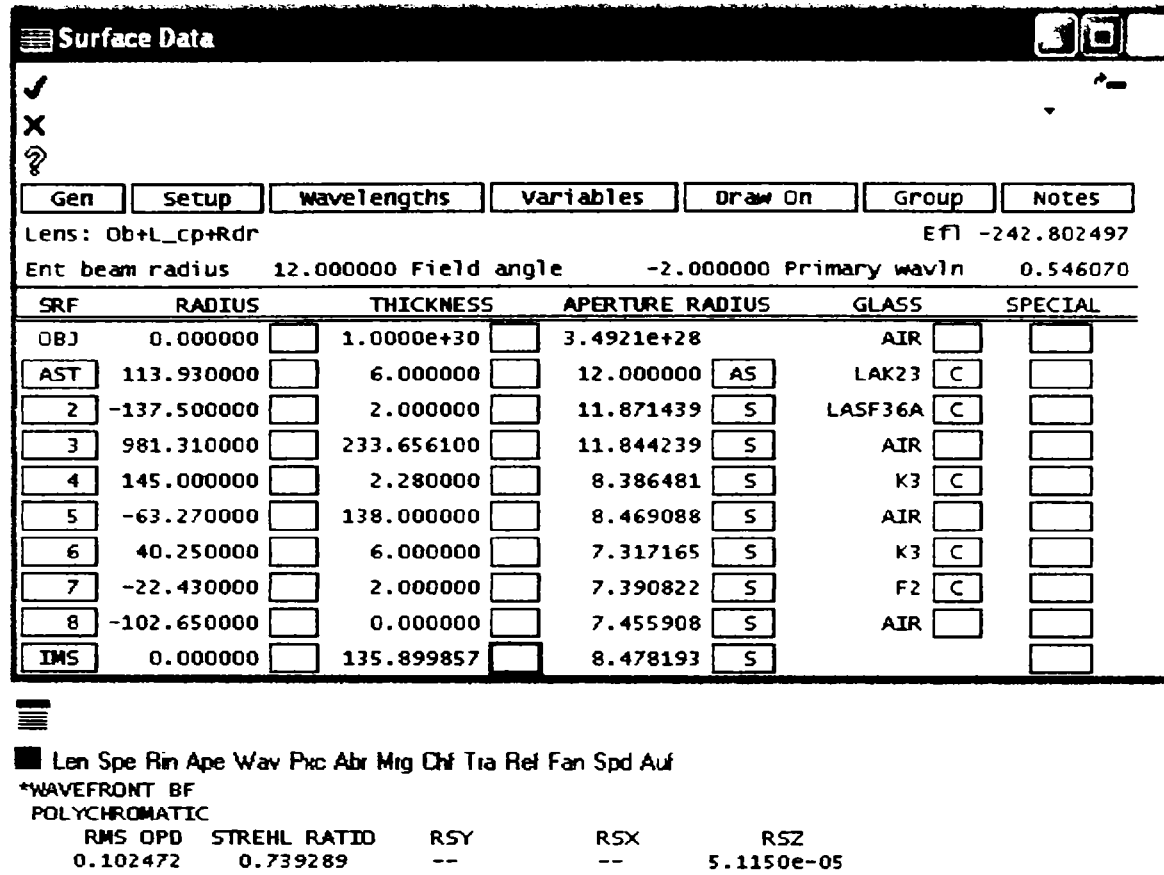


Fig. 4.35. Foaia de date și caracteristicile de calitate a sistemului obiectiv – lentilă de câmp – redresor

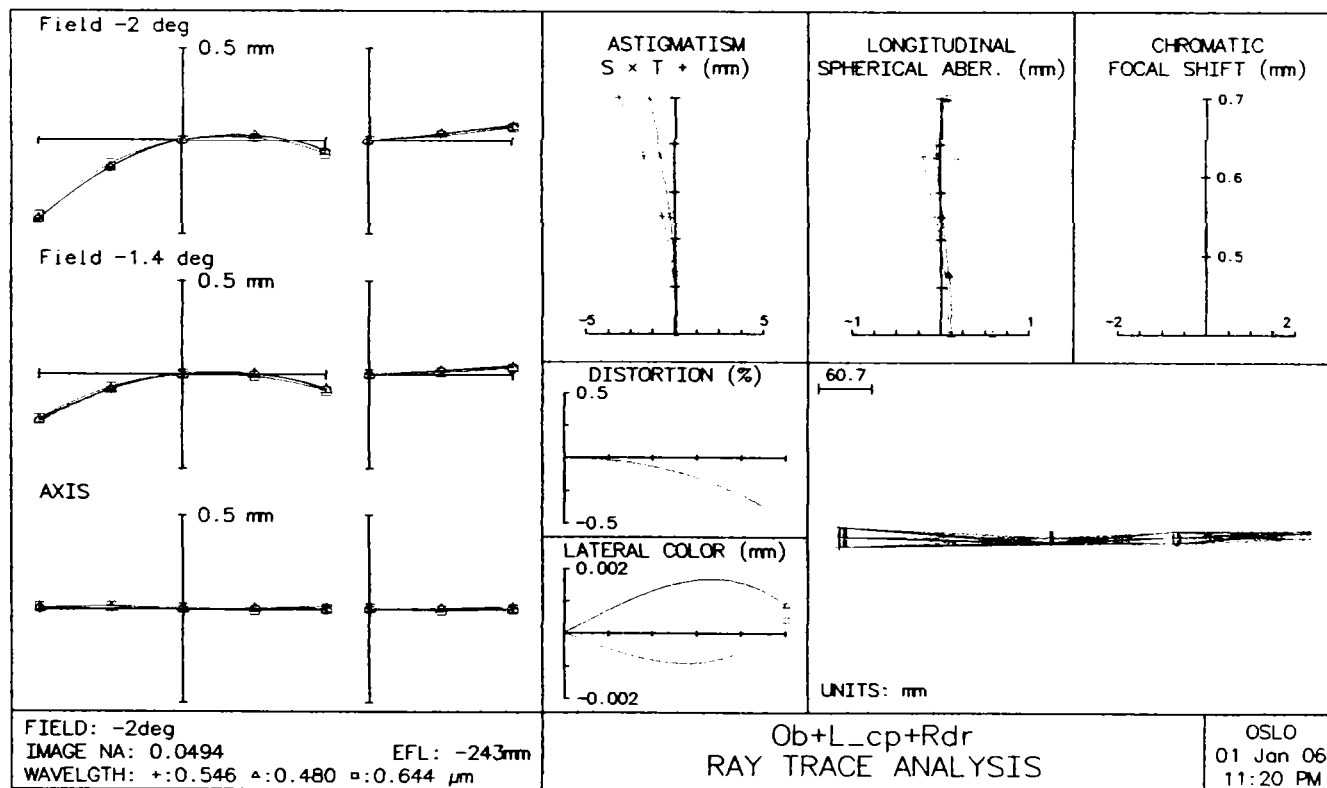


Fig. 4.36 Aberrațiile geometrice și cromatice ale sistemului obiectiv – lentilă de câmp – redresor

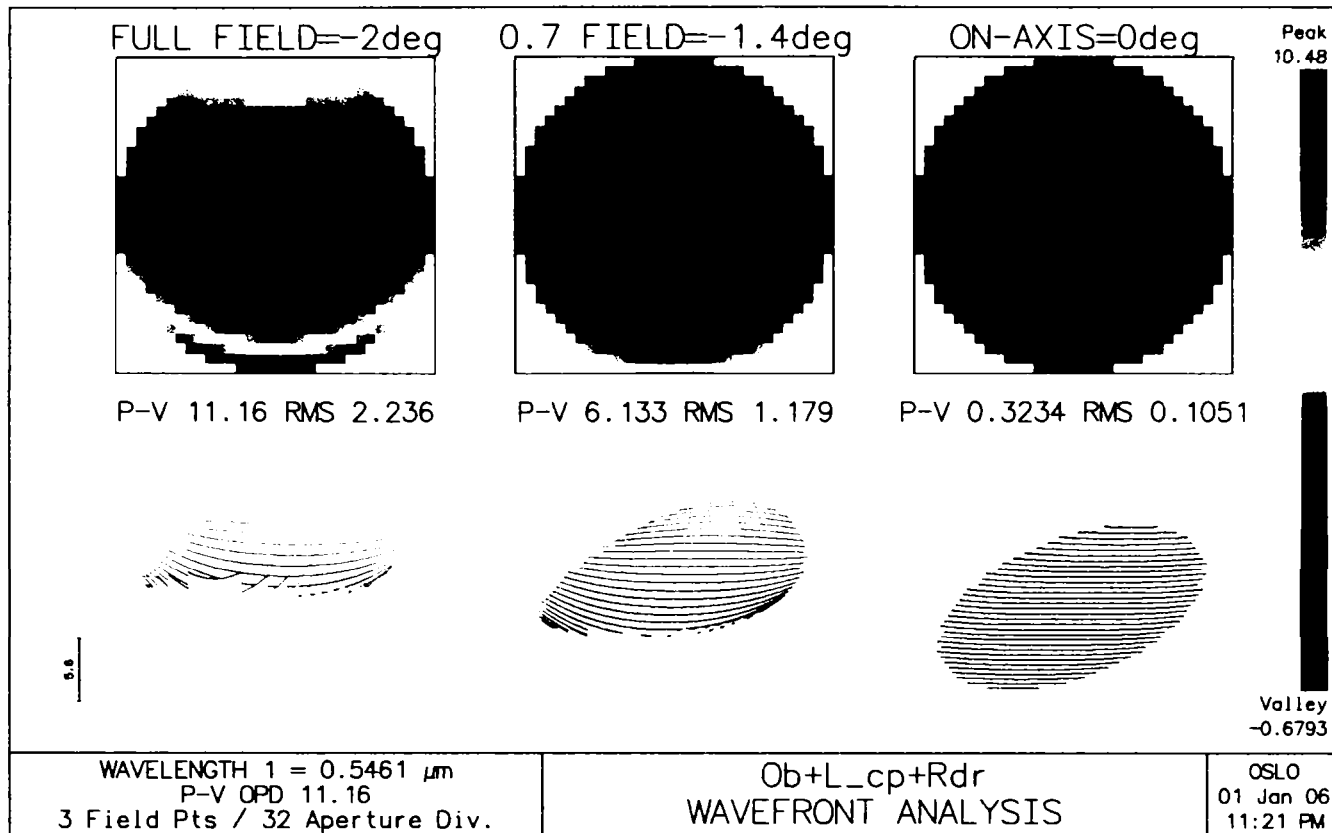


Fig. 4.37 Analiza frontului de undă pentru sistemul obiectiv – lentilă de câmp – redresor

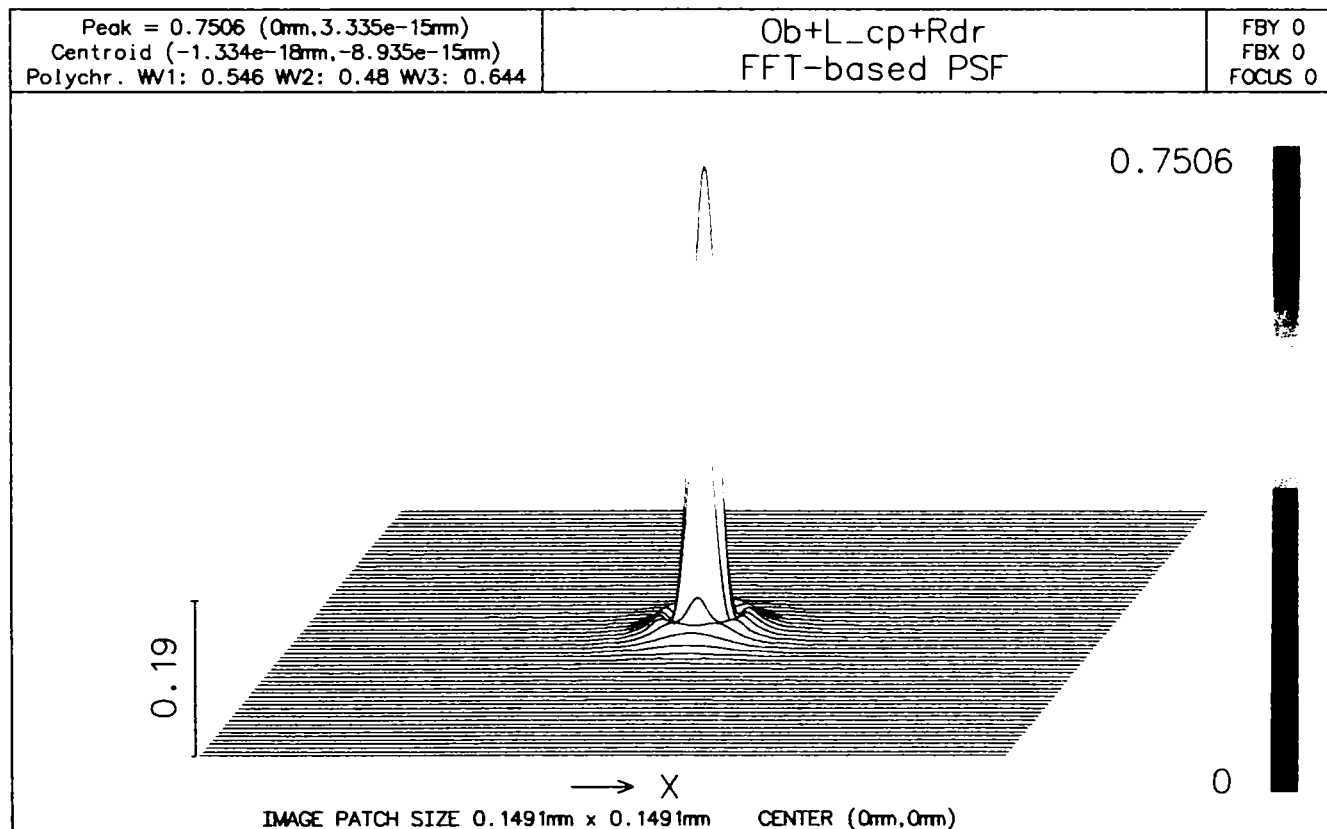


Fig. 4.38 Funcția imagine a punctului pentru sistemul obiectiv – lentilă de câmp – redresor

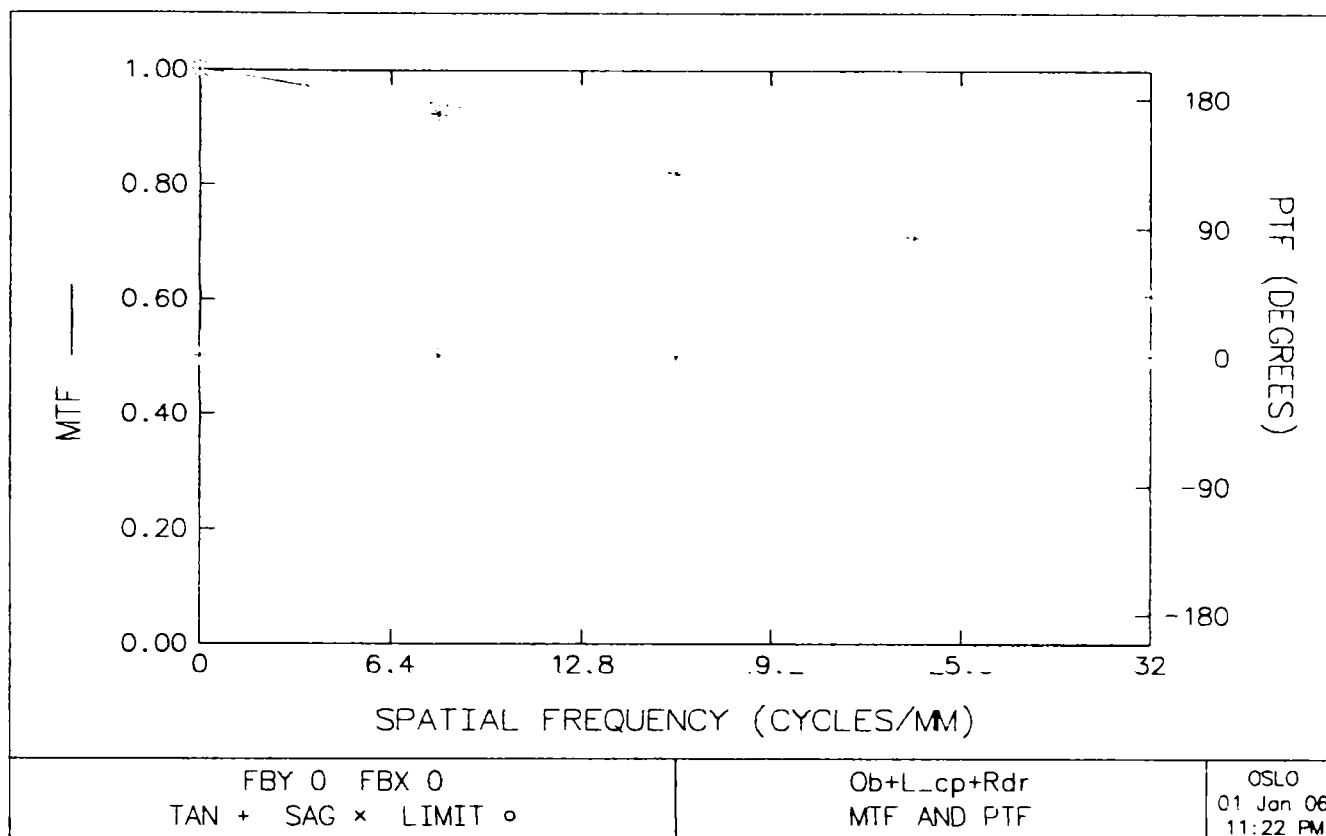


Fig. 4.39 Funcția optică de transfer de modulație și de fază pentru sistemul obiectiv – lentilă de câmp – redresor

Observație:

Se poate studia și în acest caz modul de compunere a parametrilor Fourier de calitate a imaginii.

În tabelul 4.2 sunt prezentate sintetic valorile rezultate prin aplicarea regulii multiplicării și cele efective ale subansamblurilor și sistemului complet.

Tabelul 4.2

Parametru	Obiectiv	Lentila de câmp	Redresor	Ocular	Luneta	
					teoretic (prin compunere)	real (ca sistem)
RMS OPD	0.0416	1.6038	0.0859	0.0217	-	0.1024
PSF	0.9398	0.0426	0.8022	0.9850	0.0316	0.7393
MTF (32 pl/mm)	~0.75	~0.10	~0.70	~0.78	~0.0409	~0.51
SREHL	0.9365	0.0614	0.7934	0.9841	0.0448	0.7274

Analizând datele din tabelul 4.2 rezultă următoarele observații:

- în cazul sistemelor formate din componente cu parametri de calitate foarte diferiți regula multiplicării nu poate fi aplicată, rezultatele fiind cu un

ordin de mărime mai mici

- elementul cu cea mai slabă calitate a imaginii este lentila singulară, care nu poate fi limitată la difracție, indiferent de algoritmul de proiectare
- influența slabă a lentilei de câmp asupra parametrilor de calitate a întregului sistem poate fi explicată prin faptul că această lentilă nu reprezintă un element optic activ, ci un releu de imagine care proiectează imaginea dată de obiectiv pe redresor
- pentru a elimina chiar și această influență slabă, lentila de câmp singulară poate fi înlocuită cu un dublet acromat având aceleași caracteristici de putere, dar parametri de calitate a imaginii mult mai ridicați
- în figura 4.40 este redată foaia de date și parametrii sintetici de calitate a sistemului având un dublet cu rol de lentilă de câmp. Se observă faptul că sistemul, ca ansamblu, și-a păstrat calitatea de limitat la difracție. În figura 4.41 poate fi urmărit traseul razelor prin subansamblurile obiectiv – lentila de câmp dublet – redresor dublet.

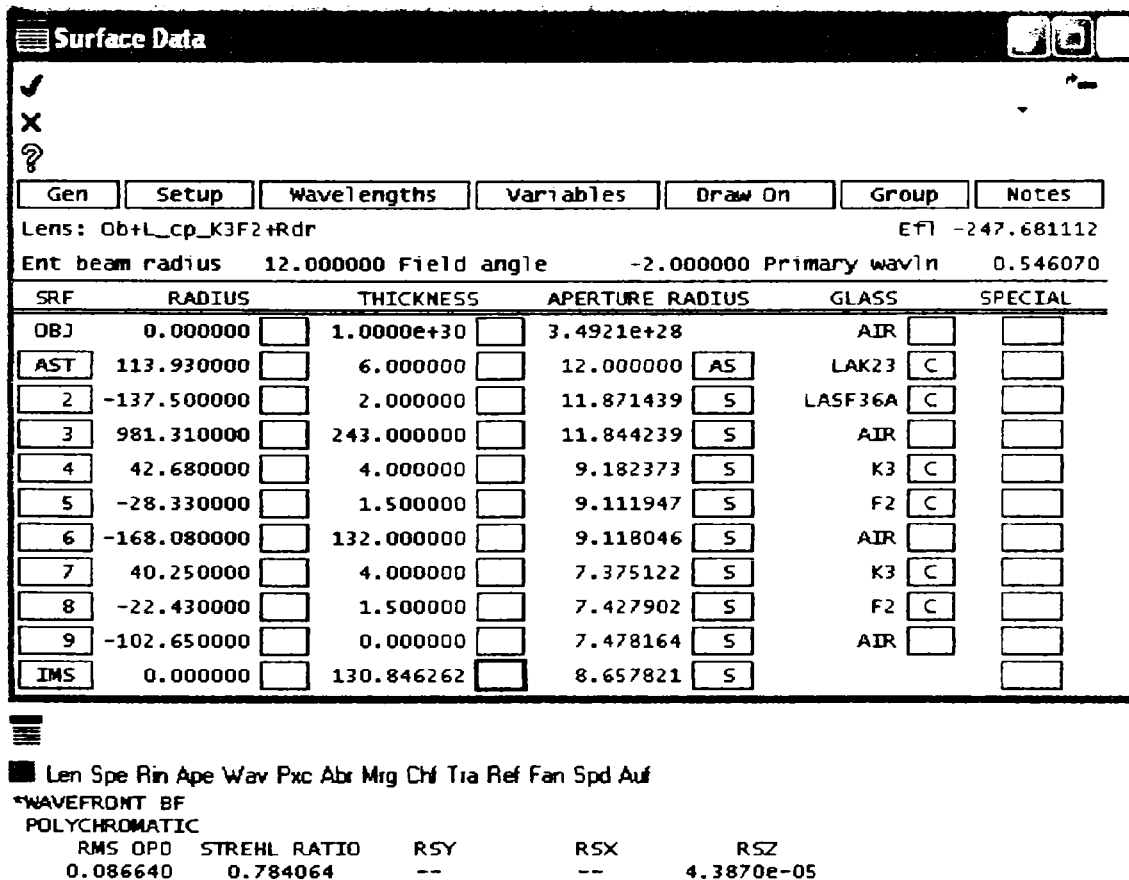


Fig. 4.40 Foaia de date și parametrii sintetici de calitate ai sistemului obiectiv – lentila de câmp dublet – redresor dublet

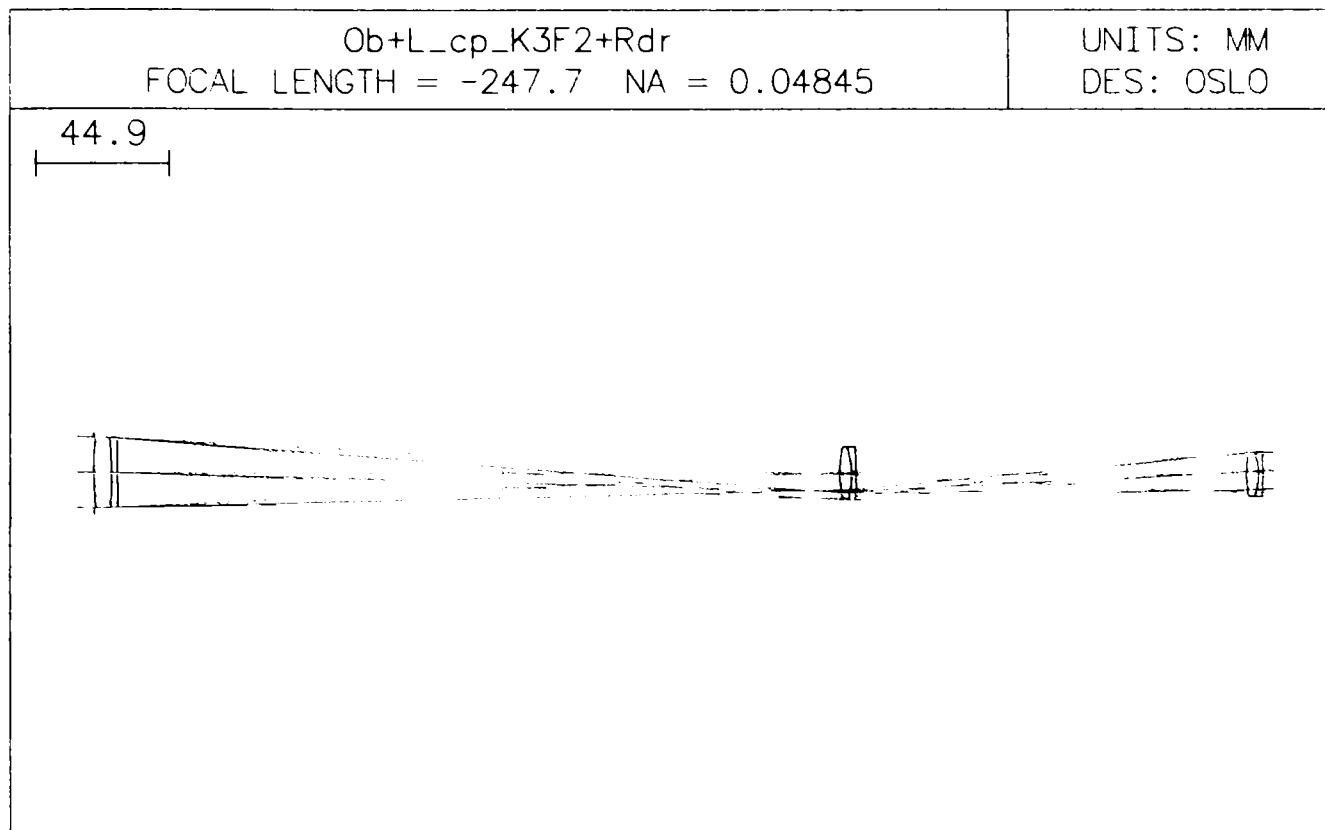


Fig. 4.41 Schema optică a sistemului

obiectiv – lentila de câmp dublet – redresor dublet

Ca o concluzie, se poate spune că redresorul conectat în punctele antiprinicipale determină un gabarit radial mare al sistemului, astfel încât este necesară introducerea unei lentile de câmp. Prezența acesteia, deși nu are efect optic, conduce la o scădere a calității imaginii. Chiar dacă toate subansamblurile sunt limitate la difracție, lentila de câmp determină o scădere a parametrilor de calitate ondulatorii și Fourier. Pentru menținerea calității sistemului la nivelul celorlalte subansambluri lentila de câmp singulară se poate înlocui cu un dublet acromat. Redresorul conectat în punctele sale antiprinicipale impune o creștere substanțială a gabaritului axial al lunetei (cu o lungime egală cu distanța focală a redresorului multiplicată cu 4).

**4.3. CALCUL DE GABARIT, SINTEZA ȘI ANALIZA REDRESORULUI AFOCAL
CONSTITUIT DIN DOUĂ DUBLETE**

Redresorul se montează astfel încât focarul obiect al primei lentile să coincidă cu focarul imagine al obiectivului, iar focarul imagine al celei de-a doua lentile să se suprapună cu focarul obiect al ocularului (fig. 4.42). În general, se preferă înlocuirea

lentilelor singulare cu dublete acromate, care asigură o calitate a imaginii mult mai bună. De asemenea, schema cea mai convenabilă presupune utilizarea unor dublete de aceeași putere, astfel încât $f_1=f_2$.

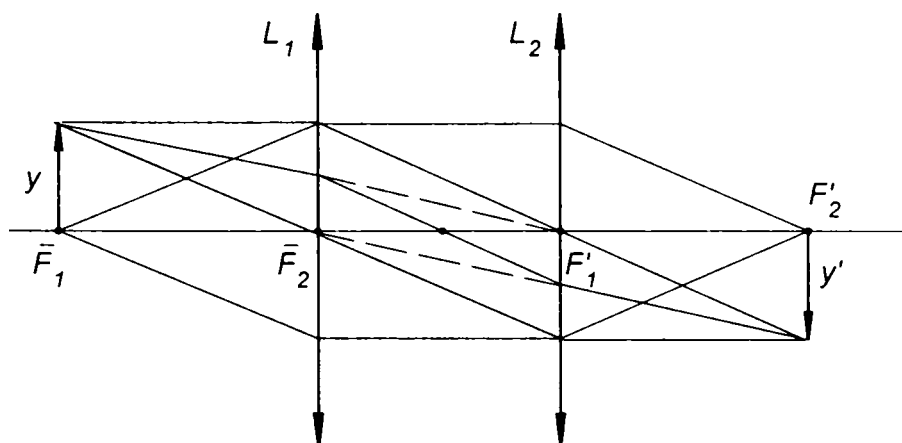


Fig. 4.42 Schema redresorului montat afocal

Calculul de gabarit și de sinteză a redresorului ridică aceleași probleme ca și în cazul precedent. Cele două necunoscute (putere și număr de deschidere) sunt legate între ele și determină și gabaritul axial al lunetei. Singura condiție care se poate impune este limitarea gabariturii radial. La aceasta se adaugă, eventual, numărul de deschidere al redresorului. Ca date de intrare, mărimea diametrului util și numărul de deschidere al redresorului, ca subsansamblu, reprezintă elemente relativ inconsistente pentru sinteza dubletelor componente. Proiectarea acestora are un caracter iterativ, bazat mai ales pe experiența și abilitatea operatorului care trebuie să coreleze permanent toți parametrii geometrici și de calitate, astfel încât să rezulte o soluție convenabilă.

Pentru proiectarea redresorului afocal format din două dublete simetrice s-a parcurs un algoritm bazat pe impunerea următoarelor date:

□ o creștere a gabariturii axial inferioară lungimii inițiale a lunetei:

$$l_R \leq f_{ob} + f_{oc} = 300 \text{ mm} \quad (4.13)$$

□ numărul de deschidere relativ mare pentru dubletele componente:

$$f_1/D = f_2/D = f/D = 6.25 \quad (4.14)$$

astfel încât să rezulte un număr de deschidere al sistemului redresor mic, dar la limita posibilității de asigurare a calității imaginii

□ diametrul util al redresorului, inferior gabariturii radial al obiectivului:

$$D \leq D_{ob} = 24 \text{ mm} \quad (4.15)$$

□ dubletele care formează redresorul sunt identice, plasate în poziții simetrice, separate de un strat subțire de aer, astfel încât puterea redresorului este dublul puterii unui dublet:

$$\frac{1}{f_R} = \frac{2}{f_1} = \frac{2}{f_2} = \frac{2}{f'} \quad (4.16)$$

□ între dubletele componente fasciculul este paralel, astfel încât distanța dintre dublete nu este semnificativă pentru mărirea liniară și mărirea imaginii, ci afectează doar gabaritul axial și puterea redresorului ca subansamblu. În aceste condiții, datele de intrare pentru sinteza unui dublet devin:

$$D = 24 \text{ mm}$$

$$f' = 24 \cdot 6.25 = 150 \text{ mm}$$

$$s = -\infty.$$

Perechea de materiale alese a fost K3-F2. Proiectarea s-a realizat pentru varianta "crown în față". S-a obținut următoarea soluție:

$$r_1 = 337.51 \text{ mm}$$

$$r_2 = -32.98 \text{ mm}$$

$$r_3 = -73.54 \text{ mm}$$

$$d_1 = 3.15 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1.5 \text{ mm}$$

$$s'_{F'} = 145.12 \text{ mm}.$$

Asocierea dubletelor pentru a forma subansamblul redresor presupune plasarea simetrică a acestora, dar cu lentilele divergente spre obiectiv, respectiv ocular. Această condiție de montaj este necesară pentru a păstra calitatea imaginii dubletului proiectat, astfel încât lentila convergentă să lucreze cu abscisă infinită, iar cea divergentă cu abscisă finită. Frontifocala imagine a dubletului proiectat devine pentru sistemul redresor distanță obiect. La abscisa determinată de această distanță trebuie să se afle imaginea intermediară formată de obiectiv.

În figura 4.43 este redată foaia de date a redresorului afocal format din două dublete identice și simetrice. Se observă egalitatea absciselor obiect și imagine, care asigură mărirea liniară unitară. Rezultă de asemenea, puterea, respectiv distanța focală a redresorului ($Efl = 74.49 \text{ mm}$). La deschiderea impusă de 24 mm, numărul

de deschidere este aproximativ 1/3, ceea ce înseamnă ca este de așteptat ca imaginea să aibă o calitate la limita categoriei limitat la difracție.

Surface Data						
Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Redresor afocal						Efl 74.498674
Ent beam radius		8.380000	Field angle	-3.300000	Primary wavln	0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	145.000000	8.360647	AIR		
AST	73.540000	1.500000	8.380000	F2	C	
2	32.980000	3.150000	8.420950	K3	C	
3	-337.510000	1.500000	8.567705	AIR		
4	337.510000	3.150000	8.654138	K3	C	
5	-32.980000	1.500000	8.745883	F2	C	
6	-73.540000	0.000000	8.812192	AIR		
IMS	0.000000	145.240878	8.378219	S		

Fig. 4.43 Foaia de date a redresorului montat afocal

În figura 4.44 se poate urmări mersul razelor prin redresor, cu punerea în evidență a măririi liniare unitare și a inversării imaginii. Se observă, de asemenea, că distanța dintre dublete a fost fixată la valoare minimă (1.5 mm), pentru a nu mări inutil gabaritul axial al lunetei, care chiar în aceste condiții a crescut cu aproximativ 290 mm.

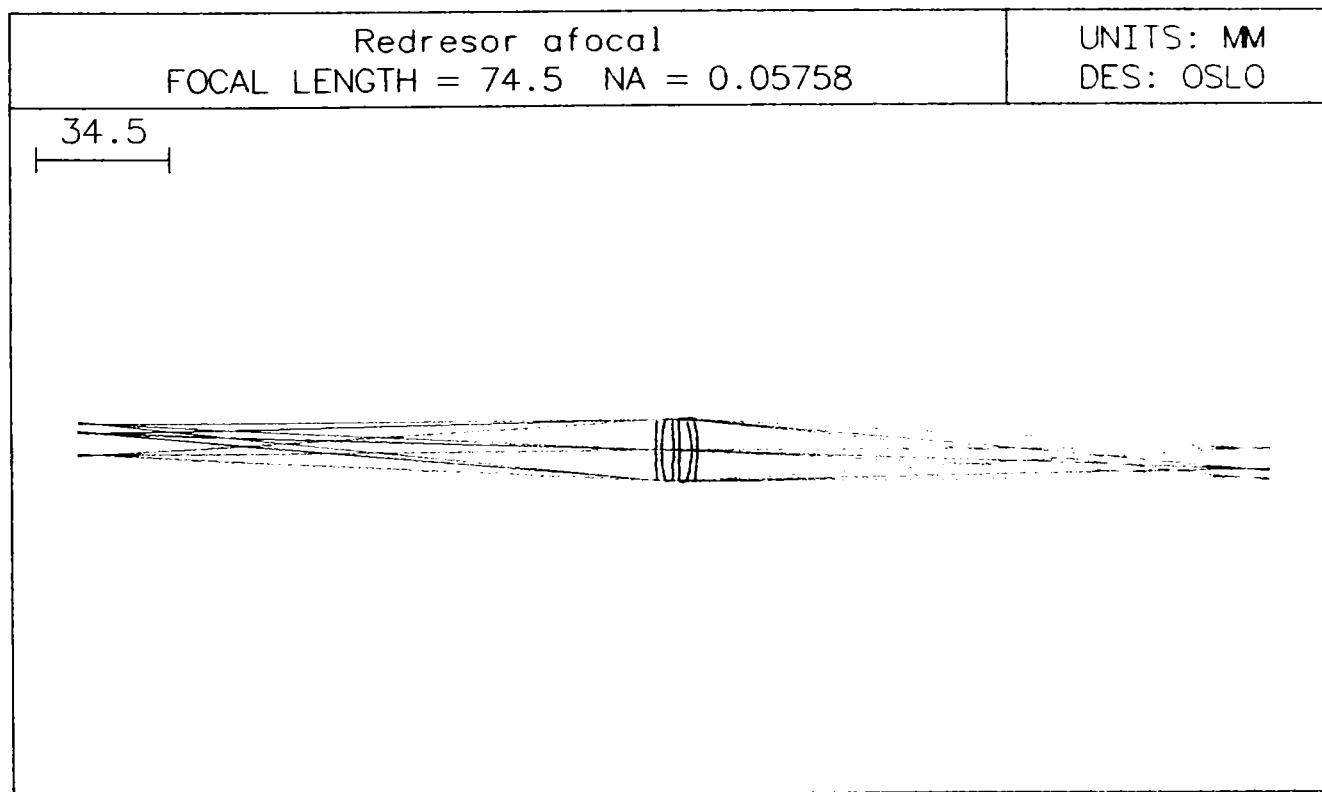


Fig. 4.44 Schema optică a redresorului montat afocal

Caracterizarea completă, geometrică, de material, optică și de calitate a imaginii este prezentată sintetic în figura 4.45.

Analiza statistică a frontului de undă furnizează parametrii globali de calitate, RMS OPD și raportul Strehl, ale căror valori asigură o calitate foarte bună a imaginii, sistemul încadrându-se în categoria limitat la difracție.

Figura 4.46 conține fereastra cu caracteristicile de referință și rezultatele sintetice ale calculului paraxial al sistemului.

În figurile 4.47 și 4.48 pot fi vizualizate aberațiile geometrice și cromatice, respectiv analiza frontului de undă pentru redresorul montat afocal.

Următoarele două imagini (fig. 4.49 și fig. 4.50) redau funcția imagine a punctului, respectiv funcția de transfer de modulație și de fază pentru același sistem.

```

TW 1
Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf Ope
*LENS DATA
Redresor afocal
SRF      RADIUS      THICKNESS  APERTURE RADIUS  GLASS  SPE  NOTE
OBJ      --          145.000000  8.360647         AIR
AST      73.540000    1.500000   8.380000 AS      F2  C
2        32.980000    3.150000   8.420950 S        K3  C
3       -337.510000  1.500000   8.567705 S        AIR
4        337.510000    3.150000   8.654138 S        K3  C
5       -32.980000    1.500000   8.745883 S        F2  C
6       -73.540000    --          8.812192 S        AIR
IMS      --          145.240878  8.378219 S
*REFRACTIVE INDICES
SRF      GLASS      RN1      RN2      RN3      VNBR      TCE
0        AIR       1.000000  1.000000  1.000000  --        --
1        F2       1.624081  1.633101  1.615816  36.105337  82.000000
2        K3       1.520325  1.524845  1.515982  58.706658  83.000000
3        AIR       1.000000  1.000000  1.000000  --        236.000000
4        K3       1.520325  1.524845  1.515982  58.706658  83.000000
5        F2       1.624081  1.633101  1.615816  36.105337  82.000000
6        AIR       1.000000  1.000000  1.000000  --        236.000000
7        IMAGE SURFACE
*PARAXIAL CONSTANTS
Effective focal length:  74.498674  Lateral magnification:  -1.002077
Numerical aperture:     0.057577  Gaussian image height:  -8.378015
Working F-number:       8.683989  Petzval radius:         -100.701464
Lagrange invariant:     0.483188
*WAVEFRONT
POLYCHROMATIC
RMS OPD  STREHL RATIO  YSHIFT  XSHIFT  RSZ
0.078791  0.829905     --      --      --
    
```

Fig. 4.45 Sinteza caracteristicilor redresorului montat afocal

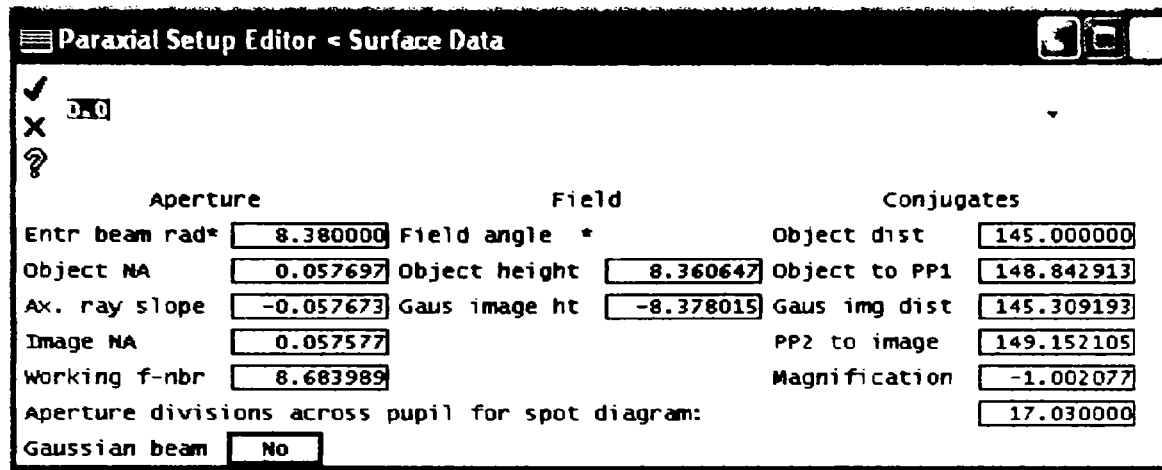


Fig. 4.46 Caracteristici de referință și paraxiale ale redresorului montat afocal

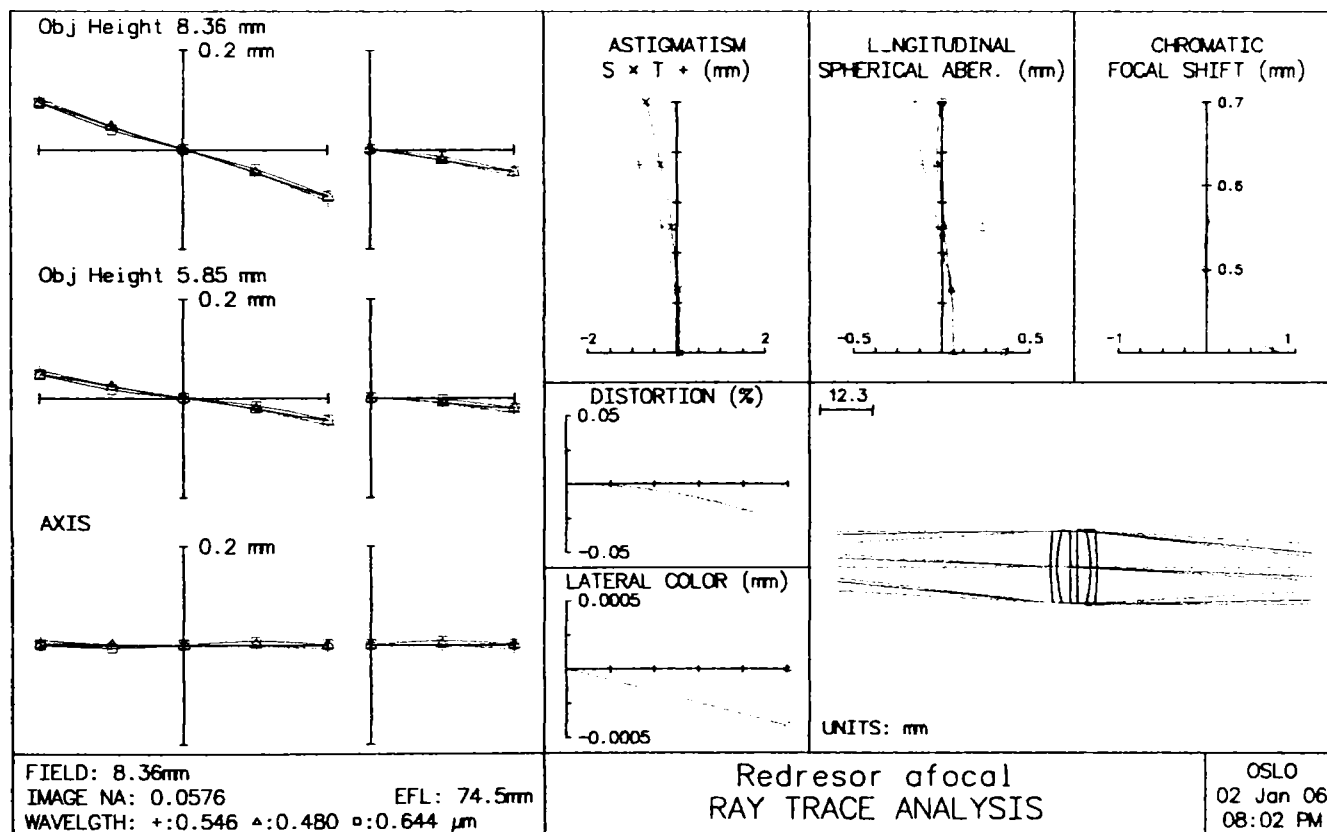


Fig. 4.47 Aberațiile geometrice și cromatice ale redresorului montat afocal

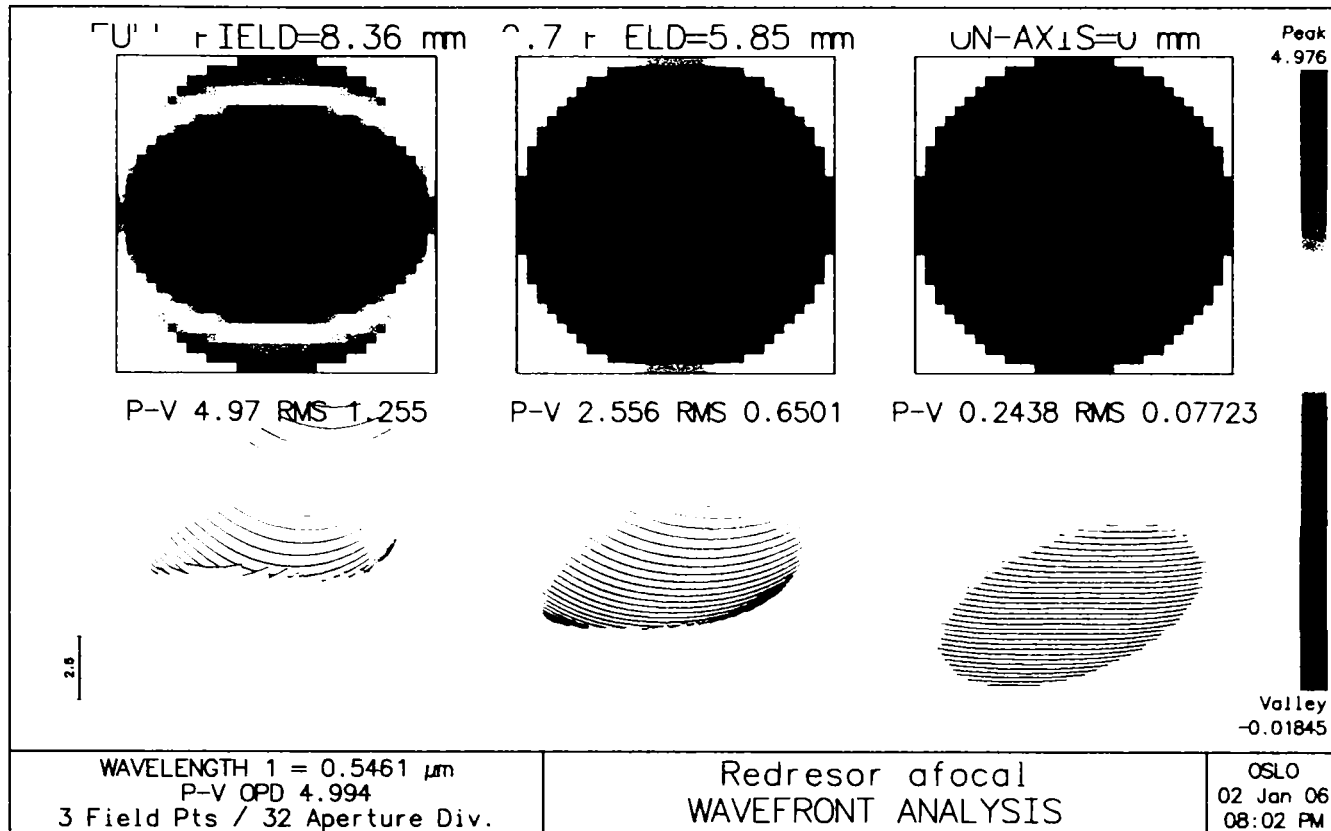


Fig. 4.48 Analiza frontului de undă pentru redresorul montat afocal

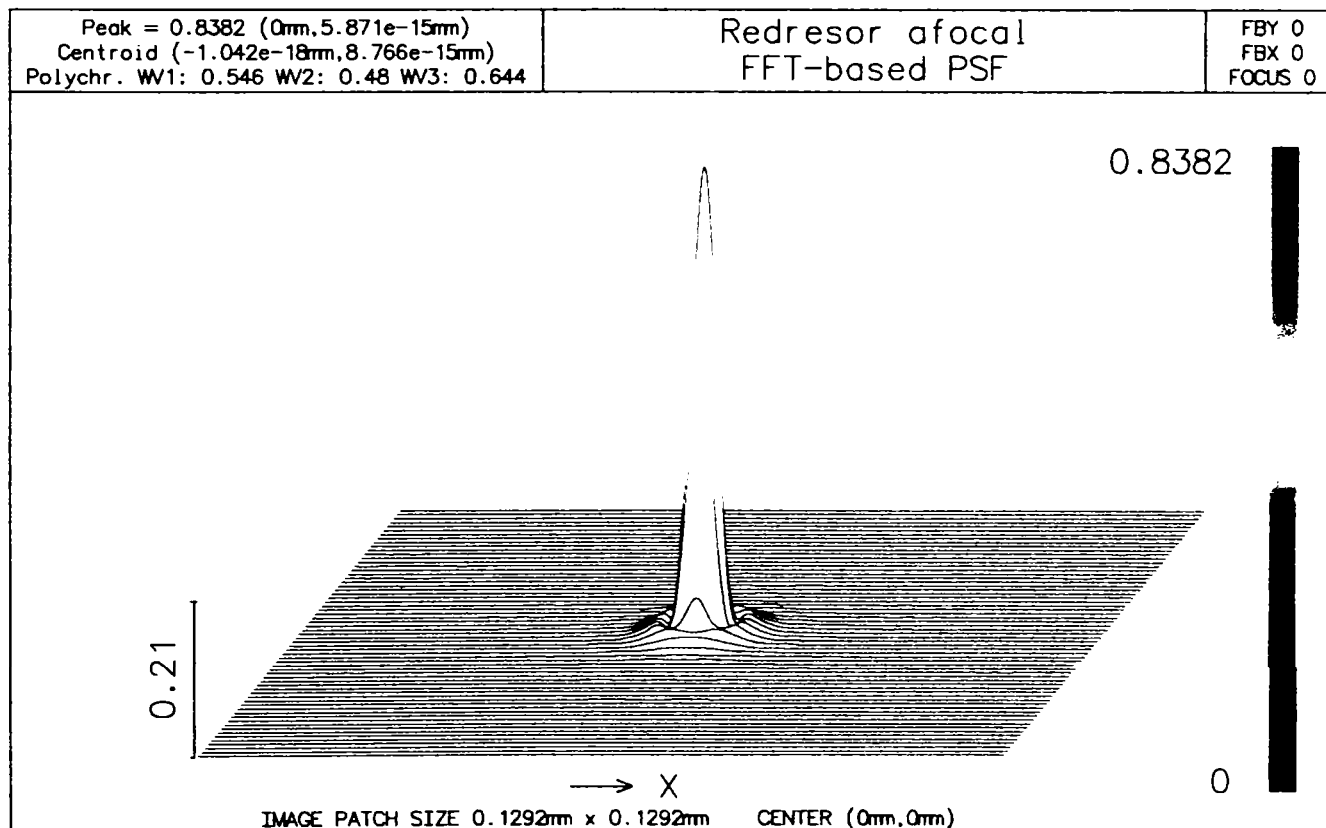


Fig. 4.49 Funcția imagine a punctului pentru redresorul montat afocal

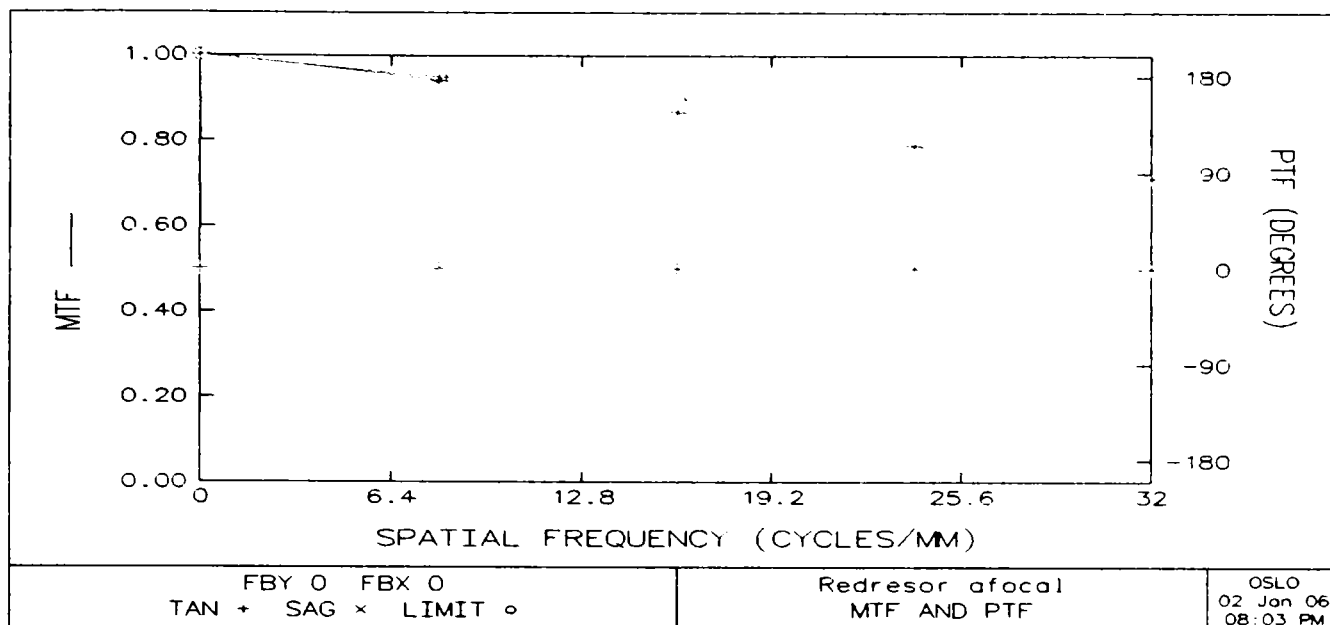


Fig. 4.50 Funcția optică de transfer de modulație și de fază pentru redresorul montat afocal

Urmează asocierea redresorului cu subansamblul obiectiv și verificarea condițiilor de conectare a tuburilor luminoase.

În figura 4.51 este redată foaia de date cu ajutorul căreia s-a analizat sistemul format din obiectiv și redresor montat afocal.

Surface Data

✓
X
?

Gen	Setup	wavelengths	variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Obiectiv+Redresor afocal						Efl -239.554113
Ent beam radius		12.000000	Field angle		-2.000000	Primary wavln 0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+30	3.4921e+28		AIR	
AST	113.930000	6.000000	12.000000		LAK23	AS
2	-137.500000	2.000000	11.871439		LASF36A	S
3	981.310000	378.650000	11.844239		AIR	S
4	73.540000	1.500000	20.736718		F2	S
5	32.980000	10.000000	20.652855		K3	S
6	-337.510000	1.500000	20.482986		AIR	S
7	337.510000	10.000000	20.396881		K3	S
8	-32.980000	1.500000	19.812478		F2	S
9	-73.540000	0.000000	19.787986		AIR	S
IMS	0.000000	144.811418	8.369762			S

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf Ope
 *WAVEFRONT
 POLYCHROMATIC
 RMS OPD 0.100166 STREHL RATIO 0.741364 YSHIFT -- XSHIFT -- RSZ --

Fig. 4.51 Foaia de date și parametrii globali de calitate ai sistemului format din obiectiv și redresor montat afocal

Se observă că proiectarea sistemelor este corectă, având o serie de elemente de control ale căror valori sunt corespunzătoare celor impuse sau determinate din calculele anterioare. Astfel, din foaia de date rezultă că pentru deschiderea obiectivului de 24 mm și unghiul de câmp obiect de 4°, imaginea intermediară este proiectată de redresor la abscisa de 144.81 mm și are mărimea de 8.37 mm.

Parametrii RMS OPD și raportul Strehl încadrează sistemul în categoria precis, cu o calitate foarte bună a imaginii.

Analiza completă și rezultatele acesteia sunt sintetizate în figurile 4.52... 4.54.

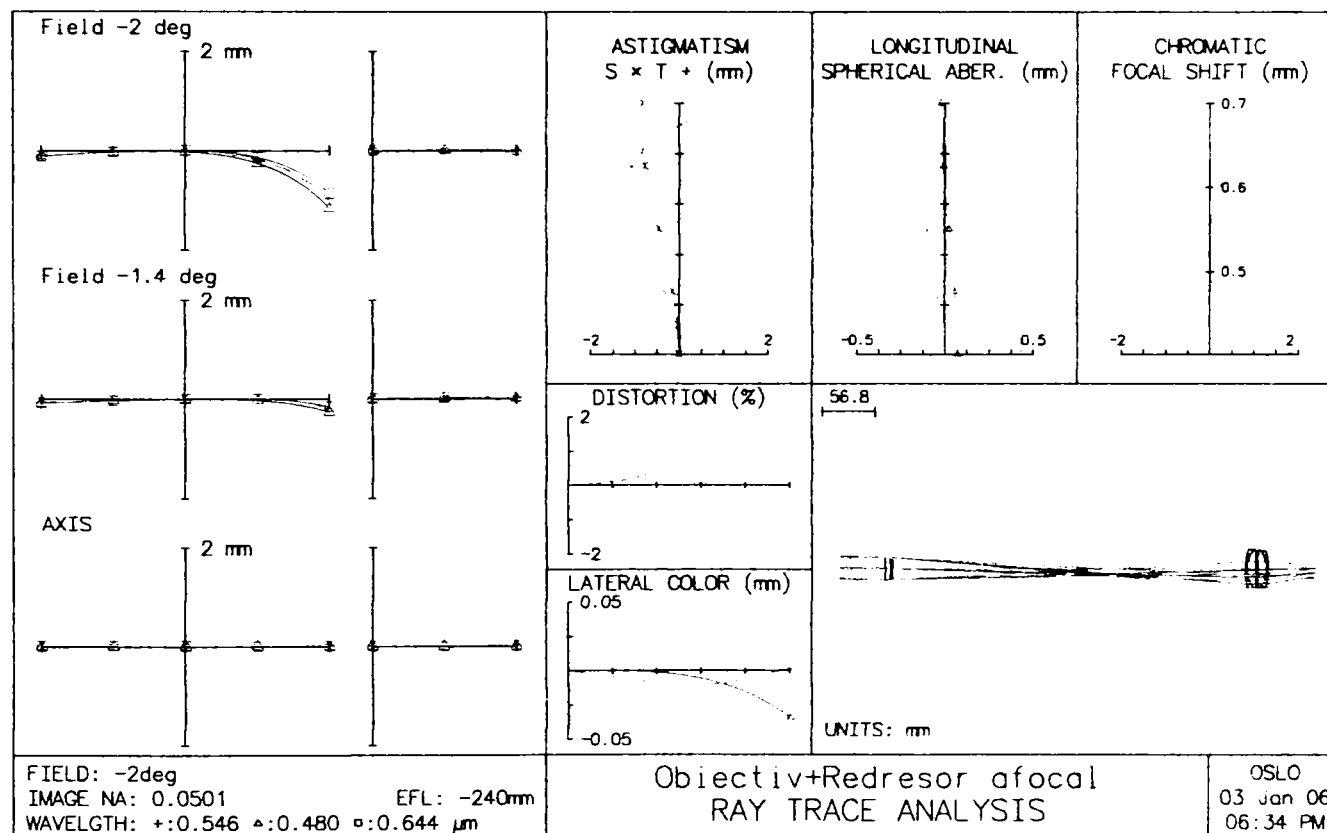


Fig. 4.52 Aberațiile geometrice și cromatice ale ansamblului obiectiv – redresor montat afocal

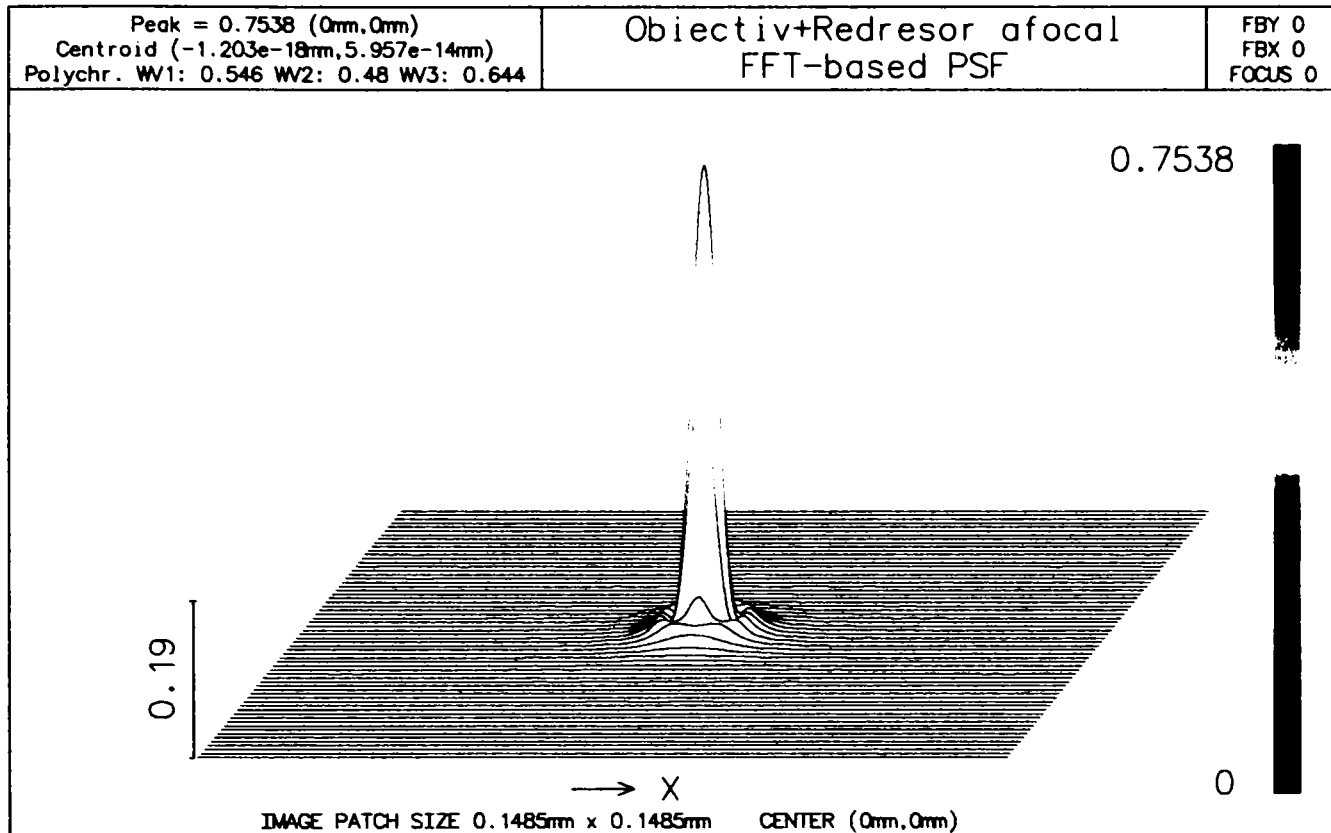


Fig. 4.53 Funcția imagine a punctului pentru ansamblul obiectiv – redresor montat afocal

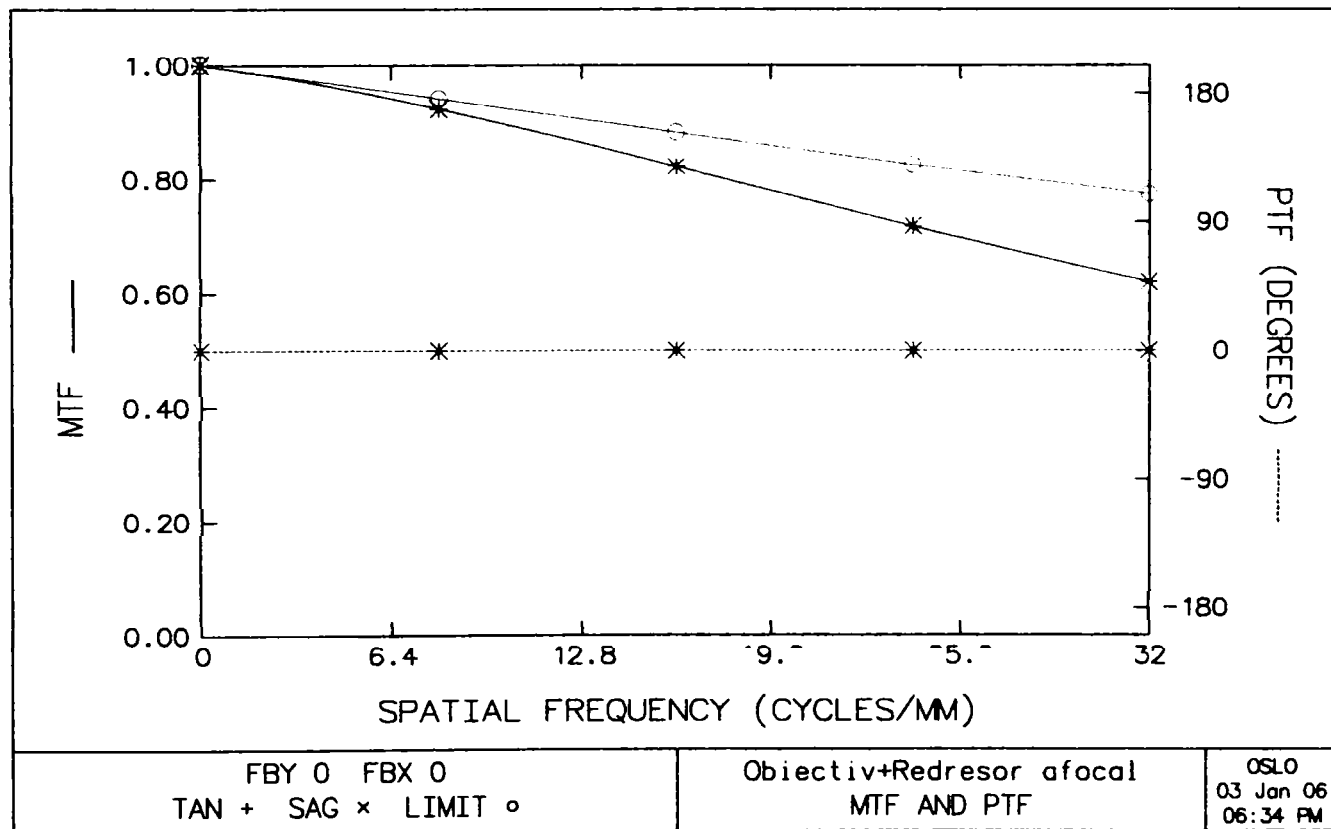


Fig. 4.54 Funcția optică de modulație și de fază pentru ansamblul obiectiv – redresor montat afocal

Singura problemă care se evidențiază pe foaia de date (fig. 4.51) este gabaritul radial al redresorului. Pentru ca sistemul să lucreze cu vignetaie nulă a tubului luminos ar fi necesar ca diametrul redresorului să aibă valoarea $D \sim 40$ mm.

Se poate face un studiu al mărimii vignetaiei și în cazul obținerii unor rezultate nesatisfăcătoare se recurge la soluția introducerii unei lentile de câmp.

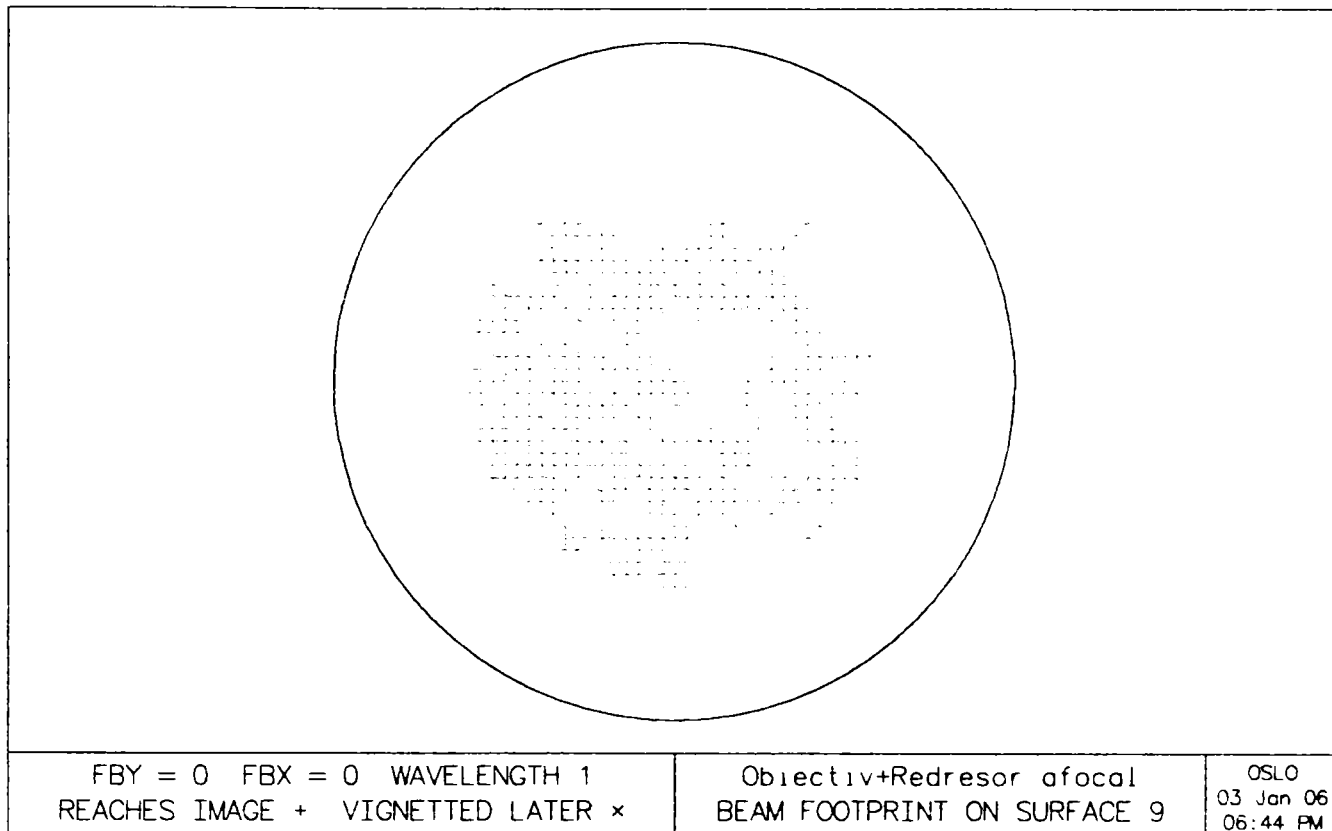
În figura 4.55 este prezentată foaia de date în care diametrul util al redresorului pentru toate lentilele componente s-a impus la valoarea $D = 24$ mm.

Imaginile următoare, prezintă mărimea și poziția fasciculului luminos pe ultimul dioptru al redresorului. În figura 4.56, reprezentarea corespunde razei pupilare principale în coincidență cu axa optică. În acest caz întregul fascicul traversează sistemul.

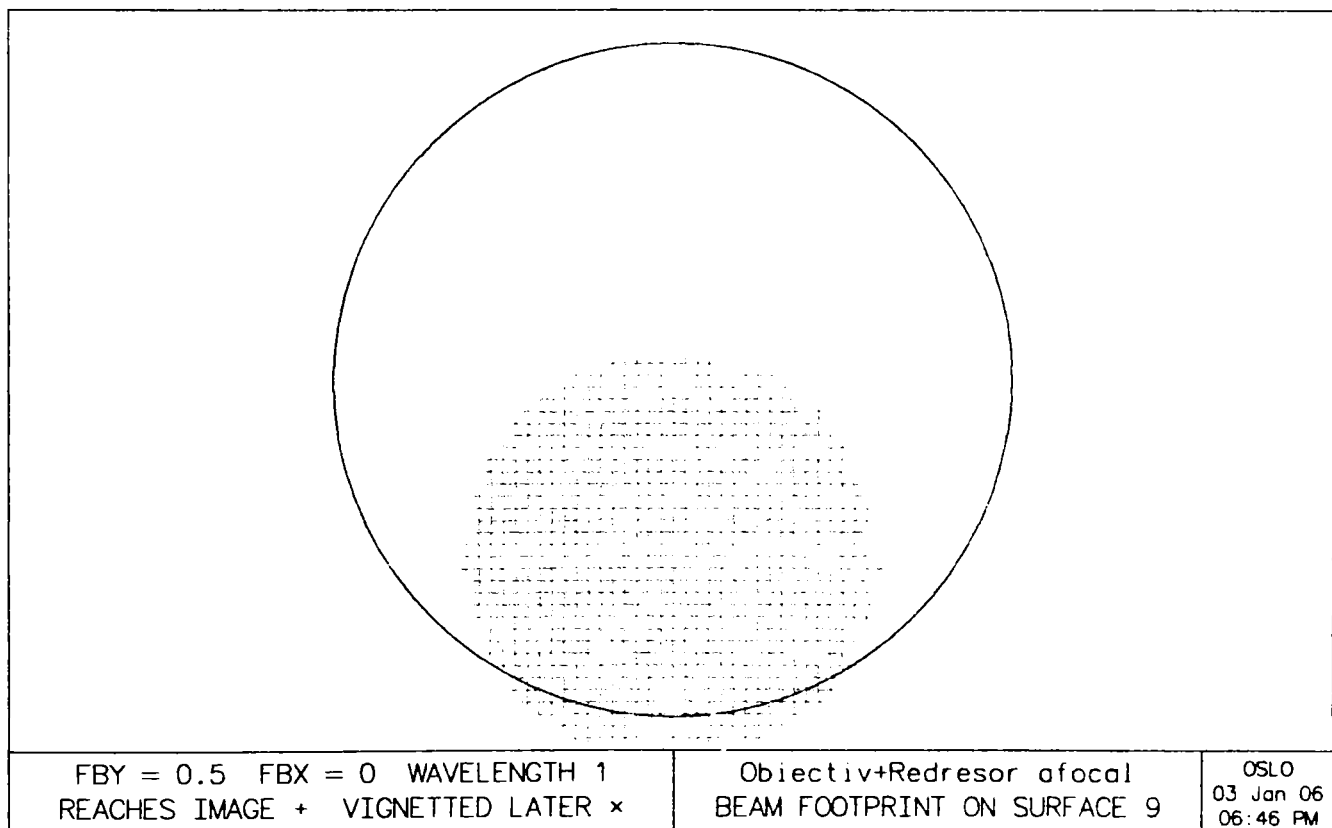
În figura 4.57 este pusă în evidență manifestarea vignetaiei, care apare aproximativ la jumătatea câmpului obiect. Imaginea spotului corespunde unei înclinări a razei pupilare principale $\omega = 1^\circ$.

Surface Data						
Gen	Setup	wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Obiectiv+Redresor afocal						Efl -239.554113
Ent beam radius		12.000000	Field angle	-2.000000	Primary wavln	0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	1.0000e+30	3.4921e+28	AIR		
AST	113.930000	6.000000	12.000000	LAK23	C	
2	-137.500000	2.000000	11.871439	LASF36A	C	
3	981.310000	378.650000	11.844239	AIR		
4	73.540000	1.500000	12.000000	F2	C	
5	32.980000	10.000000	12.000000	K3	C	
6	-337.510000	1.500000	12.000000	AIR		
7	337.510000	10.000000	12.000000	K3	C	
8	-32.980000	1.500000	12.000000	F2	C	
9	-73.540000	0.000000	12.000000	AIR		
IMS	0.000000	144.811418	8.369762	S		

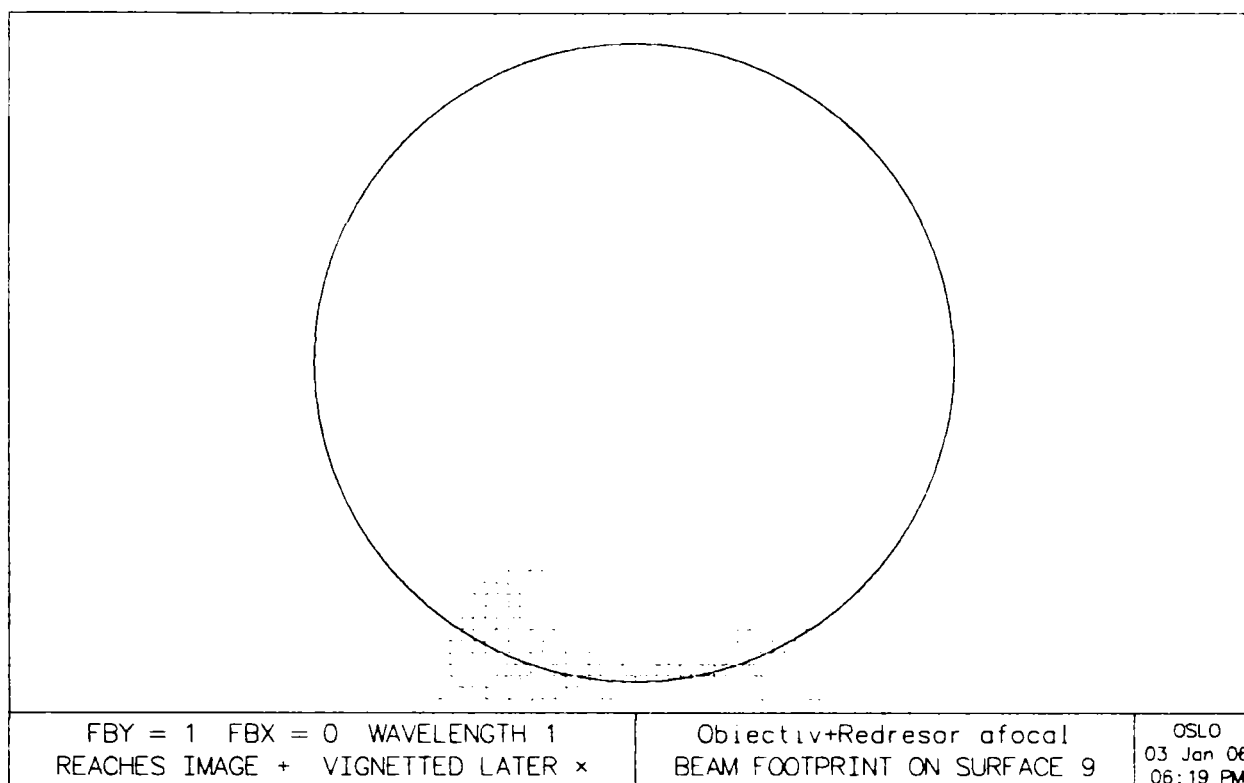
Fig. 4.55 Foaia de date a sistemului obiectiv – redresor montat afocal cu gabarit radial impus în scopul studierii fenomenului de vignetaie



**Fig. 4.56 Pata luminoasă pe ultimul dioptru al redresorului la
îclinarea nulă a razei pupilare principale**



**Fig. 4.57 Vignetarea sistemului obiectiv – redresor montat afocal
la jumătatea câmpului obiect**



**Fig. 4.58 Vignetarea sistemului obiectiv – redresor montat afocal
la marginea câmpului obiect**

Vignetarea sistemului la marginea câmpului obiect, corespunzătoare înclinării razei pupilare principale cu $\omega = 2^\circ$ (fig. 4.58) este de aproximativ 50%.

Se pune problema optării între cele două soluții posibile: acceptarea vignetei care are o valoare rezonabilă, relativ redusă, cu păstrarea calității sau introducerea unei lentile sau dublet de câmp, suplimentar, care diminuează într-o oarecare măsură calitatea imaginii.

În cazul de față se consideră că este rațională acceptarea vignetei în favoarea păstrării calității imaginii, menținerii gabaritului radial redus (convenabil și din punct de vedere al consumului de materiale și manoperă). Vignetarea, în cazul aparatelor de observare, la care receptorul final este ochiul, poate fi, cel puțin parțial compensată prin deplasarea în afara axei optice a pupilei observatorului, astfel încât pierderea de câmp să poată fi recuperată.

Și în acest caz se poate face un studiu al modului de compunere a parametrilor Fourier ai sistemului. În tabelul 4.3 sunt sintetizate caracteristicile subansamblurilor analizate separat, compuse prin regula multiplicării și determinate direct pe sistemul întreg.

Tabelul 4.3

Parametru	Obiectiv	Redresor afocal	Ocular	Luneta	
				teoretic (prin compunere)	real (ca sistem)
RMS OPD	0.0416	0.0787	0.0217	-	0.1001
PSF	0.9398	0.8382	0.9850	0.7759	0.7424
MTF (32 pl/mm)	~0.75	~0.72	~0.78	~0.42	~0.50
SREHL	0.9365	0.8299	0.9841	0.7640	0.7295

Analiza datelor din tabelul 4.3 conduce la concluziile care se impuneau și prin studiul tabelului 4.1 și anume că, pentru sisteme optice compuse din subansambluri limitate la difracție regula multiplicării supraestimează PSF și Strehl într-o mică măsură, dar subestimează într-o măsură care depinde de caz, MTF.

4.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În capitolul 4 sunt tratate probleme legate de sinteza și analiza a două tipuri de redresoare lenticulare:

- redresorul cu conectare în punctele sale antiprincipale
- redresorul montat afocal

Ambele tipuri de redresoare au fost ilustrate numeric prin aplicații ale lunetei terestre bazate pe schema de bază Kepler.

Primul paragraf stabilește parametrii de referință și algoritmul destinat calculului de gabarit al lunetei Kepler. Subansamblurile ocular și obiectiv au rezultat în urma unui demers de proiectare original. Pentru obiectiv s-a ales soluția constructivă dublet acromat, iar pentru ocular s-a optat pentru varianta simetrică a acestuia. Ocularul simetric a fost realizat prin asocierea a două dublete acromate, poziționate simetric, cu lentila convergentă orientată spre interior, la abscisa infinită.

Ambele sisteme proiectate sunt limitate la difracție. Determinarea caracteristicilor de referință, analiza aberațiilor geometrice și cromatice, a frontului de undă și evaluarea parametrilor Fourier s-au realizat cu ajutorul programului specializat, destinat analizei sistemelor optice, OSLO LT (de la Lambda Research Ltd).

S-au analizat în final și caracteristicile lunetei, ca sistem unic, urmărindu-se modul în care se compun parametrii Fourier ai subansamblurilor.

În paragraful 4.2 s-a introdus în schema de bază a lunetei redresorul cu conectare în punctele antiprinipale. Acesta a fost proiectat ca dublet acromat. Problema cea mai dificilă în calculului acestuia se află la nivelul stabilirii datelor de intrare, respectiv al calculului de gabarit. Dificultatea este impusă de o nedeterminare generată de patru parametri interdependenți: distanța focală, număr de deschidere, gabarit radial și extindere axială. Cel mai important dintre aceste patru elemente este distanța focală, care implică determină diametrul util (din condiția de captare a întregului fascicul provenit de la obiectiv) și gabaritul axial (care crește cu 4 distanțe focale ale redresorului). Consecutiv, cunoașterea distanței focale și a deschiderii determină un anumit număr de deschidere, a cărei valoare este hotărâtoare pentru calitatea imaginii. Rezultă că nu se poate găsi o soluție univocă, bazată pe un sistem de ecuații determinat, ci trebuie apelat la un calcul iterativ, condus mai ales de experiența și îndemânarea operatorului.

În lucrare s-a propus un algoritm care impune o valoare minimă acceptabilă pentru numărul de deschidere (2.5...3 în cazul dubletului) și gabarit radial mai mic sau egal cu al obiectivului. Din aceste condiții rezultă imediat puterea redresorului și se pot estima gabaritul axial și calitatea imaginii.

Sinteza dubletului redresor a ridicat, de asemenea, probleme în ceea ce privește calitatea imaginii – aspect oarecum de așteptat datorită numărului de deschidere mic. S-au realizat mai multe sinteze de dublete, cu diverse perechi de sorturi de sticle optice, până la obținerea unei soluții corespunzătoare calitativ.

Analiza de ansamblu a obiectivului și redresorului a pus în evidență valorile reale ale unghiurilor, absciselor și deschiderilor efective. A rezultat că, pentru a nu vigneta fasciculul, redresorul trebuie să aibă un gabarit radial aproape dublu față de obiectiv. În aceste condiții s-a propus introducerea în schemă a unei lentile de câmp, care a fost proiectată ca lentilă de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice. Prezența lentilei de câmp rezolvă problema vignetații, respectiv a gabaritului radial, dar conduce la o scădere a calității imaginii. Autorul a propus înlocuirea lentilei de câmp singulare cu un dublet acromat având rolul de lentilă de câmp. În acest mod, sistemul a redevenit limitat la difracție pe ansamblul său.

Introducerea redresorului și a lentilei de câmp au permis reluarea problemei compunerii parametrilor Fourier, în condițiile în care sistemul conține și o componentă care nu este limitată la difracție. Analiza întreprinsă a condus la

următoarele concluzii:

- sistemele formate din subansambluri limitate la difracție sunt, ca ansamblu, limitate la difracție. În acest caz, regula compunerii prin multiplicare conduce la valori care supraestimează într-o măsură ne semnificativă PSF și Strehl, dar subestimează substanțial MTF
- în cazul existenței unei componente care nu este limitată la difracție, parametrii Fourier ai sistemului nu sunt dictați de calitatea slabă a componentei respective. Influența sa este mult mai puțin semnificativă decât este estimată prin regula multiplicării. Sistemul analizat, format din trei subansambluri limitate la difracție și o lentilă singulară, a rămas de foarte bună calitate (între RL4 și RL2). Rezultă că, în general, este necesară analiza fiecărei aplicații particulare și estimarea pe întreg sistemul optic a parametrilor Fourier, pentru a obține rezultate de încredere. De asemenea, se poate conchide că regula multiplicării are, cel mult un caracter informativ și numai în cazul în care toate subansamblurile sunt limitate la difracție.

În ultimul paragraf al capitolului este tratat redresorul cu conectare afocală.

Proiectarea acestuia ridică probleme similare celui analizat anterior. Determinarea puterii subansamblului redresor nu este posibilă dintr-o ecuație univocă bazată pe formularea unei singure condiții geometrice. Interdependența putere – număr de deschidere – gabarit radial și axial face și mai dificilă proiectarea redresorului, având în vedere faptul că acesta este un sistem compus din două dublete. Autorul a utilizat același algoritm de predimensionare a redresorului ca și în primul caz (a impus numărul de deschidere și gabaritul radial). A urmat sinteza unui dublet cu focala dublă față de cea a redresorului. Acesta a rezultat prin asocierea a două dublete, simetric așezate și separate cu un strat subțire de aer. Analiza redresorului a relevat caracterul limitat la difracție al acestuia.

Includerea redresorului în ansamblul schemei optice a aparatului a permis determinarea caracteristicilor finale și efective de câmp, deschidere, focalizare. Analiza întregului sistem evidențiază un gabarit radial efectiv al redresorului mai mare decât cel admis ca maxim. Se pune problema analizei iluminării în planul imagine și a stabilirii oportunității introducerii unei lentile de câmp și în acest caz. Se constată că vignetarea fasciculului la nivelul ultimului dioptru al redresorului este suficient de scăzută pentru a fi admisă și se preferă acceptarea unei micșorări

relative a câmpului (care poate fi compensată prin mici deplasări ale ochiului observatorului în afara axei optice) în favoarea menținerii unei calități foarte ridicate a întregului sistem.

În final este analizată și această structură din punct de vedere al compunerii parametrilor Fourier și rezultă concluziile enunțate anterior.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot formula următoarele:

- proiectarea unei lunete Kepler originale, cu calitate a imaginii foarte bună
- propunerea unor algoritmi de calcul al subansamblului redresor, având la bază un criteriu geometric (diametrul util) și un criteriu de calitate (numărul de deschidere minim la care dubletul poate fi limitat la difracție)
- proiectarea unui sistem de redresare cu conectare în punctele antiprinicipale, limitat la difracție
- proiectarea lentilei de câmp, respectiv a dubletului cu rol de lentilă de câmp în scopul reducerii diametrului fasciculului luminos
- sinteza sistemului de redresare cu conectare afocală
- analiza tuturor soluțiilor sintezei cu ajutorul programului specializat OSLO LT, care a indicat calitatea foarte ridicată a tuturor sistemelor discutate în prezentul capitol
- analiza critică a relației de compunere a parametrilor Fourier (MTF, PSF, Strehl) pentru sisteme optice complexe și concluzii practice privind asocierea subansamblurilor cu diverse caracteristici de calitate

BIBLIOGRAFIE: [C6, C7, G3, G7, G9, G10, J1, K1, N2, N5, N6, O1, O2, P3, R1, R2, S5, S6]

5. APLICAȚII ALE REDRESOARELOR LENTICULARE LA APARATE CU DISTANȚĂ OBIECT FINITĂ

5.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Aparatele de măsurare, de tipul microscopului sau lunetei de măsurare, trebuie să furnizeze imagini drepte, ale unor obiecte care se află la distanțe variabile – într-un anumit interval – față de obiectiv. În același timp aceste aparate trebuie să asigure o mărire liniară constantă, independentă de abscisa obiect, astfel încât citirea pe reticulele gradate atașate în planul obiect al ocularului sau proiectate pe un ecran de vizualizare să fie corecte.

Cele două deziderate descrise mai sus sunt îndeplinite prin introducerea în schema optică a aparatului a unui redresor afocal. Redresorul, prin funcția sa de bază, inversează poziția imaginii. Varianta sa afocală asigură valoarea unitară a măririi liniare, indiferent de poziția obiectului într-un interval de abscise dat.

Varianta afocală a redresorului format din două dublete presupune montarea afocală a acestora și conectarea la obiectiv și ocular în punctele antiprinicipale ale sistemului redresor. Aceste puncte coincid, de fapt cu focarele celor două dublete componente (fig. 5.1).

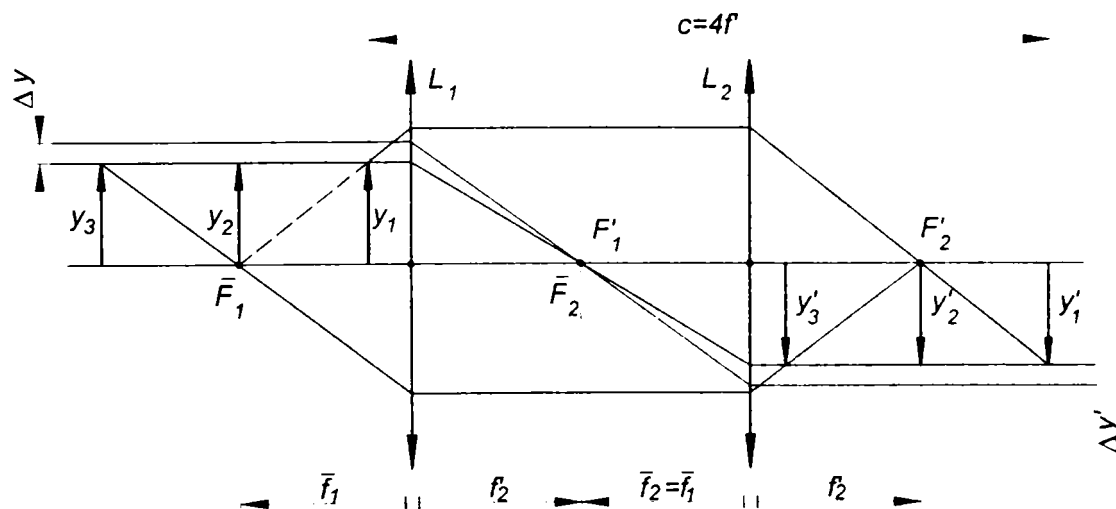


Fig. 5.1. Schema optică a redresorului afocal

Cele mai importante caracteristici constructive și optice ale redresorului afocal pot fi rezumate astfel:

□ schema optică a redresorului conține două dublete identice, plasate simetric și montate afocal (distanța dintre ele este $2s'_F$, iar intervalul optic Δ este nul)

□ obiectul trebuie așezat la o abscisă corespunzătoare frontifocalei dubletului singular. Această abscisă coincide, de fapt, cu punctul antiprincipal obiect al redresorului de putere zero:

$$\frac{1}{f'_R} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{f'} - \frac{2f'}{f'^2} = 0, \quad (5.1)$$

□ datorită caracterului afocal, redresorul asigură o mărire liniară constantă, unitară și negativă (o rază paralelă cu axa optică, emergentă la înălțimea h pe primul dublet va trece întotdeauna prin focarul comun al dubletelor și va emerge din sistem paralel cu axa optică la aceeași înălțime de incidență, de partea opusă a axei optice, $-h$)

□ din cele de mai sus rezultă că mărirea liniară a sistemului obiectiv – redresor este independentă de mărimea obiectului (creșterea $\Delta y'_{ob}$ a imaginii intermediare date de obiectiv și creșterea $\Delta y'_R$ a imaginii formate de redresor sunt egale în modul)

□ redresorul afocal permite formarea imaginii intermediare date de obiectiv într-un anumit interval, fără a afecta grosimentul aparatului.

5.2. APLICAȚIE A REDRESORULUI AFOCAL ÎN CONSTRUCȚIA MICROSCOAPELOR DE MĂSURARE

Pentru studiul proprietăților și a condițiilor în care pot funcționa redresoarele afocale se propune abordarea unei aplicații concrete, referitoare la un microscop de măsurare.

Pentru calculul de gabarit al acestuia se consideră următorii parametrii:

- grosimentul $\Gamma = 25X$
- lungimea tubului $L = 150 \text{ mm}$
- abscisa obiect raportată la focarul obiectivului $z = -10 \text{ mm}$.
- valoarea liniară a diviziunii scalei $l = 0.87 \text{ mm/div}$.

Agoritmul de calcul necesită determinarea următoarelor elemente:

distanța focală a obiectivului:

$$f'_{ob} = \frac{(\Gamma + 250) + \sqrt{(\Gamma z + 250)^2 - 4\Gamma Lz}}{2\Gamma}, \quad (5.2)$$

intervalul optic:

$$\Delta = -\frac{f'^2_{ob}}{z}, \quad (5.3)$$

mărirea liniară a obiectivului:

$$\beta_{ob} = -\frac{\Delta}{f'_{ob}}, \quad (5.4)$$

grosimentul ocularului:

$$\Gamma_{oc} = \frac{\Gamma}{\beta_{ob}}, \quad (5.5)$$

câmpul liniar obiect al microscopului:

$$2y = 3l, \quad (5.6)$$

câmpul liniar al ocularului:

$$2y' = 2y\beta_{ob}, \quad (5.7)$$

abscisa obiect:

$$a = \frac{(1 - \beta_{ob})f'_{ob}}{\beta_{ob}}, \quad (5.8)$$

câmpul unghiular obiect al obiectivului:

$$2\omega = 2\arctg \frac{2y}{2|z|}, \quad (5.9)$$

diametrul util al obiectivului:

$$D_{ob} = 2f'_{ob} \operatorname{tg} \omega, \quad (5.10)$$

apertură numerică:

$$A = \frac{D_{ob}}{2a}, \quad (5.11)$$

- diametrul util al ocularului:

$$D_{oc} = 2 \left[\frac{D_{ob}}{2} - (f'_{ob} + \Delta + f'_{oc}) \operatorname{tg} \left(\frac{\frac{D_{ob}}{2} - y}{a} + \frac{\frac{D_{ob}}{2}}{f'_{ob}} \right) \right] \quad (5.12)$$

- diametrul diafragmei de câmp:

$$D_{DC} = 2y\beta_{ob}, \quad (5.13)$$

- abscisa pupilei de ieșire:

$$s'_{p'} = -\frac{f_{ob}^2}{-(f'_{ob} + \Delta)} + s'_{F'_{oc}}, \quad (5.14)$$

- diametrul pupilei de ieșire:

$$D'_{p'} = \beta_p D_{ob}. \quad (5.15)$$

Pentru efectuarea calculului de gabarit al microscopului s-a realizat o aplicație folosind mediul de programare Visual Basic. În modulul Form s-au utilizat casete de text pentru introducerea datelor și citirea rezultatelor și două butoane de comandă, pentru calcul și, respectiv, ieșirea din program.

Modulul Form, intitulat "Microscopul de măsurare – calcul de gabarit" este prezentat în figura 5.2. În Anexa 5.1 este redat conținutul codului programului.

Captura de ecran din figura 5.2 surprinde interfața grafică a programului după execuția codului pentru datele de intrare enunțate la începutul paragrafului. În partea dreaptă, pot fi vizualizate rezultatele calculului de gabarit al microscopului:

$$f_{ob} \sim 40 \text{ mm}$$

$$f_{oc} \sim 40 \text{ mm}$$

$$\Delta \sim 150 \text{ mm}$$

$$2y = 2.6 \text{ mm}$$

$$2y' = 10.2 \text{ mm}$$

$$2\omega = 7.4^\circ$$

$$2\omega' = 7.4^\circ$$

$$D_{u_{ob}} = 10 \text{ mm}$$

$$D_{u_{oc}} = 14 \text{ mm}$$

$$A = 0.1$$

$$D_{DC} = 10 \text{ mm}$$

$$\beta_{ob} \sim -3.9:1$$

$$\Gamma_{oc} = 6.4 \times$$

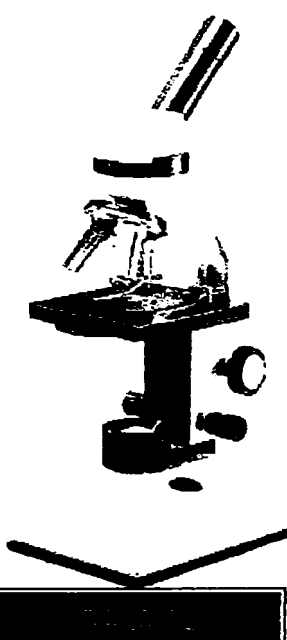
DATE DE INTRARE		DATE CALCULATE	
Gamma	25	f' obiectiv	38.7
Lungimea L	150	f' ocular	39.1
Abscisa z	-10	de ta	149.8
		campul liniar obiect	2.6
		campul liniar imagine	10.2
		campul unghiular obiect	7.4
		campul unghiular imagine	7.4
		D util obiectiv	10
		D util ocular	14.2
		apertura numerica	0.1
		diametrul diafragmei de camp	10.1
		beta obiectiv	-3.9
		gamma ocular	6.4
		EXIT	

Fig. 5.2. Modulul Form al programului destinat calculului de gabarit al microscopului de măsurare

Având în vedere puterea și deschiderea obiectivului se apreciază că este adecvată alegerea variantei dublet acromat ca soluție constructivă pentru acest subansamblu.

S-a realizat sinteza unui dublet cu datele de intrare:

$$f' = 40 \text{ mm}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$s = -55 \text{ mm.}$$

Perechea de sorturi de sticle utilizată a fost LaK23-LaSF36A.

Sinteza dubletelor a fost prezentată în paragraful 3.3. Dubletul rezultat a fost

analizat cu programul OSLO. În figura 5.3 este redată foaia de date și parametrii de calitate ai obiectivului.

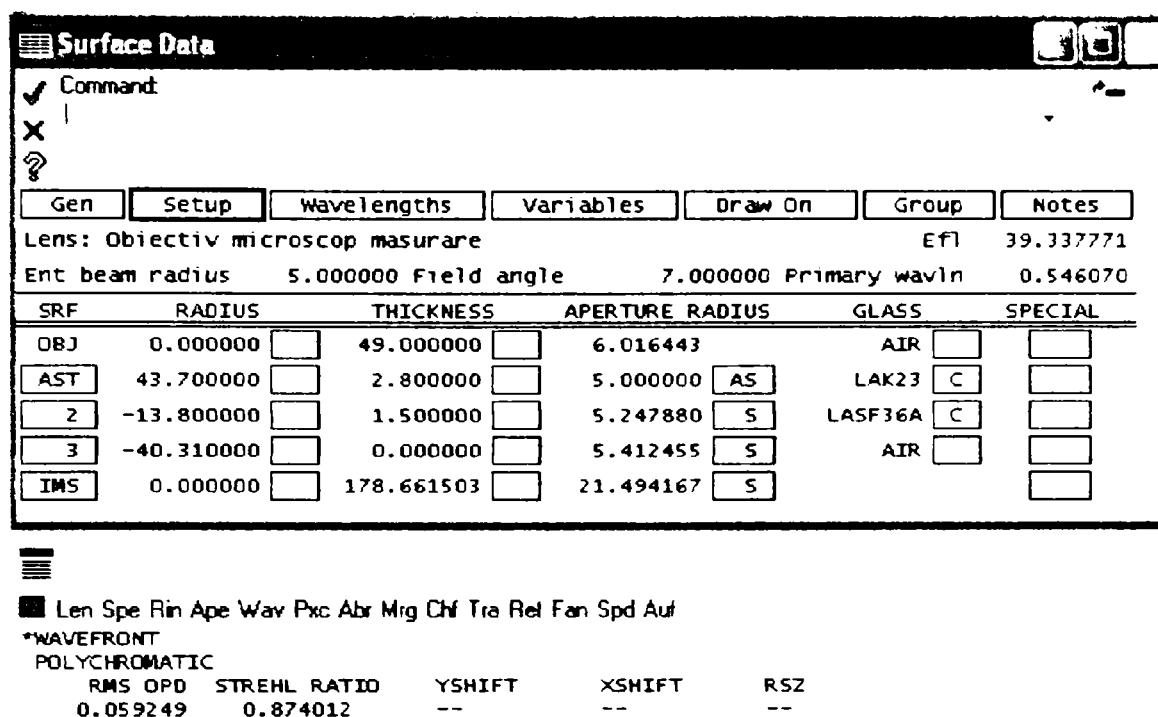


Fig. 5.3. Foaia de date și parametrii de calitate a imaginii pentru obiectivul microscopului

Pentru mărirea liniară $\beta_{ob} = -4:1$ estimată prin calculul de gabarit, abscisa obiect trebuie să fie $s = z - f_{ob} = -49$ mm (fig.5.2). La deschiderea de 10 mm și unghiul de câmp de 14° , rezultă un câmp liniar obiect de ~ 12 mm, date care concordă cu cele determinate din calculul de gabarit.

În tabelul 5.1 este prezentat un studiu al variației abscisei imaginii intermediare și a măririi liniare a obiectivului.

Se observă că abscisa imagine și mărirea liniară variază tot mai accentuat pe măsură ce abscisa obiect se apropie de focală. Având în vedere datele impuse microscopului se va admite domeniul de lucru al acestuia pentru $s = -[48...50]$ mm, iar abscisa imagine de referință pentru studiul redresorului va fi $s' = 178.66$ mm, corespunzătoare poziției obiectului la $s = -49$ mm.

Pentru redresor s-au proiectat două dublete cu $f' = 100$ mm și $s'_F = 97.3$ mm. Acestea au fost montate afocal, cu distanța de 190 mm între ele. Spațiul dintre dublete diferă ușor de suma focalelor datorită grosimilor finite, impuse de

deschiderile necesare.

Tabelul 5.1

s [mm]	s' [mm]	β_{ob} [-]
45	258.84	-5.61
46	231.29	-4.91
47	209.85	-4.36
48	192.69	-3.92
49	178.66	-3.57
50	166.96	-3.27
51	157.05	-3.02
52	148.57	-2.80
53	141.21	-2.62
54	134.77	-2.45
55	129.09	-2.31
56	124.04	-2.45
57	119.52	-2.06
58	115.45	-1.96
59	111.77	-1.87
60	108.42	-1.78

Redresorul afocal ca subansamblu de sine stătător este analizat pe baza foii de date din figura 5.4.

The screenshot shows the 'Surface Data' window for a lens system. The title bar reads 'Surface Data'. Below the title bar are icons for checkmark, X, and question mark. A menu bar includes 'Gen', 'Setup', 'Wavelengths', 'Variables', 'Draw On', 'Group', and 'Notes'. The main text area displays: 'Lens: Redresor afocal microscop', 'Efl -3.4791e+03', 'Ent beam radius 5.000000', 'Field angle -3.300000', and 'Primary wavln 0.546070'. A table lists surface data:

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	97.280000	5.609130	AIR	
AST	49.360000	1.500000	5.000000	F2	AS
2	22.130000	2.500000	5.042338	K3	S
3	-226.520000	190.000000	5.156592	AIR	S
4	226.520000	10.000000	16.107497	K3	S
5	-22.130000	1.500000	16.243237	F2	S
6	-49.360000	0.000000	16.332635	AIR	S
IMS	0.000000	97.290830	5.659031		S

At the bottom, there are checkboxes for 'Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mirr Chf Tra Ref Fan Spd Aut Ope'. Below that, the text '*WAVEFRONT POLYCHROMATIC' is followed by a table of quality metrics:

RMS OPD	STREHL RATIO	YSHIFT	XSHIFT	RSZ
0.054524	0.888573	--	--	--

Fig. 5.4. Foaia de date și parametrii de calitate ai redresorului afocal

Se observă că abscisele obiect și imagine sunt egale între ele și egale cu frontifocalele imagine ale dubletelor componente.

Din foaia de date rezultă caracterul afocal al sistemului și o foarte bună corecție a aberațiilor (sistemul este limitat la difracție). Această proprietate este foarte utilă în realizarea sistemelor optice ale aparatelor de măsurare.

Având în vedere domeniul acceptat pentru poziția obiectului în spațiul din fața obiectivului, urmează să se verifice calitatea redresorului. S-au realizat simulări ale absciselor obiect ale redresorului într-un domeniu de 10 mm în fața și, respectiv, în urma poziției de referință din figura 5.4, poziție pentru care $s_R = -s'_R = -97.28$ mm.

În tabelul 5.2 sunt prezentate datele obținute din simulări. Pentru fiecare caz s-a determinat mărirea liniară corespunzătoare perechii de abscise.

În figura 5.5 s-a reprezentat grafic variația $s'(s)$, care, după cum se observă este practic o dreaptă.

Analiza datelor din tabelul 5.2 și studiul graficului din fig.5.5 indică o simetrie perfectă a absciselor și variații egale dar de sens contrar ale acestora.

Mărirea liniară este practic constantă, negativă și egală cu unitatea, ceea ce reprezintă o verificare numerică a proprietăților redatate grafic în figura 5.1.

Tabelul 5.2

s [mm]	s' [mm]	β_R [-]
87	107.72	-1.005
88	106.71	-1.006
89	105.69	-1.006
90	104.68	-1.006
91	103.67	-1.007
92	102.65	-1.007
93	101.64	-1.007
94	100.62	-1.007
95	99.61	-1.008
96	98.59	-1.008
97	97.57	-1.008
98	96.55	-1.009
99	95.53	-1.009
100	94.52	-1.009
101	93.50	-1.009
102	92.48	-1.010
103	91.46	-1.010
104	90.44	-1.010
105	89.41	-1.011
106	88.39	-1.011
107	87.37	-1.011

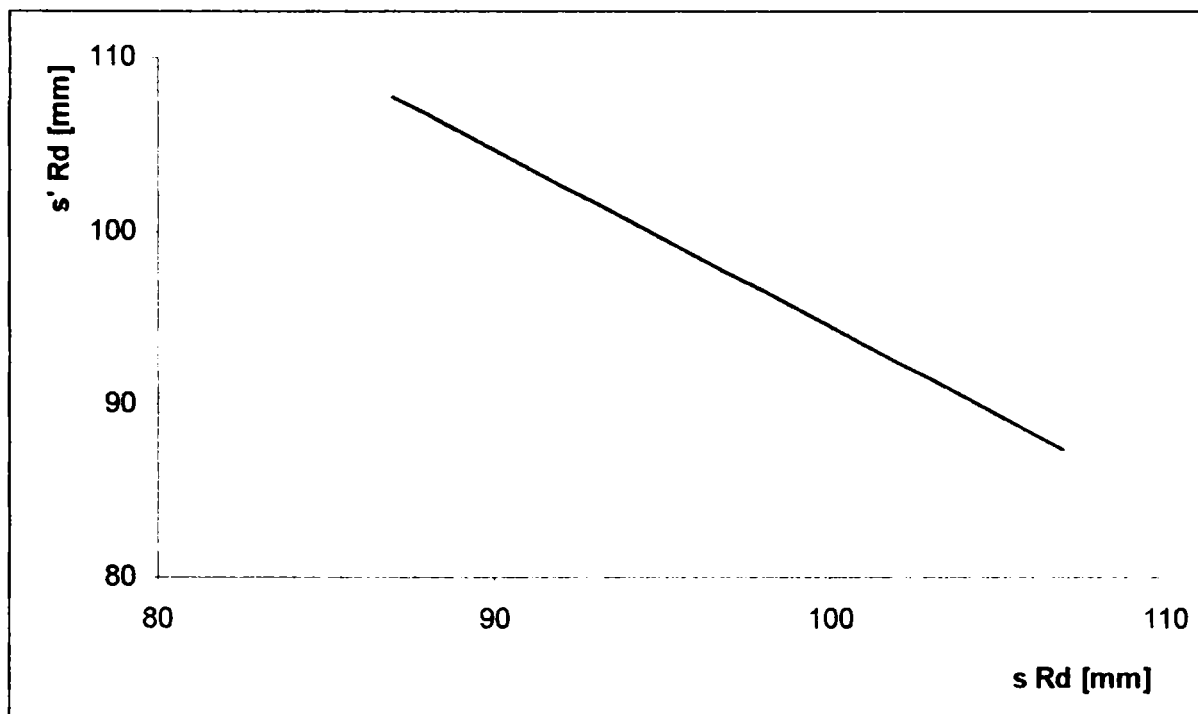


Fig. 5.5. Variația absciselor imagine funcție de abscisele obiect ale redresorului afocal

Este necesară o verificare a funcționării de ansamblu a obiectivului și redresorului, pentru stabilirea deschiderilor exacte ale componentelor.

În figura 5.6 este prezentată foaia de date a ansamblului obiectiv – redresor afocal. Schema optică a sistemului poate fi urmărită în figura 5.7.

Se observă că subansamblurile au fost corect proiectate. La conectarea lor, pentru abscisa obiect $s = -49$ mm impusă obiectivului, rezultă o abscisă imagine a redresorului $s' = 97.24$ mm = s'_F a sistemului redresor.

Datorită deschiderilor mari, care impuneau creșterea grosimilor până la modificarea parametrilor de referință ai redresorului, s-a considerat oportună micșorarea deschiderii obiectivului la 8 mm și a unghiului de câmp la 5.5° . Chiar în aceste condiții, se păstrează caracteristicile impuse microscopului (grosiment $\sim 25X$, câmp liniar obiect ~ 5 mm).

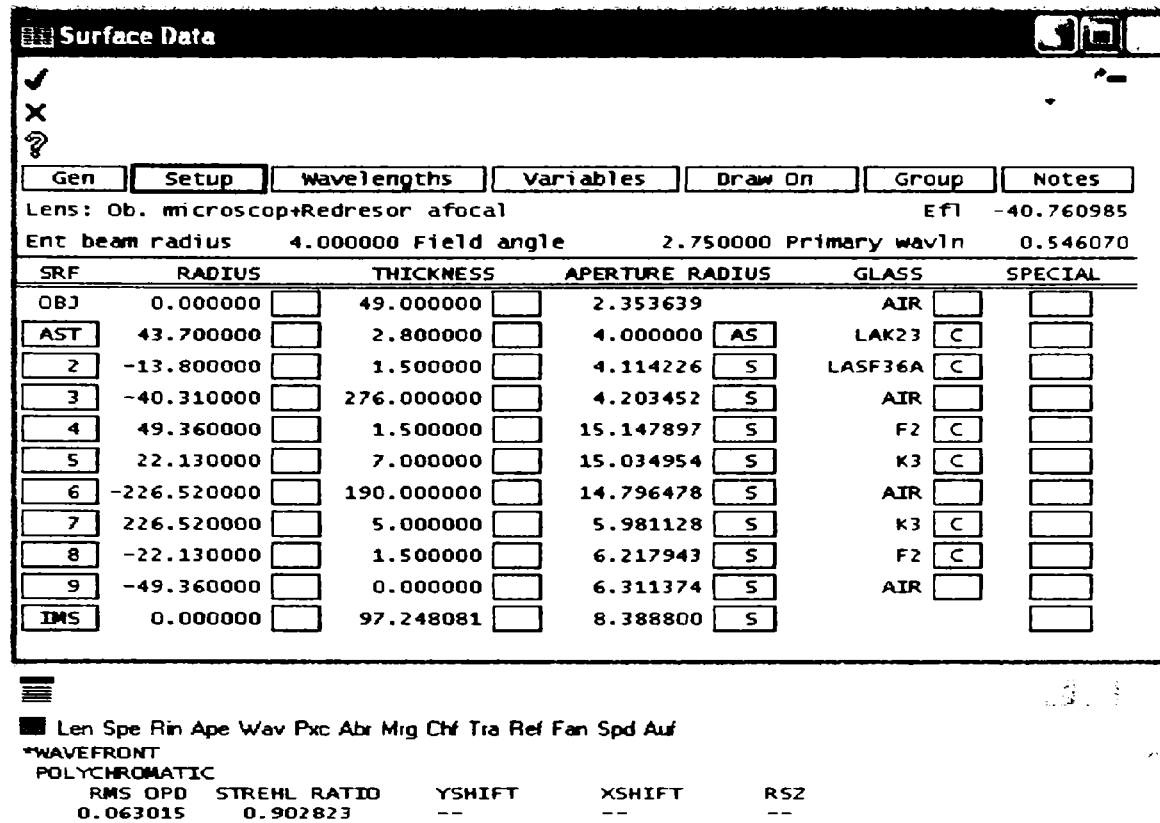


Fig. 5.6. Foaia de date și parametri de calitate ai sistemului obiectiv – redresor afocal

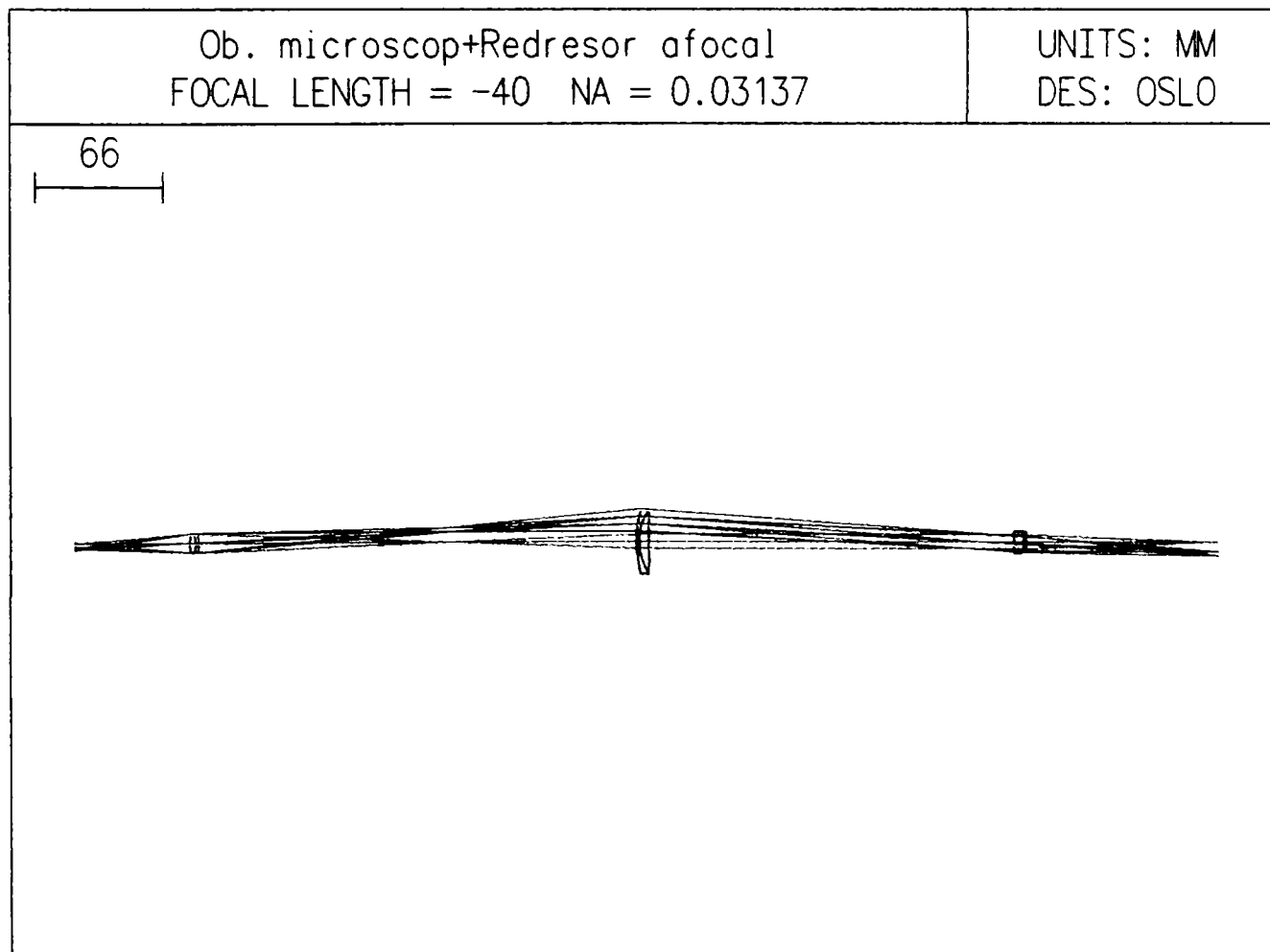


Fig. 5.7. Schema optică a sistemului obiectiv – redresor afocal

Soluția analizată permite o variație a poziției imaginii intermediare formate de obiectiv, dar presupune și o variație a abscisei imagine a redresorului. Aceasta trebuie să coincidă cu planul focal obiect al ocularului și, ca urmare, ar fi necesară și deplasarea acestuia în raport cu redresorul.

O soluție pentru evitarea deplasării ocularului, respectiv a gabariturii axial variabil al instrumentului ar fi realizarea redresorului într-o variantă zoom, la care primul dublet să fie mobil după o lege care depinde de abscisa obiect.

Schema unui astfel de redresor este prezentată în figura 5.8. Sistemul derivă din redresorul afocal și presupune valori finite mici, pozitive sau negative, ale intervalului optic. Variațiile mici ale distanței dintre dublete în raport cu valoarea inițială nu modifică decât în mică măsură caracterul afocal al redresorului, iar mărirea liniară a acestuia rămâne practic constantă și egală cu unitatea.

Pentru verificarea funcționării redresorului cu interval optic variabil (fig. 5.8) s-au făcut simulări ale poziției obiectului în poziția de referință $s = -49$ mm (fig. 5.6) și în pozițiile deplasate $s = -48$ mm (fig. 5.9) și $s = -50$ mm (fig. 5.10).

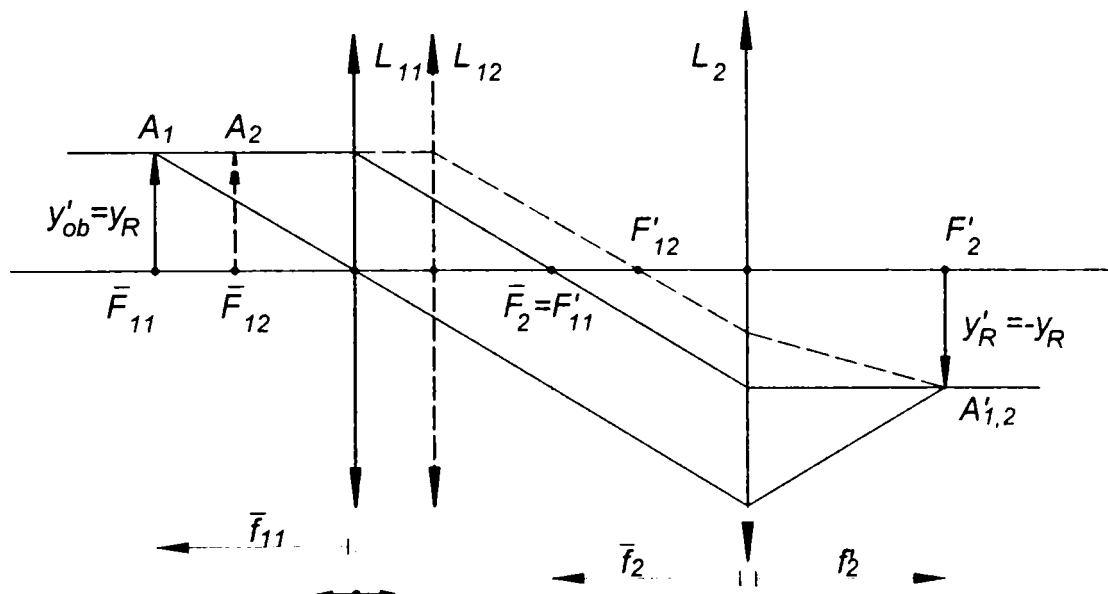


Fig. 5.8. Schema optică a redresorului cu interval optic variabil

În tabelul 5.3 sunt sintetizate datele introduse și rezultatele simulărilor. Sunt evidențiate: abscisa imagine obiect a obiectivului s_{ob} , abscisa imaginii intermediare formate de obiectiv s'_{ob} , abscisa obiect a redresorului s_R , distanța dintre obiectiv și redresor $s'_{ob} + s_R$, abscisa imagine a redresorului s'_R , distanța dintre dubletele

redresorului și mărirea liniară totală a sistemului obiectiv – redresor $\beta_{ob}\beta_R$.

Gen	Setup	wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Ob. microscop+Redresor afocal						Efl -32.837272
Ent beam radius 4.000000						Field angle 2.750000
						Primary wavln 0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	48.000000	2.305605	AIR		
AST	43.700000	2.800000	4.000000	LAK23	AS	
2	-13.800000	1.500000	4.117075	LASF36A	S	
3	-40.310000	290.000000	4.207739	AIR	S	
4	49.360000	1.500000	15.636632	F2	S	
5	22.130000	5.000000	15.516465	K3	S	
6	-226.520000	176.000000	15.327826	AIR	S	
7	226.520000	5.000000	5.115356	K3	S	
8	-22.130000	1.500000	5.381182	F2	S	
9	-49.360000	0.000000	5.479137	AIR	S	
IMS	0.000000	97.352506	9.060024		S	

Fig. 5.9. Foai de date a sistemului obiectiv – redresor la abscisa
obiect $s = -48$ mm

Gen	Setup	wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Ob. microscop+Redresor afocal						Efl -48.231658
Ent beam radius 4.000000						Field angle 2.750000
						Primary wavln 0.546070
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	50.000000	2.401672	AIR		
AST	43.700000	2.800000	4.000000	LAK23	AS	
2	-13.800000	1.500000	4.111492	LASF36A	S	
3	-40.310000	264.000000	4.199337	AIR	S	
4	49.360000	1.500000	14.737418	F2	S	
5	22.130000	5.000000	14.630725	K3	S	
6	-226.520000	202.000000	14.476405	AIR	S	
7	226.520000	5.000000	6.515033	K3	S	
8	-22.130000	1.500000	6.729968	F2	S	
9	-49.360000	0.000000	6.819472	AIR	S	
IMS	0.000000	97.613579	7.862549		S	

Fig. 5.10. Foai de date a sistemului obiectiv – redresor la abscisa
obiect $s = -50$ mm

Tabelul 5.3

S_{ob} [mm]	S'_{ob} [mm]	S_R [mm]	$S'_{ob}+S_R$ [mm]	S'_R [mm]	d [mm]	$\beta_{ob}\beta_R$ [-]
- 48	192.69	97.3	290	97.3	76	3.92
- 49	178.66	97.3	276	97.3	190	3.57
- 50	16.96	97.3	264	97.6	202	3.27

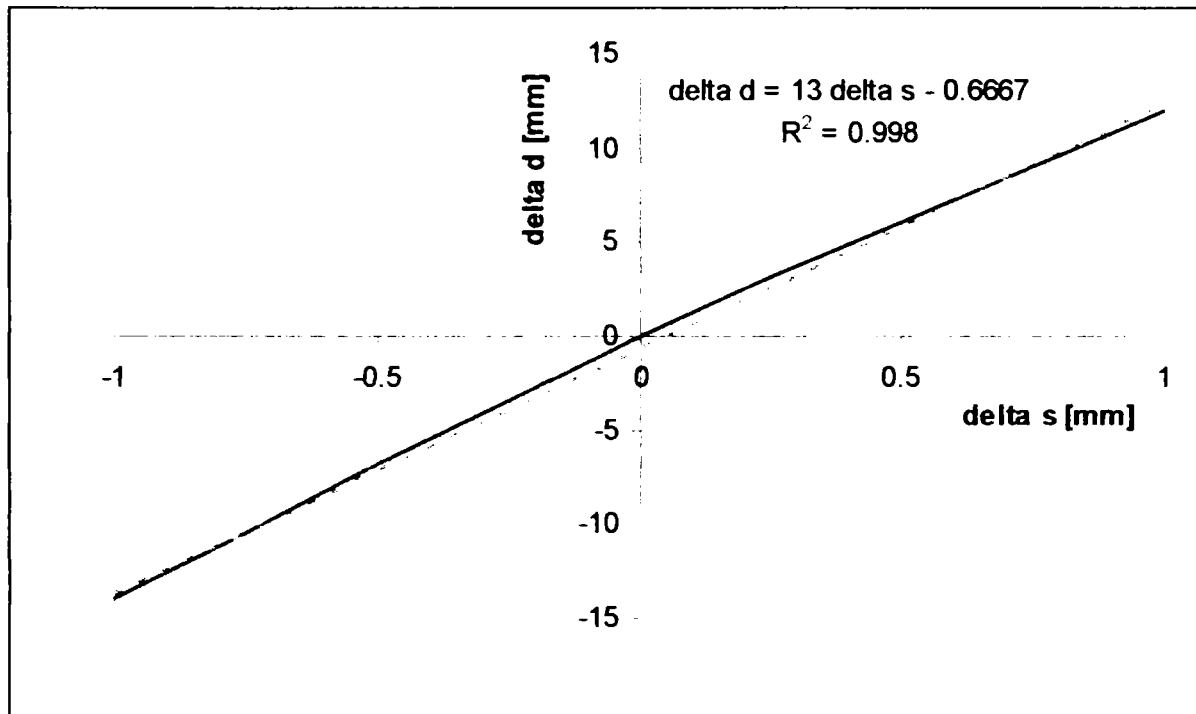


Fig. 5.11. Variația distanței dintre dublete funcție de abscisa obiect a obiectivului

În figura 5.11 este reprezentată variația distanței dintre dublete funcție de abscisa obiect a obiectivului, variație care descrie de fapt legea de deplasare a primului dublet.

Pe figură este înscrisă și ecuația dreptei de interpolare:

$$\Delta d = 13 \Delta s - 0.6667, \quad (5.16)$$

care aproximează foarte bine variația studiată (factorul de autocorelație a variabilelor este $R = \sqrt{0.998} \cong 0.998$).

5.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În capitolul 5 al tezei sunt cercetate posibilitățile de proiectare și proprietățile redresorului afocal. Acesta este constituit din două dublete identice și simetrice, plasate astfel încât intervalul optic al subansamblui să fie nul. Conectarea

redresorului în schema de bază se realizează, de asemenea, afocal, prin impunerea suprapunerii planelor focale ale subansamblului cu planele focale ale sistemelor obiectiv și, respectiv, ocular.

Redresorul afocal are proprietatea de a asigura mărirea liniară constantă la variații ale abscisei obiect de $\pm f'$ în jurul planul focal. Mărirea liniară este constantă și în raport cu înălțimea obiectului.

Studiul proprietăților redresorului afocal s-a realizat printr-o aplicație numerică orientată spre un exercițiu de proiectare a unui *microscop de măsurare*.

Pentru dezvoltarea aplicației a fost necesar, ca prim pas, calculul de gabarit al microscopului. Acest calcul, relativ laborios și iterativ, se pretează la automatizare, astfel încât s-a considerat utilă înlocuirea unui program de calcul. S-a realizat o aplicație *Visual Basic*. Forma executabilă a programului necesită introducerea datelor de intrare (grosimentul microscopului, intervalul optic – care nu este standardizat în acest caz –, abscisa obiect raportată la focar și mărimea diviziunii) și furnizează elementele de gabarit ale sistemului (puteri, deschideri, mărimi ale câmpurilor).

Caracteristicile obiectivului permit alegerea unei soluții constructive de tip dublet. Acesta a fost proiectat și a rezultat un sistem de foarte bună calitate, limitat la difracție.

Pentru construcția redresorului s-au utilizat dubletele proiectate în capitolul 4 pentru redresorul cu conectare afocală. Analiza subansamblului redresor a evidențiat și caracterul limitat la difracție al acestuia.

S-au verificat prin simulări numerice proprietățile redresorului afocal, care au pus în evidență mărirea liniară constantă la variația abscisei obiect. Păstrarea constantă a grosimentului microscopului presupune însă deplasarea ocularului odată cu variația abscisei imagine a redresorului. Pentru evitarea unei astfel de complicații s-a propus transformarea redresorului într-o variantă zoom, cu deplasări de valoare redusă a primei lentile a subansamblului. S-a demonstrat numeric faptul că introducerea unor valori mici ale intervalului optic nu modifică practic caracterul afocal al redresorului a cărei mărime liniară este, practic, constantă și egală cu unitatea. S-a dedus legea de deplasare a primului dublet al redresorului în raport cu abscisa obiect a sistemului. Dependența $\Delta d(s_{ob})$ s-a dovedit a fi de tip liniar, ușor de realizat practic.

Capitolul 5 al tezei conține contribuții originale ale autorului, dintre care se

evidențiază următoarele:

- proiectarea unui microscop de măsurare original, cu subansamblu redresor
- elaborarea unui program automat scris în limbajul Visual Basic și destinat efectuării calculului de gabarit al microscopului
- sinteza subansamblurilor obiectiv și redresor afocal astfel încât au rezultat soluții de sisteme optice limitate la difracție
- realizarea unei simulări numerice complexe care să certifice proprietățile redresorului afocal
- transformarea subansamblului redresor într-un sistem zoom, cu deplasarea primului dublet, astfel încât grosismentul aparatului să fie constant
- determinarea legii de deplasare a primului dublet în raport cu abscisa obiect a sistemului.

BIBLIOGRAFIE: [B2, D2, G9, H2, K1, M7, N2, N3, O1, S4, S5, S6, W3, W14, W21]

6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Prezenta teză pornește de la observația că literatura de specialitate alocă un spațiu redus studiului proprietăților și elaborării algoritmilor de sinteză a sistemelor lenticulare de redresare a imaginii. Acestea, ca subansambluri cu funcția bine definită de a asigura o imagine dreaptă la nivelul receptorului final, pot fi incluse în diverse scheme optice de bază. Diverși autori se referă cu precădere la astfel de scheme și dezvoltă tehnici de calcul de gabarit și de sinteză a subansamblurilor specifice, adăugând doar sub formă de mențiune posibilitatea includerii unui redresor în structura instrumentului vizat.

În același timp, literatura, prin acest tip de mențiuni, sugerează utilizarea frecventă a subansamblurilor de redresare a imaginii. Acestea, în mod tradițional, se găsesc în schema lunetelor terestre kepleriene, a teodoliteor, binocurilor, lunetelor periscop, lunetelor și microscopelor de măsurare etc.

O altă observație, care se evidențiază mai ales studiind oferta pieței de profil, este calitatea tot mai ridicată a sistemelor optice, pe baza cărora se construiesc instrumente de observare sau măsurare. Practic, proiectarea componentelor optice a evoluat până la nivelul la care toate subansamblurile unui aparat care nu este destinat folosinței unice sau divertismentului sunt limitate la difracție.

Având în vedere cele de mai sus, teza și-a propus ca scop următoarele obiective:

- stabilirea unor algoritmi de calcul de gabarit și de sinteză pentru cele două tipuri de redresoare lenticulare de bază: redesorul cu conectare în punctele antiprinicipale și redesorul cu conectare afocală
- analiza sistemelor de redresare obținute pe baza algoritmilor propuși, împreună cu subansamblurile din schema unor instrumente tradițional dotate cu redresor, cum ar fi luneta kepleriană sau microscopul de măsurare
- abordarea problemei calității imaginii pentru sisteme optice complexe, așa cum sunt cele care includ redresoare lenticulare
- aplicații numerice pe schema lunetei Kepler și a microscopului de

măsurare pentru verificarea validității algoritmilor de proiectare și a proprietăților redresoarelor, în condițiile în care se urmărește ca subansamblurile și sistemul complet să fie limitate la difracție

□ studiul variantei zoom derivată din modelul afocal al redresorului format din două dublete

Pe parcursul primelor trei capitole s-a prezentat stadiul actual privind cunoștințele referitoare la redresoarele lenticulare și s-a sintetizat un material științific bogat, necesar abordării problemelor de sinteză și analiză a sistemelor optice.

Contribuțiile autorului în elaborarea acestor capitole introductive vizează asimilarea unei informații de volum foarte extins, cu caracter eterogen și grad de dificultate ridicat, precum și promovarea celor mai eficiente metode de sinteză și de analiză a sistemelor optice la nivel mondial.

În capitolul al patrulea și al cincilea s-au tratat efectiv probleme legate de sinteza și analiza subansamblurilor redresoare.

Redresorul cu conectare în punctele sale antiprinicipale și cel cu conectare afocală au fost ilustrate prin aplicații pe schema lunetei terestre kepleriene. S-a parcurs algoritmiul complet pentru calculul de gabarit al lunetei, de sinteză și analiză a subansamblurilor obiectiv și ocular. A urmat calculul de gabarit al redresorului, analiza și sinteza acestuia, iar în final a fost analizat întregul sistem optic obținut. Toate subansamblurile proiectate sunt limitate la difracție, cu excepția lentilei de câmp singulare, care nu poate atinge această performanță. Sistemele formate numai din componente limitate la difracție, precum și structurile mixte calitativ, au prilejuit o analiză cu virtuți genealizatoare privind regulile de compunere a parametrilor Fourier de calitate a imaginii.

Capitolul dedicat cercetărilor privind utilizarea redresoarelor lenticulare în schema lunetei Kepler pune în evidență următoarele realizări cu titlul de contribuții originale:

□ proiectarea unei lunete Kepler originale, pentru care s-au realizat calculul de gabarit, sinteza și analiza subansamblurilor componente

□ sinteza unui obiectiv (dublet acromat) și a unui ocular (de tip simetric), ambele limitate la difracție, alegerea tipului acestora realizându-se în funcție de cerințele specifice sistemului. Obiectivul este un subansamblu cu deschidere mare pe care sunt incidente fluxuri luminoase paralele cu înclinație

mică. Aberațiile cele mai importante fiind cele de sfericitate și cromatism, pentru obiectiv a fost oportună alegerea soluției constructive de dublet acromat. Ocularul, de putere mai mare, necesită corectarea aberațiilor specifice fasciculelor înclinate. Pentru acesta s-a propus o soluție constructivă simetrică formată din două dublete acromate care asigură compensarea comei, distorsiunii și astigmatismului.

- propunerea unor algoritmi de ghidare a calculului subansamblului redresor, având la bază un criteriu geometric (diametrul util) și un criteriu de calitate (numărul de deschidere minim la care dubletul poate fi limitat la difracție)
- proiectarea unui sistem de redresare cu conectare în punctele antiprinipale, limitat la difracție. Soluția constructivă propusă pentru redresor este de dublet acromat
- proiectarea lentilei de câmp, respectiv a dubletului cu rol de lentilă, în scopul reducerii diametrului fasciculului luminos
- sinteza sistemului de redresare cu conectare afocală
- analiza tuturor soluțiilor cu ajutorul programului specializat OSLO LT, care a indicat calitatea foarte ridicată a tuturor sistemelor rezultate prin sinteză originală, cu excepția lentilei de câmp (simplet, lentilă singulară) care nu poate fi limitată la difracție indiferent de forma sau materialul ales.
- analiza critică a relației de compunere a parametrilor Fourier (MTF, PSF, Strehl) pentru sisteme optice complexe și concluzii practice privind asocierea subansamblurilor cu diverse caracteristici de calitate:
 - sistemele formate din subansambluri limitate la difracție sunt și ele limitate la difracție. În acest caz, regula compunerii prin multiplicare conduce la valori care supraestimează într-o măsură nesemnificativă PSF și Strehl, dar subestimează substanțial MTF. Rezultă ca, pentru determinarea exactă a caracteristicilor unui sistem optic este necesară analiza acestuia ca întreg.
 - în cazul existenței unei componente care nu este limitată la difracție, parametrii Fourier ai sistemului nu sunt dictați de calitatea slabă a componentei respective. Influența sa este mult mai puțin semnificativă decât este estimată prin regula multiplicării. Sistemul analizat, format

din trei subansambluri limitate la difracție și o lentilă singulară, a rămas de foarte bună calitate (între RL4 și RL2). Rezultă că, în general, este necesară analiza fiecărei aplicații particulare și estimarea parametrilor Fourier pe întreg sistemul optic, pentru a obține rezultate de încredere. De asemenea, se poate conchide că regula multiplicării are, cel mult, un caracter informativ și numai în cazul în care toate subansamblurile sunt limitate la difracție. Dacă sistemul optic are o componentă mai slabă calitativ (de exemplu un simplet), regula multiplicării nu este valabilă, parametrii sistemului tratat ca întreg fiind superiori celor ai simpletului.

Capitolul dedicat cercetării redresorului afocal utilizează ca aplicație pentru ilustrarea proprietăților și a algoritmului de proiectare a redresorului, un microscop de măsurare.

Aplicația mai complexă pune în evidență necesitatea conservării măririi liniare a redresorului și modul în care varianta afocală a redresorului satisface această cerință. Abscisa variabilă a obiectului impune conceperea unui sistem flexibil care să păstreze atât caracteristicile paraxiale, cât și calitatea imaginii pe întreg câmpul și în profunzimea sa.

Cercetările aprofundate în domeniul redresoarelor afocale s-au bazat pe o serie de demersuri care pot fi marcate drept contribuții originale. Printre acestea se pot aminti:

- proiectarea de la zero a unui microscop de măsurare cu sistem de redresare lenticular (calcul de gabarit, sinteza și analiza tuturor subansamblurilor)
- elaborarea unui program automat scris în limbajul Visual Basic și destinat efectuării calculului de gabarit al microscopului
- sinteza subansamblurilor obiectiv și redresor afocal astfel încât au rezultat soluții de sisteme optice de foarte bună calitate
- analiza tuturor soluțiilor cu ajutorul programului specializat OSLO LT, care a indicat calitatea foarte ridicată a tuturor sistemelor rezultate prin sinteză originală
- realizarea unei simulări numerice complexe care să certifice proprietățile redresorului afocal

- transformarea subansamblului redresor într-un sistem zoom, cu deplasare a primului dublet, astfel încât grosimentul aparatului să fie constant
- determinarea legii de deplasare a primului dublet în raport cu abscisa obiect a sistemului.

În concluzie, partea fundamentală a tezei poate prezenta ca rezultat elaborarea algoritmilor destinați calculului de gabarit al redresoarelor, în cele trei scheme de conectare abordate.

Din punct de vedere aplicativ, teza conține o serie numeroasă de sinteze a unor subansambluri și sisteme optice originale, care, după analize specifice, s-au dovedit a satisface în totalitate calitatea imaginii la nivelul standardelor actuale.

Subiectul relativ îngust al subansamblurilor de redresare a fost tratat într-un context mai cuprinzător, care a implicat exerciții de proiectare în domeniul lunetelor terestre și microscopiei de măsurare. S-a realizat astfel o integrare a efortului de cercetare într-o sferă mai largă, aceea a sintezei și analizei din domeniul aparatelor optice și, în sens mai general, al ingineriei optice.

Având în vedere cele de mai sus se poate aprecia că scopul tezei formulat prin cerințele din primul capitol a fost atins.

ANEXE

ANEXA 3.1

CODUL PROGRAMULUI AUTOMAT PENTRU SINTEZA DUBLETULUI ACROMAT

```

CLS
DEFDBL A-Z
OPTION BASE 1
COLOR 15, 0
INPUT "FP="; FP: INPUT "s="; s: INPUT "DU="; DU
REM sticle:BK7, F2
READ n(1), n(2), n(3)
DATA 1,1.516664,1.620057
READ np(1), np(2), np(3)
DATA 1.516664,1.620057,1
READ V1, V2
DATA 64.06,36.35
READ DN1, DN2
DATA 0.008065,0.017053
FP1 = FP * (V1 - V2) / V1
FP2 = FP * (V2 - V1) / V2
PRINT USING "FP1=####.### "; FP1;
PRINT USING "FP2=####.### "; FP2
C1 = 1 / FP / (V1 - V2) / DN1
C2 = 1 / FP / (V2 - V1) / DN2
PRINT USING "C1=##.### "; C1;
PRINT USING "C2=##.### "; C2
PRINT
FOR j = 2 TO 3
  G1(j) = n(j) * n(j) * (n(j) - 1) / 2
  G2(j) = (2 * n(j) + 1) * (n(j) - 1) / 2
  G3(j) = (3 * n(j) + 1) * (n(j) - 1) / 2
  G4(j) = (n(j) + 2) * (n(j) - 1) / n(j) / 2
  G5(j) = 2 * (n(j) * n(j) - 1) / n(j)
  G6(j) = (3 * n(j) + 2) * (n(j) - 1) / n(j) / 2
NEXT j
IF ABS(s) > 10000000000# THEN
  P1 = 0
ELSE
  P1 = 1 / s
END IF
P2 = P1 + C1 * (n(2) - 1)
ALFA = G4(2) * C1 + G4(3) * C2
BETA = -G2(2) * C1 * C1 - G5(2) * C1 * P1 - G2(3) * C2 * C2 - 2 * G4(3) * C1 * C2 -
-G5(3) * P2 * C2
GAMA = G1(2) * C1 * C1 * C1 + G3(2) * C1 * C1 * P1 + G6(2) * C1 * P1 * P1 + G1(3) * C2 * C2 * C2 +
G2(3) * C1 * C2 * C2 + G3(3) * C2 * C2 * P2 + G4(3) * C1 * C2 * C1 + G5(3) * C1 * P2 * C2 + G6(3) *
C2 * P2 * P2
PRINT "ALFA= "; ALFA; "BETA= "; BETA; "GAMA= "; GAMA
delta = (BETA) * (BETA) - (4 * (ALFA) * (GAMA)): PRINT "delta= "; delta
IF delta < 0 THEN
  PRINT "NU EXISTA SOLUTIE DELTA="; delta: STOP
END IF
PRINT

```

```

RO11 = (-BETA + SQR(delta)) / (2 * ALFA)
RO12 = (-BETA - SQR(delta)) / (2 * ALFA)
RO21 = RO11 - C1: RO22 = RO12 - C1
R11 = 1 / RO11: R12 = 1 / RO12: R21 = 1 / RO21: R22 = 1 / RO22
COLOR 11, 2
PRINT USING "R11=####.### "; R11;
PRINT USING "R21=####.### "; R21
IF DU < 10 THEN
    DT = DU + 1
END IF
IF DU >= 10 AND DU < 30 THEN
    DT = DU + 2
END IF
IF DU >= 30 THEN
    DT = DU + 3
END IF
PRINT USING "DT=##.##"; DT
r(1) = R11: r(2) = R21
100 IF r(1) > 0 AND r(2) < 0 THEN
    d(1) = 1 + r(1) - r(2) - (SQR(r(1) * r(1) - (DT * DT / 2 / 2)) + SQR(r(2) * r(2) - (DT * DT / 2 / 2)))
END IF
IF r(1) > 0 AND r(2) > 0 THEN
    d(1) = 1 + r(2) - r(1) - (SQR(r(2) ^ 2 - (DT * DT / 2 / 2)) - SQR(r(1) ^ 2 - (DT * DT / 2 / 2)))
END IF
IF r(1) < 0 AND r(2) < 0 THEN
    d(1) = 1 - (ABS(r(1)) - ABS(r(2)) - SQR(r(1) * r(1) - DT * DT / 4) + SQR(r(2) * r(2) - DT * DT /
4))
END IF
PRINT USING "d1=##.##"; d(1):
PRINT "d2=1.5"
IF ABS(s) < 100000! THEN
    SIGMA1 = ATN(DT / 2 / s)
END IF
FOR j = 1 TO 2
    IF ABS(r(j)) < 10000000000# THEN
        RO(j) = 1 / r(j)
    ELSE
        RO(j) = 0
    END IF
NEXT j
IF ABS(s) > 100000! THEN
    h = DU / 2: SIG(1) = 0
    Q(1) = h
ELSE
    SIG(1) = SIGMA1
    Q(1) = s * SIN(SIG(1))
END IF
FOR j = 1 TO 2
    IF j > 1 THEN
        Q(j) = QP(j - 1) - (d(j - 1)) * SIN(SIGP(j - 1)): SIG(j) = SIGP(j - 1)
        s(j) = Q(j) / SIN(SIG(j))
    END IF
    SINEPS(j) = SIN(SIG(j)) - Q(j) * RO(j)
    EPS(j) = ATN(SINEPS(j) / SQR(1 - (SINEPS(j)) ^ 2))
    SINEPSP(j) = n(j) * (SINEPS(j)) / np(j)
    EPSP(j) = ATN(SINEPSP(j) / SQR(1 - (SINEPSP(j)) ^ 2))
    SIGP(j) = SIG(j) - EPS(j) + EPSP(j)
    G(j) = Q(j) / (COS(EPS(j)) + COS(SIG(j)))
    QP(j) = G(j) * (COS(EPSP(j)) + COS(SIGP(j)))
    sp(j) = QP(j) / SIN(SIGP(j))

```

```

X(j) = r(j) * (1 - COS(SIG(j) - EPS(j)))
Y(j) = r(j) * SIN(SIG(j) - EPS(j))
NEXT j
D12 = (d(1) + X(2) - X(1)) / COS(SIGP(1))
D23 = 1.5 - (D12 - d(1)) * DN1 / DN2
X3 = D23 * COS(SIGP(2)) + X(2) - 1.5
Y3 = Y(2) - D23 * SIN(SIGP(2))
r(3) = (X3 * X3 + Y3 * Y3) / 2 / X3: PRINT USING "R3=####.###"; r(3)
COLOR 15, 0
RO31 = RO21 - C2: R31 = 1 / RO31: PRINT USING "R31informativ=####.###"; R31
d(2) = 1.5
ap(1) = np(1) * r(1) / (np(1) - n(1))
FOR j = 2 TO 3
    A(j) = ap(j - 1) - d(j - 1)
    u(j) = n(j) / A(j): v(j) = (np(j) - n(j)) / r(j): z(j) = u(j) + v(j)
    ap(j) = np(j) / z(j)
NEXT j
f = ap(1) * ap(2) * ap(3) / A(2) / A(3): COLOR 11, 2
PRINT USING "s3p=####.### "; ap(3)
PRINT USING "f=####.###"; f
IF r(1) = R12 THEN
    END
END IF
r(1) = R12: r(2) = R22: PRINT USING "R12=####.### "; r(1);
PRINT USING "R22=####.### "; r(2)
COLOR 15, 0
RO32 = RO22 - C2: R32 = 1 / RO32: PRINT USING "R32informativ=####.### "; R32
COLOR 11, 2
GOTO 100

```

ANEXA 3.2

**CODUL PROGRAMULUI AUTOMAT PENTRU
SINTEZA TRIPLETULUI LIPIT**

```

CLS
DEFDBL A-Z
f = 100: D# = f / 10: se(1) = 1E+30
DIM ne(5): DIM nc(5): DIM nf(5): DIM D(3)
REM sticle FK54, LaK28, TIF6
FOR j = 1 TO 5
  READ ne(j)
NEXT j
DATA 1,1.438151,1.747779,1.621182,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nc(j)
NEXT j
DATA 1,1.435756,1.740556,1.611684,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nf(j)
NEXT j
DATA 1,1.440608,1.755353,1.631939,1
FOR j = 2 TO 4
  nu(j) = (ne(j) - 1) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "nu="; nu(j)
  P(j) = (nf(j) - ne(j)) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "P="; P(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
  dn(j) = nf(j) - nc(j)
NEXT j
e = (nu(2) * (P(3) - P(4)) + nu(3) * (P(4) - P(2)) + nu(4) * (P(2) - P(3))) / (nu(2) - nu(4))
PRINT "E="; e
ct = 1 / f / e / (nu(2) - nu(4))
ca = ct * (P(3) - P(4)) / dn(2): PRINT "ca="; ca
cb = ct * (P(4) - P(2)) / dn(3): PRINT "cb="; cb
cc = ct * (P(2) - P(3)) / dn(4): PRINT "cc="; cc
FOR j = 2 TO 4
  g2(j) = .5 * (2 * ne(j) + 1) * (ne(j) - 1): PRINT "g2="; g2(j)
  g4(j) = (ne(j) + 2) * (ne(j) - 1) / 2 / ne(j): PRINT "g4="; g4(j)
  g5(j) = 2 * (ne(j) * ne(j) - 1) / ne(j): PRINT "g5="; g5(j)
NEXT j
fa = 1 / ca / (ne(2) - 1): PRINT "fa="; fa
fb = 1 / cb / (ne(3) - 1): PRINT "fb="; fb
fc = 1 / cc / (ne(4) - 1): PRINT "fc="; fc
pa = 0: pb = 1 / fa: PRINT "pb="; pb: pc = (fa + fb) / fa / fb: PRINT "pc="; pc
c(1) = 0.03
c(2) = c(1) - ca: c(3) = c(2) - cb: c(4) = c(3) - cc: PRINT "c1="; c(1)
FOR j = 1 TO 4
  r(j) = 1 / c(j)
  PRINT "r("; j; ")="; r(j)
NEXT j
sep(1) = ne(2) * r(1) / (ne(2) - ne(1)): PRINT "s'(1)="; sep(1)
FOR j = 1 TO 3
  IF r(j) > 0 AND r(j + 1) < 0 THEN

```

```

D(j) = 1.5 + ABS(r(j)) + ABS(r(j + 1)) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) + SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5 + r(j) - r(j + 1) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j + 1) ^ 2 + D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) > 0 THEN
D(j) = 1.5
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5 + ABS(r(j + 1)) - ABS(r(j)) - (SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
PRINT "d("; j, ")="; D(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
  se(j) = sep(j - 1) - D(j - 1)
  REM PRINT "s("; j, ")="; se(j)
  sep(j) = ne(j + 1) * se(j) * r(j) / (r(j) * ne(j) + (ne(j + 1) - ne(j)) * se(j))
  REM PRINT "s'("; j, ")="; sep(j)
NEXT j
fprim = sep(1) * sep(2) * sep(3) * sep(4) / se(2) / se(3) / se(4)
PRINT "f="; fprim: PRINT "s'(4)="; sep(4)

```

ANEXA 3.3

**SORTURILE DE STICLE OPTICE DIN CATALOGUL SCHOTT ȘI
CARACTERISTICILE DE REFRACTIE ȘI DISPERSIE PRINCIPALE**

nr.crt	sort	n_e	n_F'	n_C'	v_e	n_g	n_s	P_{g-s}
1	BAF3	1.585650	1.592210	1.579525	45.073884	1.59857	1.57257	0.678393
2	BAF4	1.608890	1.616130	1.602176	42.577737	1.62318	1.59463	0.680347
3	BAF50	1.686370	1.694400	1.678883	43.156201	1.7022	1.67043	0.678904
4	BAF51	1.655690	1.663290	1.648606	43.569347	1.67068	1.64059	0.679079
5	BAF13	1.672450	1.680250	1.665196	43.590632	1.68784	1.65700	0.67965
6	BAF52	1.611700	1.618560	1.605304	45.041294	1.62522	1.59805	0.678851
7	BAF8	1.626890	1.633830	1.620409	45.593325	1.64055	1.61305	0.678219
8	BAF9	1.646466	1.653466	1.639902	47.662105	1.66023	1.63243	0.677096
9	BAFN10	1.673412	1.680840	1.666455	46.816211	1.68804	1.65853	0.677693
10	BAFN11	1.669996	1.677174	1.663253	48.129601	1.68411	1.65554	0.676703
11	BAFN6	1.591890	1.598227	1.585936	48.155280	1.60436	1.57910	0.676835
12	BAK1	1.574870	1.580000	1.569970	57.265471	1.58488	1.56421	0.671362
13	BAK2	1.542120	1.546770	1.537650	59.440103	1.55117	1.53234	0.669379
14	BAK4	1.571240	1.576480	1.566250	55.853852	1.58146	1.56038	0.671926
15	BAK5	1.558972	1.563862	1.554286	58.372668	1.56850	1.54876	0.670306
16	BAK50	1.570070	1.575104	1.565231	57.739088	1.57987	1.55947	0.669429
17	BALF4	1.582139	1.587727	1.576830	53.424652	1.59307	1.57065	0.673102
18	BALF5	1.549821	1.555111	1.544803	53.337315	1.56017	1.53898	0.673441
19	BALF50	1.591660	1.597611	1.586030	51.086542	1.60333	1.57951	0.674571
20	BALKN3	1.520540	1.524957	1.516283	60.007506	1.52914	1.51118	0.668862
21	BASF1	1.629871	1.638355	1.622072	38.683580	1.64671	1.61345	0.683466
22	BASF10	1.654098	1.662867	1.646038	38.866652	1.6715	1.63714	0.68345
23	BASF12	1.674031	1.683056	1.665737	38.917660	1.69195	1.65656	0.683592
24	BASF13	1.701896	1.711457	1.693125	38.288054	1.72091	1.68342	0.684326
25	BASF2	1.668853	1.678688	1.659880	35.562543	1.68845	1.65007	0.685929
26	BASF51	1.728232	1.738248	1.719009	37.850104	1.74810	1.70877	0.68296
27	BASF52	1.705872	1.714847	1.697528	40.755420	1.72362	1.68807	0.680208
28	BASF54	1.741685	1.753902	1.730651	31.899356	1.76616	1.68807	0.689262
29	BASF56	1.661388	1.670862	1.652724	36.464792	1.68024	1.64322	0.685129
30	BASF57	1.655164	1.663338	1.647595	41.617218	1.67134	1.63911	0.681238
31	BASF6	1.671329	1.679704	1.663582	41.640538	1.68791	1.65493	0.68156
32	BASF64A	1.708239	1.717652	1.699547	39.119520	1.72691	1.68982	0.682345
33	BK1	1.512009	1.516117	1.508020	63.235502	1.51998	1.50317	0.666472
34	BK10	1.499596	1.503372	1.495891	66.780805	1.50690	1.49127	0.663457
35	BK3	1.500140	1.504030	1.496324	64.898227	1.50767	1.49157	0.66367
36	BK6	1.533168	1.537541	1.528930	61.920033	1.54166	1.52380	0.667086
37	BK7	1.518722	1.522829	1.514719	63.961687	1.52669	1.50980	0.665609
38	BK8	1.522101	1.526271	1.518045	63.469663	1.53019	1.51309	0.666035
39	F1	1.630036	1.639321	1.621546	35.444045	1.64852	1.61222	0.685252
40	F13	1.626463	1.635606	1.618099	35.784406	1.64466	1.60890	0.685102
41	F14	1.605130	1.613429	1.597492	37.968261	1.62160	1.58900	0.683176
42	F15	1.609446	1.617899	1.601676	37.566838	1.62623	1.59306	0.683555
43	F2	1.624080	1.633101	1.615817	36.108438	1.64202	1.60671	0.684654
44	F3	1.616853	1.625600	1.608828	36.778255	1.63424	1.59996	0.684204

45	F4	1.620581	1.629485	1.612421	36.368063	1.63829	1.60342	0.684565
46	F5	1.607182	1.615557	1.599479	37.765782	1.62381	1.59093	0.683408
47	F6	1.640624	1.650167	1.631908	35.085380	1.65963	1.62235	0.685593
48	F7	1.629526	1.638849	1.621016	35.300879	1.64809	1.61169	0.685676
49	F8	1.599115	1.607124	1.591728	38.911903	1.61500	1.58349	0.68258
50	F9	1.624313	1.632916	1.616406	37.813100	1.64141	1.60762	0.683771
51	FK3	1.466186	1.469782	1.462672	65.571488	1.47315	1.45834	0.664631
52	FK5	1.489143	1.492656	1.485690	70.225612	1.49593	1.48137	0.662793
53	FK51	1.487937	1.490882	1.485079	84.074727	1.49364	1.48165	0.66616
54	FK52	1.487471	1.490516	1.484527	81.396439	1.49338	1.48102	0.667457
55	FK54	1.438151	1.440608	1.435756	90.307703	1.44291	1.43285	0.665222
56	FN11	1.625023	1.634122	1.616718	35.911798	1.64320	1.60748	0.686391
57	K10	1.503489	1.508068	1.499101	56.151260	1.51243	1.49389	0.670793
58	K11	1.502071	1.506242	1.498038	61.197685	1.51019	1.49315	0.66812
59	K3	1.520325	1.524845	1.515983	58.711988	1.52913	1.51082	0.669735
60	K4	1.521107	1.525758	1.516640	57.147742	1.53017	1.51131	0.669845
61	K5	1.524583	1.529099	1.520241	59.220193	1.53338	1.51507	0.669533
62	K50	1.524643	1.529098	1.520345	59.933880	1.53331	1.51518	0.668492
63	K7	1.513139	1.517483	1.508952	60.151251	1.52159	1.50394	0.668698
64	KF3	1.516781	1.521639	1.512145	54.435492	1.52627	1.50669	0.671788
65	KF6	1.519780	1.524915	1.514905	51.928249	1.52984	1.50920	0.673586
66	KF9	1.525831	1.531103	1.520836	51.217369	1.53616	1.51501	0.674041
67	KZFN1	1.553790	1.559552	1.548336	49.375356	1.56509	1.54197	0.674466
68	KZFN2	1.531882	1.537178	1.526828	51.389484	1.54224	1.52083	0.672074
69	KZFS1	1.616386	1.623560	1.609594	44.133246	1.63048	1.60159	0.674806
70	KZFS6	1.594869	1.601178	1.588860	48.291397	1.60723	1.58173	0.672891
71	KZFS7A	1.684957	1.694529	1.676097	37.161449	1.70393	1.66608	0.681673
72	KZFS8	1.725402	1.736399	1.715305	34.388436	1.74727	1.70407	0.684123
73	KZFSN2	1.560818	1.566102	1.555711	53.972355	1.57111	1.54948	0.668355
74	KZFSN4	1.616692	1.623894	1.609901	44.069378	1.63085	1.60198	0.675832
75	KZFSN5	1.658035	1.666678	1.649977	39.401255	1.67512	1.64075	0.679513
76	KZFSN9	1.601592	1.608204	1.595317	46.683939	1.61456	1.58791	0.673907
77	LAF11A	1.762577	1.775274	1.751048	31.477793	1.78794	1.73849	0.687493
78	LAF13	1.780368	1.791173	1.770409	37.583156	1.80179	1.75933	0.682642
79	LAF2	1.747957	1.756660	1.739829	44.439892	1.76510	1.73065	0.678367
80	LAF20	1.685844	1.693222	1.678908	47.915441	1.70034	1.67099	0.676372
81	LAF22A	1.786772	1.797882	1.776579	36.932606	1.80886	1.76531	0.684242
82	LAF3	1.720554	1.728341	1.713229	47.681194	1.73585	1.70485	0.676186
83	LAF9	1.801654	1.816656	1.788206	28.176823	1.83180	1.77385	0.691517
84	LAFN10	1.788674	1.797983	1.779937	43.704755	1.80699	1.76991	0.677041
85	LAFN21	1.792261	1.800881	1.784105	47.226891	1.80915	1.77465	0.674346
86	LAFN23	1.692302	1.699516	1.685507	49.419473	1.70646	1.67774	0.675703
87	LAFN24	1.760960	1.769174	1.753178	47.571745	1.77706	1.74411	0.674148
88	LAFN28	1.776857	1.784931	1.769182	49.327689	1.79264	1.76024	0.67282
89	LAFN7	1.754583	1.765920	1.744184	34.716983	1.77713	1.73264	0.684362
90	LAFN8	1.739394	1.748666	1.730775	41.327152	1.75772	1.72105	0.680126
91	LAK10	1.723401	1.730785	1.716367	50.174125	1.73784	1.70809	0.672426
92	LAK11	1.661043	1.666957	1.655362	57.011251	1.67256	1.64861	0.669671
93	LAK16A	1.736876	1.744184	1.729890	51.550294	1.75114	1.72164	0.671247
94	LAK21	1.643037	1.648503	1.637761	59.858656	1.65367	1.63143	0.668364
95	LAK23	1.671594	1.677593	1.665837	57.127841	1.68328	1.65902	0.669954
96	LAK28	1.747779	1.755353	1.740556	50.536753	1.76257	1.73207	0.671891

97	LAK31	1.699677	1.706011	1.693563	56.208322	1.71200	1.68620	0.668384
98	LAK33	1.757404	1.764819	1.750309	52.199167	1.77187	1.74193	0.670934
99	LAK8	1.716160	1.722974	1.709616	53.611024	1.72944	1.70181	0.669895
100	LAK9	1.694013	1.700509	1.687771	54.482345	1.70667	1.68033	0.669718
101	LAKL12	1.680842	1.687196	1.674746	54.688231	1.69322	1.66751	0.670023
102	LAKL21	1.643037	1.648514	1.637717	59.554766	1.65367	1.63121	0.66652
103	LAKN12	1.680827	1.687171	1.674776	54.923954	1.69320	1.66772	0.67157
104	LAKN13	1.696599	1.703332	1.690201	53.051124	1.70975	1.68279	0.67272
105	LAKN14	1.699798	1.706256	1.693577	55.194912	1.71237	1.68612	0.668972
106	LAKN22	1.653908	1.659915	1.648160	55.627591	1.66562	1.64141	0.67079
107	LAKN6	1.645142	1.650849	1.639667	57.695877	1.65626	1.63320	0.670042
108	LAKN7	1.654255	1.659979	1.648750	58.265200	1.66539	1.64220	0.669171
109	LASF18A	1.920161	1.935158	1.906524	32.135297	1.95012	1.89159	0.687196
110	LASF3	1.812732	1.823164	1.803028	40.361990	1.83335	1.79202	0.679968
111	LASF32	1.809739	1.823853	1.797013	30.168833	1.83806	1.78321	0.689965
112	LASF33	1.811531	1.824029	1.800153	33.989057	1.83646	1.78775	0.686617
113	LASF35	2.030353	2.049155	2.013434	28.844507	2.06806	1.99531	0.690276
114	LASF36A	1.802499	1.814543	1.791501	34.827068	1.82649	1.77943	0.685673
115	LASFN15	1.883474	1.895599	1.872248	37.834406	1.90746	1.85969	0.681188
116	LASFN30	1.807302	1.816305	1.798806	46.133931	1.82495	1.78903	0.675031
117	LASFN31	1.885774	1.897025	1.875294	40.760463	1.90793	1.86358	0.678882
118	LASFN9	1.856507	1.870588	1.843761	31.927026	1.88467	1.82997	0.68843
119	LF5	1.584818	1.592305	1.577892	40.574972	1.59964	1.57014	0.681534
120	LF7	1.578300	1.585582	1.571550	41.215616	1.59271	1.56396	0.681002
121	LF8	1.567499	1.574260	1.561204	43.467969	1.58085	1.55408	0.679579
122	LLF1	1.550987	1.557248	1.545130	45.467250	1.56333	1.53845	0.678187
123	LLF2	1.543444	1.549423	1.537833	46.888898	1.55521	1.53139	0.677102
124	LLF6	1.534312	1.539987	1.528966	48.483208	1.54546	1.52279	0.675882
125	LLF7	1.551702	1.558018	1.545794	45.130898	1.56415	1.53904	0.678143
126	PK1	1.505578	1.509404	1.501828	66.738260	1.51298	1.49717	0.663737
127	PK2	1.520112	1.524168	1.516149	64.861624	1.52797	1.51126	0.664749
128	PK3	1.527358	1.531499	1.523318	64.460757	1.53538	1.51835	0.665064
129	PK50	1.522322	1.526123	1.518607	69.492494	1.52968	1.51403	0.664499
130	PK51A	1.530193	1.533719	1.526796	76.581668	1.53704	1.52278	0.668391
131	PSK2	1.570881	1.575488	1.566407	62.860751	1.57982	1.56096	0.666443
132	PSK3	1.554399	1.558846	1.550078	63.233966	1.56303	1.54482	0.666384
133	PSK50	1.559507	1.563737	1.555391	67.042607	1.56771	1.55037	0.665882
134	PSK52	1.605301	1.610024	1.600732	65.141817	1.61447	1.59524	0.667419
135	PSK53A	1.622471	1.627491	1.617640	63.188870	1.63223	1.61191	0.668883
136	PSK54	1.588154	1.592820	1.583671	64.285961	1.59723	1.57839	0.669371
137	SF1	1.723105	1.736099	1.711412	29.290543	1.74917	1.69888	0.690317
138	SF10	1.734301	1.748051	1.722000	28.187707	1.76198	1.70887	0.692321
139	SF11	1.791899	1.808341	1.777344	25.547512	1.82518	1.76200	0.695731
140	SF12	1.652845	1.663021	1.643587	33.592120	1.67315	1.63348	0.686838
141	SF13	1.747102	1.761529	1.734242	27.379578	1.77621	1.72056	0.693576
142	SF14	1.768590	1.784067	1.754856	26.311425	1.79989	1.74033	0.69503
143	SF15	1.704443	1.716877	1.693265	29.834874	1.72941	1.68125	0.690746
144	SF16	1.650604	1.660680	1.641431	33.800410	1.67070	1.63142	0.686597
145	SF18	1.727340	1.740536	1.715477	29.024653	1.75381	1.70277	0.690528
146	SF19	1.671581	1.682323	1.661825	32.762639	1.69303	1.65121	0.687358
147	SF2	1.652219	1.662383	1.642971	33.599572	1.67249	1.63289	0.68671
148	SF3	1.746201	1.760267	1.733599	27.981996	1.77446	1.72017	0.691589

149	SF4	1.761667	1.776357	1.748528	27.369316	1.79121	1.73456	0.692165
150	SF5	1.677639	1.688757	1.667562	31.971219	1.69986	1.65664	0.687999
151	SF53	1.734298	1.747898	1.722103	28.466506	1.76162	1.70908	0.691399
152	SF54	1.747028	1.761169	1.734370	27.874688	1.77547	1.72088	0.692019
153	SF55	1.768471	1.783663	1.754926	26.740927	1.79908	1.74058	0.693233
154	SF56A	1.791799	1.808000	1.777397	25.873637	1.82450	1.76220	0.694245
155	SF57	1.855036	1.874245	1.838079	23.641919	1.89456	1.82038	0.699775
156	SF58	1.927646	1.950839	1.907379	21.344672	1.97486	1.88647	0.699664
157	SF59	1.963487	1.988992	1.941312	20.207276	2.01557	1.91856	0.701379
158	SF6	1.812650	1.829705	1.797504	25.236777	1.84707	1.78157	0.694428
159	SF63	1.754775	1.769268	1.741821	27.499451	1.78394	1.72805	0.692443
160	SF64A	1.711350	1.723818	1.700153	30.059869	1.73644	1.68804	0.691432
161	SF8	1.694158	1.705941	1.683507	30.943427	1.71774	1.67201	0.688867
162	SF9	1.659065	1.669395	1.649666	33.405589	1.67967	1.63941	0.686742
163	SFL4A	1.761700	1.776519	1.748497	27.181780	1.79191	1.73427	0.695875
164	SFL56	1.791791	1.808009	1.777403	25.869981	1.82462	1.76211	0.695279
165	SFL57	1.855096	1.874508	1.838019	23.434511	1.89456	1.82007	0.697971
166	SFL6	1.812651	1.829765	1.797505	25.190481	1.84733	1.78147	0.696016
167	SK1	1.612815	1.618369	1.607510	56.430671	1.62365	1.6013	0.671314
168	SK10	1.625410	1.631059	1.620013	56.621232	1.63643	1.61369	0.671255
169	SK11	1.566052	1.570811	1.561461	60.546490	1.5753	1.55597	0.668256
170	SK12	1.585470	1.590514	1.580622	59.183920	1.59529	1.57487	0.669485
171	SK13	1.594229	1.599460	1.589219	58.022436	1.60442	1.58332	0.670416
172	SK14	1.605484	1.610594	1.600559	60.341689	1.61542	1.59467	0.668596
173	SK15	1.625548	1.631075	1.620250	57.789704	1.63631	1.61400	0.670112
174	SK16	1.622863	1.628140	1.617772	60.076133	1.63312	1.61167	0.668296
175	SK18A	1.641285	1.647235	1.635607	55.149785	1.65290	1.62894	0.671659
176	SK2	1.609937	1.615471	1.604651	56.368741	1.62073	1.59847	0.671248
177	SK3	1.611274	1.616591	1.606169	58.653213	1.62163	1.60012	0.669814
178	SK4	1.615212	1.620591	1.610050	58.361455	1.62569	1.60394	0.669949
179	SK5	1.591424	1.596353	1.586661	61.021483	1.60100	1.58094	0.667829
180	SK51	1.623355	1.628658	1.618272	60.019979	1.63369	1.61227	0.67032
181	SK55	1.622873	1.628158	1.617758	59.894467	1.63314	1.61158	0.667468
182	SK6	1.616344	1.621964	1.610980	56.113746	1.62731	1.60472	0.671525
183	SK7	1.609726	1.614978	1.604678	59.193803	1.61995	1.59869	0.66946
184	SK8	1.613776	1.619422	1.608390	55.635905	1.62480	1.60210	0.671785
185	SSK1	1.619928	1.625856	1.614296	53.625105	1.63152	1.60776	0.673014
186	SSK2	1.625089	1.631159	1.619334	52.863802	1.63697	1.61267	0.673679
187	SSK3	1.617697	1.623945	1.611801	50.863709	1.62995	1.60502	0.675134
188	SSK4A	1.620319	1.626111	1.614803	54.856418	1.63163	1.60838	0.672193
189	SSK50	1.620750	1.626845	1.614980	52.315586	1.63269	1.60831	0.674195
190	SSK51	1.606287	1.612119	1.600753	53.341521	1.61770	1.59433	0.673453
191	SSKN5	1.661519	1.668244	1.655169	50.592953	1.67471	1.64785	0.675042
192	SSKN8	1.620671	1.627132	1.614588	49.479031	1.63337	1.60758	0.676126
193	TIF3	1.550723	1.557567	1.544421	41.892692	1.56434	1.53731	0.683619
194	TIF6	1.621182	1.631939	1.611684	30.667856	1.64309	1.60151	0.697574
195	TIFN5	1.597506	1.606394	1.589437	35.235380	1.61531	1.58053	0.68813
196	UBK7	1.518720	1.522820	1.514725	64.081596	1.52667	1.50982	0.66555
197	UK50	1.524635	1.529074	1.520350	60.138923	1.53327	1.51520	0.668344
198	ZK1	1.535341	1.540075	1.530799	57.717012	1.54457	1.52541	0.670176
199	ZKN7	1.510452	1.514697	1.506327	60.982718	1.51869	1.50129	0.666343

ANEXA 5.1

**CODUL PROGRAMULUI DE CALCUL AL MICROSCOPULUI
DE MĂSURARE**

```
Private Sub Form_Load()
Dim gama As Single
Dim L As Single
Dim fob As Single
Dim foc As Single
Dim delta As Single
Dim y As Single
Dim yprim As Single
Dim omega As Single
Dim omegaprim As Single
Dim dob As Single
Dim doc As Single
Dim z As Single
Dim a As Single
Dim absob As Single
Dim betaob As Single
Dim gamaoc As Single
Dim ddc As Single
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
'date de intrare
gama = Text1
L = Text2
z = Text3
' f obiectiv
fob = Round((0.5 / gama * ((gama * z + 250) + Sqr((gama * z + 250) ^ 2 - 4 * gama ^ 2 * L * z))), 1)
Text4.Text = fob
' intervalul optic delta
delta = Round((-fob ^ 2 / z), 1)
Text6.Text = delta
' marimea liniara a obiectivului
betaob = Round((-delta / fob), 1)
Text15.Text = betaob
' grosimentul ocularului
gamaoc = Round((-gama / betaob), 1)
Text16.Text = gamaoc
' f ocular
foc = Round((250 / gamaoc), 1)
Text5.Text = foc
' semicampul liniar obiect
y = Round((3 * 0.8726 / 2), 1)
Text7.Text = 2 * y
' semicampul liniar imagine
yprim = Round((y * -betaob), 1)
```

```
Text8.Text = 2 * yprim
' abscisa imagine
absob = Round((((1 - betaob) * fob) / betaob), 1)
' semiunghiul de camp obiect
omega = Round((180 / 3.14 * Atn(y / -z)), 1)
Text9.Text = omega
' diametrul util al obiectivului
dob = Round((2 * fob * Tan(omega * 3.14 / 180)), 1)
Text11.Text = dob
' apertura numerica
a = Round((-dob / 2 / absob), 1)
Text13.Text = a
' diametrul util al ocularului
doc = Round((2 * (-dob / 2 - (fob + delta + foc) * Tan((( -dob / 2 + y) / absob) - dob / 2 / fob))),
1)
Text12.Text = doc
' diametrul diafragmei de camp
ddc = Round((-2 * y * betaob), 1)
Text14.Text = ddc
' semiunghiul de camp imagine
omegaprim = Round((180 / 3.14 * Atn(yprim / foc)), 1)
Text10.Text = omegaprim
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
End
End Sub
```

BIBLIOGRAFIE

- [B1] Boreman, G.D., *Transfer Function Techniques*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [B2] Băcescu, D., *Construcția și perfecționarea obiectivelor sistemelor optice de măsurare*, Teza de doctorat, UP București, 1996
- [C1] Calciu, M., ș.a., *Utilajul și tehnologia confecționării lentilelor și prismelor*, E.D.P., București, 1973
- [C2] Crețu, E., Tomiuc, L., *Optică tehnică*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1993
- [C3] Crețu, E., ș.a., *Aplicații în calculul și proiectarea sistemelor optice*, Ed. Academiei Tehnice Militare, București, 1995
- [C4] Crețu, E., Câmpeanu, M., *Tehnici de laborator în optica tehnică și construcția aparatului artileristice*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1994
- [C5] Curatu, E., *Calitatea sistemelor optice. Funcția optică de transfer*, Ed. Academiei Române, București, 1992
- [C6] Costache, M., Nicoară, I., Gruescu, C., *Study Concerning the Modulation Transfer Function of Complex Optical Systems*, COMEFIM8, Cluj-Napoca, 2006
- [C7] Gruescu, C., Costache, M., Nicoară I., *Analysis of the Composition Law for the Fourier Parameters of a Complex Optical System – Numerical Modeling and Simulation*, COMEFIM8, Cluj-Napoca, 2006
- [D1] Davidescu A. Gruescu C. *Diagrama spot – criteriu de calitate a imaginii*, A XXVIII-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, Bucuresti, 1999
- [D2] Dodoc, P., *Calculul și construcția aparatelor optice*, E.D.P., București, 1983
- [D3] Duma, V.F., *Contribuții la analiza și sinteza sistemelor de scanare*, Teza de doctorat, U.P. Timișoara, 2001
- [D3] Duma, V.F., Nicoară, I., *Some Optical Characteristics of Centered Optical Systems*, Buletinul Științific al UPT, Tom 39(53), 1994
- [G1] Goodman, D.S., *General Principles of Geometric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 1, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [G2] Gruescu, C., *Elemente de optică tehnică și aparate optice*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- [G3] Gruescu, C., Nicoară, I., *The cemented achromat – a critical view*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), seria Mecanică, 1999

- [G5] Gruescu, C., *Analiza aberației sferice și a comei sagitale pentru lentile singulare*, Analele Universității Aurel Vlaicu Arad, 2000, Mecanică, p.252-255
- [G6] Gruescu, C., Nicoară, I., *Considerations on eyeglasses image quality*, Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- [G7] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Glass Choise for Achromatic Optical Systems*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600
- [G8] Gruescu, C., Pommersheim, A., *Optică tehnică*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- [G9] Gruescu, C., Nicoară, I., *Aparate optice. Analiza și sinteza sistemelor optice lenticulare*.Ed. Politehnica Timișoara 2004, ISBN 973-625-158-6
- [G10] Gruescu, C., Costache, M., *Design Of A Kepler Telescope Providing An Erected Image*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" Timișoara, Seria Matematică-Fizică, Tom 50 (64), 2005
- [H1] Halvorson, M., Gygmyr, D., *Learn Basic Now*, Microsoft Press, 1989
- [H2] Hecht, E., *Optics 3rd ed.*, Eddison Wesley Longman, Inc., NY, 1998
- [H3] Hütte *Manualul inginerului*, Fundamente, E.T., București, 1995
- [H4] Homei, D., *Contribuții la optimizarea unor parametri specifici aparaturii artileristice, opto-mecanice și optoelectronice*, Teza de doctorat, ATM București, 2003
- [H4] Hodam, F., *Technische Optik*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965
- [J1] Johnson, B.R., *Lenses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch.1, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [J2] Jones, R.V., *Instruments and Experiences*, John Wiley, New York, 1988
- [K1] Kingslake, R., *Lens design fundamentals*, Academic Press, N.Y.,1978
- [L1] Luca, E., ș.a., *Fizica generală*, E.D.P., București, 1981
- [L2] Lytle, J.D., *Polymeric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [M1] Malacara, D., Malacara, Z., *Optical Metrology*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 29, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [M2] Mihalca, I., *Optică*, partea I, Lito I.P.Timișoara, 1981

- [M3] Mîrzu, M., Crețu, E., Nicoară, I., *Optica ondulatorie și Fourier*, ED. Academiei Tehnice Militare și ED. Pro Transilvania, București, 1996
- [M4] Moisil, G., Curatu, E., *Optică, Teorie și aplicații*, E.T., București, 1986
- [M5] Marian, A.M., *Contribuții privind parametrizarea fenomenului cromatic*, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2002
- [M6] Mazăre, P., *Contribuții la studiul reflectorilor cu diagrama de directivitate $\cos^2(\theta)$* , Teza de doctorat, ATM București, 2004
- [M7] *** *Microsoft VisualBasic 6.0, Ghidul programatorului*, Ed. Teora, București, 1998, ISBN 973-601-459-2
- [N1] Naumann, A., Schroder, G., *Bauelemente der Optik. Taschenbuch der technischen Optik*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
- [N2] Nicoară, I., *Calculul și construcția aparatelor optice*, vol. I, II, Lito I.P.T., 1987
- [N3] Nicoară, I., ș.a., *Calculul și construcția aparatelor optice*, Îndrumător de proiectare, Lito IPTVT, 1984
- [N4] Nicoară, I., ș.a., *Aparate optice, Tehnici de laborator*, Ed. Mirton, Timișoara, 1996
- [N5] Nicoară, I., Gruescu, C., și *Aparate optice*, vol I, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- [N6] Nicoară, I., ș.a., *Considerations on Eyeglasses Image Quality*, Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- [N7] Nossiter, J., *Microsoft Excel 97*, Ed. Teora, București, 1998
- [O1] O'Shea, D.C., *Elements of Modern Optical Design*, John Wiley & Sons, New York, 1985
- [O2] O'Shea, D.C., Harrigan, E., *Aberration Curves in Lens Design*, in Handbook of Optics, vol. I, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [P1] Pommersheim, A., *Optica tehnică, curs pentru subingineri*, vol. I, Lito I.P.T., 1989
- [P2] Pommersheim, A. ș.a., *Optica tehnică, Lucrări de laborator*, Lito UTT, 1995
- [P3] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda pentru calculul unui dublet acromatic corectat la aberația de sfericitate*, Analele Universității din Oradea, 1992
- [P4] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda de proiectare a unui triplet apalanat*, Analele Universității din Oradea, 1994

- [P5] Popescu, I.I., Toader, I., *Optica*, E.S.T., București, 1989
- [P6] Popescu, I.M., *Teoria electromagnetică macroscopică a luminii*, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [P7] Popovici, V., Nicoară, I., *Sisteme optice laser*, Ed. Mirton, Timișoara, 1998
- [P8] Plummer, W.T., *Precision: How To Achieve A Little More Of It, Even After Assembly*, Polaroid Corporation, 38 Henry Street, Cambridge, MA 02139 USA
- [P9] Plummer, W.T., *Fast Automatic Lens Testing of Extended-Field Image Quality*, Appl. Optics 15(3),805-810(1976)
- [R1] Reimelt, C., ș.a., *Program for the Automated Design of Aphocal Optical Systems*, The VIth international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov 2002, vol. 3-21a, p 195-202
- [R2] Reimelt, C., *Aplicarea tehnicilor de proiectare orientate pe obiecte în construcția aparatelor și echipamentelor*, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2003
- [R3] Rojișteanu, C., *Contribuții la studiul parametrilor de sistem optimi ai telemetrelor laser*, Teza de doctorat, ATM București, 2003
- [S1] Schröder, G., *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen*. Vogel Buchverlag Würzburg. 1990
- [S2] Shannon, R.R., *Optical Specification*, in Handbook of Optics, vol.I, ch.34, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S3] Shannon, R.R., *Tolerancing Techniques*, in Handbook of Optics, vol.I, ch.36, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S4] Sinclair, D.C., *Optical Design Software*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 34, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S5] Smith, W.J., *Modern Optical Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, NY, 2000
- [S6] Smith, W.J., *Techniques of First-Order Layout*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S7] Sterian, P., Stan., M., *Fizica*, E.D.P., București, 1985
- [S8] Străuți, G., Gruescu, C., Costache, M., *Uncertainty In Optical Products Choice*, SIM2005, Timișoara, CD-ROM edition
- [S9] STAS 3003-79 *Optica geometrică. Terminologie și simboluri*
- [S10] STAS 4702-88 *Desene tehnice. Desene de execuție pentru piese optice*
- [S11] SR ISO 9334 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Definiții și relații matematice*
- [S12] SR ISO 9335 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Principii și proceduri de măsurare*

- [T1] Toader, E., Spulber, V., *Optică pentru tehnicieni*, E.T., București, 1985
- [T2] Tropf, W.J., ș.a., *Properties of Crystals and Glasses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [T3] Trufașu, A.O., *Cercetarea și realizarea unor noi utilaje optice pentru mașini-unelte de înaltă precizie*, Teza de doctorat UP București, 1997
- [T4] Tufiș, M., *Contribuții la studiul transmisiei imaginilor prin fibre optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2004-08-02
- [Z1] Zsivanov, D., ș.a., *Analiza asistată de calculator a sferocromatismului sistemelor optice*, Analele Universității Oradea, 1995, Fascicola Mecanică, p.7-14
- [V1] Vedinaș, I., *Contribuții la studiul stabilității imaginii prin sisteme optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2002
- [W1] www.optikos.com *How to Measure MTF and other Properties of Lenses*
- [W2] www.alma.com *Alignment Tolerances for ALMA Optics, ALMA Memo 395 by B. Lazareff*
- [W3] www.edmundoptics.com *Lenses, prisms*
- [W4] www.homeschooloffish.com *Lenses*
- [W5] www.OptiCentric.com *Tools for Production and Lab*
- [W6] www.oss.org/bios/fellows-wjsmith.htm
- [W7] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/index.html
- [W8] www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasindex.html
- [W9] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/index.html
- [W10] www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html
- [W11] www.ee.umd.edu/~taylor/optics.htm
- [W12] www.occfiber.com/
- [W13] www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Abbe.html
- [W14] www.OSLO.com
- [W15] www.Interoptik.ro
- [W16] www.sinopt.com
- [W18] www.atmsite.org

- [W19] www.atmsite.org/keyword.html
- [W20] www.wtptoptics.com/Assembly.html
- [W21] www.astrosurf.com/buil/us/stage/calcul/design_us.htm
- [W22] www.sinopt.com/learning1/optsoft/whither/whither.htm
- [W23] <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.htm>
- [W24] http://www.page.sannet.ne.jp/tsoka/rollei6000/index_e.html
- [W25] <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF1A.html>
- [W26] www.zeiss.com
- [W27] http://www.shootingtimes.com/optics/meade_101705/index1.html
- [W28] http://en.wikipedia.org/wiki/Binoculars#Optical_construction
- [W29] <http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/groundup/lesson/basics/index.php?return=true>
- [W30] http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_telescope