بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی، شبیه سازی و ساخت مجموعه شیئی سامانه دو منظوره تلسکوپی دید مستقیم همراه با گیرنده اپتیکی

ایمان کامل جهرمی[۱]، سید محمد صادق جهانمیری[۱]، اسماعیل زاهدی[۲] و عبدالمجید رضازاده [۲]
[۱]صنعت سامانه های الکترواپتیکی، شرکت صنایع الکترونیک شیراز
[۲]مرکز توسعه فناوری قطعات اپتیکی، شرکت صنایع الکترونیک شیراز

چکیده – تشخیص اهداف و ارسال و دریافت لیزر اهمیت بسزایی در دانش، تکنولوژی و فناوری های مراقبتی دارد. در این مقاله، اصول طراحی بخش اپتیکی مجموعه ی شیئی تلسکوپی دید مستقیم برای تشخیص وسیله نقلیه در فاصله ۷ کیلومتری به همراه گیرنده اپتیکی کانونی کننده لیزر برگشتی از هدف بر روی آشکارساز ارائه می گردد. پس از طراحی و شبیه سازی اولیه، فرایند بهینه سازی و تلورانس گذاری مجموعه و ملاحظات لایه نشانی تا استخراج داده های نهایی جهت ساخت دستگاه آمده است.

کلید واژه- سامانه تلسکوپی ، شیئی ، گیرنده اپتیکی

Design, Simulation and Manufacturing of Telescopic Sight's Objective With Optical Receiver

Iman Kaamel Jahromi [1], Mohamadsadegh Jahanmiri [1], Esmaeel Zahedi [2], Abdolmajid Rezazadeh [2]
[1] Electro-optic Industry, Shiraz Electronic Industry, Shiraz
[2] Optical Elements Manufacturing, Shiraz Electronic Industry, Shiraz

Abstract-Target recognition with Send and receive of laser beams are very important in Surveillance science and technology. In this paper we design the optical part of sight's objective for direct view optics to recognize a vehicle at distance of 7 Km with an optical receiver that collect and focus come back laser beams from target on detector. Then optimize our Design and finalize toleration.Afterward explain coating and some stations that in manufacturing must be applied.

Keywords: Objective, Optical Receiver, Telescopic Sight

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

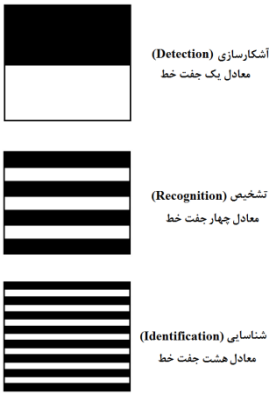
۱- مقدمه

امروزه از سامانه های دو منظوره تلسکوپی دید مستقیم به همراه گیرنده اپتیکی برای ردیابی، فاصله یابی و جستجوی اهداف به ویژه در حوزهٔ تجسسی استفاده می شود. در این عرصه شرکت های تجاری و نظامی زیادی بر سر دستیابی به سامانه های با قدرت تفکیک و بزرگنمایی بیشتر جهت افزایش برد با هم رقابت می کنند. در چنین فضای رقابتی، با بهره گیری از رایانه و نرم افزارهای توانمند محاسباتی، حجم مبادلهٔ اطلاعات به شکل چشمگیری افزایش یافته است. برای مثال رایانه ها در طراحی سامانه های اپتیکی زمان ردیابی پرتو را به کسری از ثانیه کاهش می دهند. این کار بوسیله ی نرم افزارهای طراحی اپتیک نظیر زیمکس (ZEMAX) و اُسلو (OSLO) انجام می شود. در این نرم افزارها می توان از پرتوهای هندسی یا پرتوهای گاوسی استفاده کرد. در پرتوهای گاوسی تحلیل بر مبنای قطر لکه، واگرایی و برد ریلی پرتو انجام می شود. آنچه در طراحی دستگاه های اپتیکی با نرم افزار اهمیت دارد محوریت برنامه با انتخاب نقطهٔ شروع مناسب است. پس از این بخش، طراحی سامانه را با ذکر اصول اپتیکی و با انتخاب عوامل موثر در تعیین نقطه شروع مناسب می آوریم. پس از آن در بخش سوم با متغیر قرار دادن شعاع و ضخامت لنزهای شیئی و اعمال عملگرهای مناسب روند بهینه سازی دستگاه را بیان می کنیم و به تحلیل و بررسی نتایج از روی نمودارهای ارزیابی تصویر می پردازیم. سپس با تلورانس گذاری مجموعه و با توجه به نکات عملی در فرآیند ساخت و لایه نشانی، سامانه جهت ساخت مهیا می گردد.

۲- اصول طراحی و تعیین مشخصات اپتیکی سامانه

توان تفکیک زاویه ای :

بر طبق معیار ریلی، الگوی فرکانسی متناظر با سطوح مختلف واجویی هدف (DRI) در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تشخیص وسیله نقلیه با ابعاد استاندارد ۲/۳m × ۲/۳m در فاصله Km ۷ جدایی دو نقطه قابل تفکیک از هم باید ۵۷/۵ cm باشد. از اینرو توان تفکیک زاویه ای سامانه تلسکوپی ۰/۰۸۲ mrad به دست می آید.



شکل (۱): الگوی فرکانسی واجویی هدف (DRI)

بزرگنمایی:

در سامانه های دیدگانی از آنجا که خروجی آنها تصویری است که باید توسط چشم دیده شود بنابراین به گونه ای طراحی می شوند که با ویژگی های چشم سازگار باشد. توان تفکیک زاویه ای چشم یک دقیقه کمانی برابر با ۰/۳ mrad است[۲]. نسبت توان تفکیک زاویه ای چشم به توان تفکیک زاویه ای تلسکوپ حداقل بزرگنمایی سامانه را تعیین می کند:

$$M = \frac{۰/۳}{۰/۰۸} = ۳/۷۵ \qquad (۲-۱)$$

در عمل برای اینکه کاربری که از تلسکوپ استفاده می کند، دچار خستگی چشم نشود، بزرگنمایی را بین دو تا سه برابر انتخاب می کنند[۱]. به همین دلیل در این سامانه از بزرگنمایی ۱۰ برابر استفاده می شود.

قطر مردمک ورودی مجموعه شیئی:

قطر مردمک خروجی سامانه متناسب با قطر مردمک ورودی چشم در نظر گرفته می شود که از ۸ mm در نور کم تا ۲ mm در نور بسیار زیاد تغییر می کند، در نور معمول محیط برابر با ۴ mm انتخاب می گردد. بنابراین با توجه به بزرگنمایی مجموعه، قطر ناپوشیده دهانهٔ مردمک ورودی ۴۰mm بدست می آید. همچنین به دلیل صرفه جویی اقتصادی عدسی شیئی به عنوان دهانه بند مجموعه در نظر گرفته می شود[۱].

فاصله کانونی موثر مجموعه شیئی:

اگر Fo فاصله کانونی موثر مجموعه شیئی، Fe فاصله کانونی موثر مجموعه چشمی، Fr فاصله کانونی موثر مجموعه مستقیم کننده، M بزرگنمایی تلسکوپ، L طول تلسکوپ، R فاصله راحتی چشم و S1 و S2 همیوغ های

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

مجموعه ی مستقیم کننده باشد معادله های زیر برقرار است[۱]:

$$F_e = \frac{M^2RL - F_O(M^2R + L)}{M^2(R + L) - F_O(M - 1)^2} \qquad (۲-۲)$$

$$S_1 = \frac{-F_O(L - F_O - F_e)}{MF_e + F_O} \qquad (۲-۳)$$

$$S_2 = \frac{-S_1 M F_e}{F_O} \qquad (۲-۴)$$

$$F_r = \frac{S_1 S_2}{S_1 - S_2} \qquad (۲-۵)$$

$$\sum |\varphi| = |\varphi_o| + |\varphi_e| + |\varphi_r| \qquad (۲-۶)$$

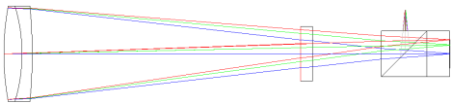
$$\varphi_i = \frac{1}{F_i} \quad \text{و} \quad i = e, o, r$$

۳- شبیه سازی و بهینه سازی

طول مناسب تلسکوپ از رابطهٔ $L = F_o - S_1 + S_2 + F_e$ بدست می آید، اما با توجه به محدودیت های طول دستگاه که نباید بیشتر از ۱۷ اینچ باشد و توان کل تلسکوپ که باید مقدار کمینه لحاظ شود F_O را نزدیک به ۷ اینچ (۱۷۸ mm) در نظر می گیریم. مجموعه ی شیئی تلسکوپ وگیرنده را جهت کاستن ابیراهی های کروی و رنگی از ترکیب دو تایی افام چسبیده شیشه های فلینت کراون BK7(۵۱۷۶۴۲) و F12(۶۴۸:۳۳۹) با دهانه ناپوشیده 40mm در نظر گرفته و از آنجا که لازم است قطر صفحهٔ تصویر در فاصلهٔ کانونی معینی بر روی آشکارساز به کمتر از ۲۰۰ میکرون محدود شود لذا از دوتایی از نوع فرانهوفر چسبیده (*Cemented Fraunhofer*) استفاده شده است[۲]. با توجه به میدان دید تعریف شده برای گیرنده که دو برابر واگرایی لیزر ارسالی یعنی $۲ \times ۰.۴ = ۰.۸\ mrad$ است، از رابطهٔ

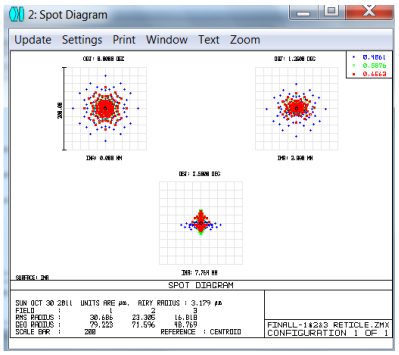
$$f.o.v = 2Arc\tan(\frac{D_i}{2f_o}) \qquad (۲-۶)$$

با فاصلهٔ کانونی $f_o = ۱۷۸\ mm$ برای مجموعه ی شیئی و قطر صفحهٔ تصویر D_i می توان نشان داد که برای لیزر برگشتی تا واگرایی ۰۸ میلی رادیان قطر تصویر همچنان کمتر از ۲۰۰ میکرون محقق می گردد. برای بدست آوردن توان هر یک از عناصر، روش تقریبی را در پیش گرفتیم. توان عنصر اول را ۱۱/۵۴ که تقریبا ۲ برابر عنصر دوم که یک عنصر منفی با توان ۵/۹۷- است در نظر گرفتیم. با در نظر گرفتن ملاحظات قطر، شعاع عناصر و انتخاب ضخامت مناسب برای ساخت، اطلاعات را در نرم افزار ZEMAX وارد کرده که شمای اپتیکی مجموعه ی مورد نظر را در شکل (۲) می بینید.



شکل (۲): شمای اپتیکی مجموعه ی شیئی و گیرنده

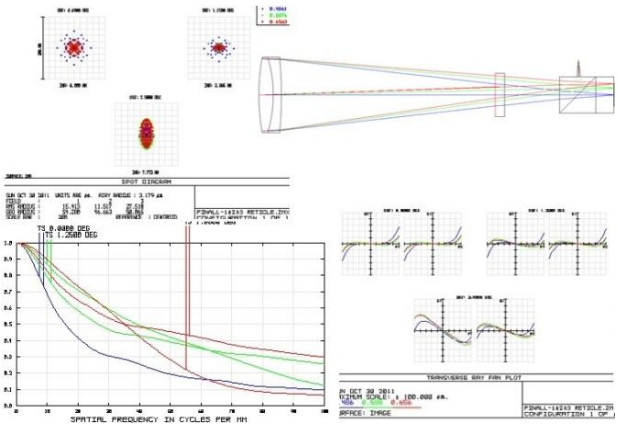
همچنین با توجه به اندازه قطر لکه در شکل (۳) چنین بر می آید که برای رسیدن به توان تفکیک زاویه ای مورد نظر، مجموعه نیاز به بهینه سازی دارد.



شکل (۳):نمودار اندازه قطر لکه مجموعه تصحیح نشده

بهینه سازی :

برای این کار با تعیین معیار اندازه قطر لکه (*RMS Spot Radius*) برای تابع مریت پیش فرض و تعریف عملگرهای کنترل فاصله ی کانونی (*EFFL*) و قطر لکه (*RSCH*) و عملگرهای محدود کننده ابعاد و ضخامت لنز از قبیل (*MNCG*) و (*MXCG*) و نیز عملگرهای کنترل لبه ی لنز (*MNEG*) و متغیر قرار دادن شعاع ها و ضخامت ها با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت اقدام به بهینه سازی مجموعه می نماییم[۳]، [۴]. نمودارهای برخورد پرتو و اندازه قطر لکه به همراه تابع انتقال مدولاسیون در شکل (۴) نشان داده شده است. برای رسیدن به توان تفکیک زاویه ای مورد نظر، جذر میانگین مربعی شعاع لکه را به ۱۵ میکرون در روی محور رسانده ایم که با شیب منحنی بسیار کم در نمودارهای برخورد پرتو کاملا مطابقت دارد.



شکل (۴):نمودارهای مختلف برای ارزیابی تصویر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

شیب منحنی در گوشه های تصویر برای نقاط خارج از محور(Off Axis) معادل مقدار اندکی کما است. همچنین درصد تابع انتقال مدولاسیون گـواه این است که به کیفیت مطلوب تصویر مورد نظر خود دست یافته ایم.

eidel Aberration Coefficients:

urf	SPHA S1	COMA S2	ASTI S3	FCUR S4	DIST S5
ΓO	0.024748	0.004901	0.000971	0.001472	0.000484
2	-0.096138	0.005916	-0.000364	-0.000360	0.000045
3	0.073471	-0.012063	0.001980	0.000885	-0.000471
4	-0.004956	0.001511	-0.000460	0.000000	0.000140
5	0.004647	-0.001416	0.000432	-0.000000	-0.000132
6	-0.001841	0.000561	-0.000171	0.000000	0.000052
7	-0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000	0.000000
8	0.000021	-0.000007	0.000002	-0.000000	-0.000001
MA	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ɔT	-0.000048	-0.000596	0.002389	0.001998	0.000118

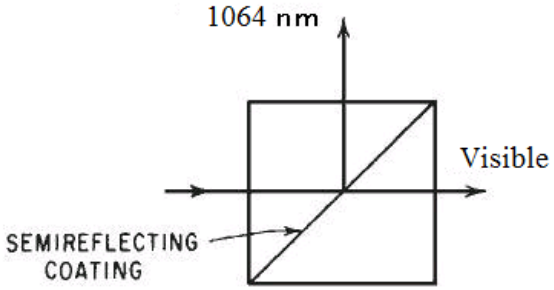
شکل (۵): داده های ابیراهی سیدل مرتبه سوم

پس از انجام بهینه سازی، و کاهش ابیراهی های کروی و کما و نزدیک کردن سیستم به حد پراش می بایست داده های طراحی را با توجه به اینکه ساخت ضخامت های عدسی و شعاع های انحناء تنها تا دو رقم اعشـار امکـان پـذیر است، آماده کنیم. این کار با تلورانس گذاری بر روی داده های سیستم ضمن ثابت نگه داشتن فاصله ی کانونی موثر و کنترل پارامترهای حساس انجام می شود.

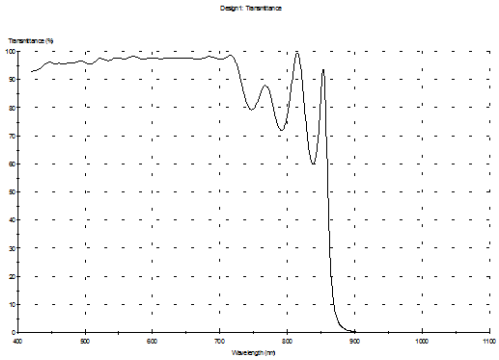
ساخت و لایه نشانی:

لنز های اپتیکی علاوه بر داشتن سطوحی با صافی سطح ۲۰ / λ دارای هم محوری ۱۷ ثانیه می باشند تا پرتو های نور با کمتـرین انحـراف بـه سـمت منشور های راست گوشه دوتابی شده هدایت شوند. در فرآیند ساخت ایـن منشورها سعی شده خطاها به حداقل خود برسد و در نهایت با دقت زاویه ای، هرمیت و انحراف پرتو کمتر از ۱۰ ثانیه ساخته شده اند به طوری که پـس از دوتابی نمودن نیز انحراف نور در آن ها به کمتر از ۱۵ ثانیه می رسد.

برای جدا سازی پرتو لیزر و طیف مریی از هم، از یک ساختار پرتو شکاف دو ناحیـه ای *splitter* (*Dichroic beam*) اسـتفاده شـده اسـت. در ایـن ساختار، یک پوشش ۲۰ لایه دی الکتریک از مواد اکسید سیلیکون و اکسید تیتانیوم برای تابش نور تحت زاویه ۴۵ درجه طراحی و ساخته شده انـد بـه طوری که عبورنور برای طیف مریی بیشتر از ۹۵٪ و بازتاب در طول مـوج ۱۰۶۴ nm نیز بیشتر از ۹۹٪ باشد. عنصر پرتو شکاف و نمودار پوشش در شکل (۶) و (۷) دیده می شود.



شکل (۶): عنصر پرتو شکاف



شکل (۷): نمودارلایه نشانی عنصر پرتو شکاف

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی طراحی و شبیه سازی وتلورانس گذاری و ساخت مجموعهٔ شیئی سامانه دو منظوره ی تلسکوپی دید مستقیم به همراه گیرندهٔ اپتیکی شرح داده شده است. طراحی مجموعه شیئی نخست با بکـارگیری اصول اولیه اپتیکی انجام گرفت. سپس به منظور بهینـه سـازی سیسـتم و رسیدن به توان تفکیک زاویه ای مورد نظر بـا انتخـاب پارامترهـای شـعاع و ضخامت به عنوان متغیر و اعمال عملگرهای مناسب برای کاهش قطر لکه و ابیراهی های سیستم و نیز کاهش قطر صفحهٔ تصویر تا ابعاد ناحیه حسـاس آشکارساز مجموعه به حد پراش نزدیک می شود. در ادامه پارامترهای متغیر مانند شعاع انحناء ، ضخامتها و فواصل بهینه، با تلورانس گـذاری و توجـه بـه نکات عملی فرآیند ساخت، آماده می شود. از آنجا که در این سـامانه هـر دو مجموعه ی تلسکوپی دید مستقیم و گیرنده لیزر بازگشتی، محـور اپتیکـی واحدی داشته و در یک مسیر واقع شده اند لذا نگرانی در خصوص هم محور سازی مجموعه وجود ندارد و از این حیث حـائز اهمیـت اسـت. همچنـین ساخت عناصر برای داشتن کمتـرین انحـراف در مجموعـه و لایـه نشـانی پرتوشکاف برای جداسازی نور لیزر از طیف مرئی از دقـت بـالایی برخـوردار است.

مراجع

[۱] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 3rd Edition, Mc Graw-Hill, 2000.
[۲]Robert E. Fischer,BT Galeb, PR.Yoder, *optical System Design*,Second Edition, Mc Graw-Hill, 2008.
[3] Zemax Manual, *Optical design program user guid*//2005.
[4] R.R.Shannon, *The Art and Science of Optical Desing*, Cambridge university press, 1997.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]