



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - 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

^۱صنعت سامانه های الکترواپتیکی، شرکت صنایع الکترونیک شیراز

^۲مرکز 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 Jahromi¹, Mohamadsadegh Jahanmiri¹, Esmaeel Zahedi², Abdolmajid Rezazadeh²

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.

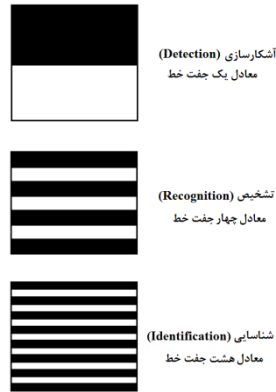
Keywords: Objective, Optical Receiver, Telescopic Sight

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 حوزه 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 مبادله 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 زیماکس (ZEMAX) و اسلو (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 نقطه 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 واجوبی هدف (DRI) در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تشخیص وسیله نقلیه با ابعاد استاندارد $2/3m \times 2/3m$ در فاصله $7 Km$ جدایی دو نقطه قابل تفکیک از هم باید $57/5 cm$ باشد. از اینرو توان تفکیک زاویه ای سامانه تلسکوپی $0/082 mrad$ به دست می آید.



شکل (۱): الگوی فرکانسی واجوبی 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 $3 mrad$ است [۲]. نسبت توان تفکیک زاویه ای چشم به توان تفکیک زاویه ای تلسکوپ حداقل بزرگنمایی سامانه را تعیین می کند:

$$M = \frac{0/3}{0/08} = 3/75 \quad (1-2)$$

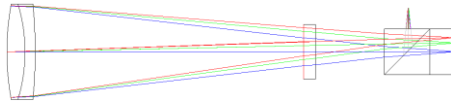
در عمل برای اینکه کاربری که از تلسکوپ استفاده می کند، دچار خستگی چشم نشود، بزرگنمایی را بین دو تا سه برابر انتخاب می کنند [۱]. به همین دلیل در این سامانه از بزرگنمایی ۱۰ برابر استفاده می شود.

قطر مردمک ورودی مجموعه شیئی:

قطر مردمک خروجی سامانه متناسب با قطر مردمک ورودی چشم در نظر گرفته می شود که از $8 mm$ در نور کم تا $2 mm$ در نور بسیار زیاد تغییر می کند، در نور معمول محیط برابر با $4 mm$ انتخاب می گردد. بنابراین با توجه به بزرگنمایی مجموعه، قطر ناپوشیده دهانه مردمک ورودی $40 mm$ بدست می آید. همچنین به دلیل صرفه جویی اقتصادی عدسی شیئی به عنوان دهانه بند مجموعه در نظر گرفته می شود [۱].

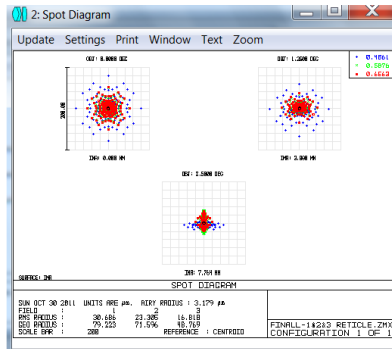
فاصله کانونی موثر مجموعه شیئی:

اگر F_o فاصله کانونی موثر مجموعه شیئی، F_e فاصله کانونی موثر مجموعه چشمی، F_r فاصله کانونی موثر مجموعه مستقیم کننده، M بزرگنمایی تلسکوپ، L طول تلسکوپ، R فاصله راحتی چشم و S_1 و S_2 همیوگ های



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

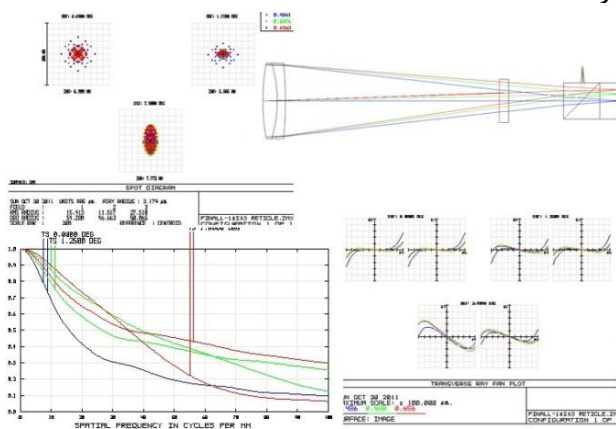
همچنین با توجه به اندازه قطر لکه در شکل (۳) چنین بر می آید که برای رسیدن به توان تفکیک زاویه ای مورد نظر، مجموعه نیاز به بهینه سازی دارد.



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 ضلخت لنز از قبیل (*MNCG*) و (*MXCG*) و نیز عملگرهای کنترل لبه ی لنز (*MNEG*) و متغیر قرار دادن شعاع ها و ضلخت 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 کاملاً مطابقت دارد



شکل (۴): نمودارهای مختلف برای ارزیابی تصویر

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

$$F_e = \frac{M^2 RL - F_0(M^2 R + L)}{M^2(R + L) - F_0(M - 1)^2} \quad (2-2)$$

$$S_1 = \frac{-F_0(L - F_0 - F_e)}{MF_e + F_0} \quad (2-3)$$

$$S_r = \frac{-S_1 MF_e}{F_0} \quad (2-4)$$

$$F_r = \frac{S_1 S_r}{S_1 - S_r} \quad (2-5)$$

$$\sum |\varphi| = |\varphi_o| + |\varphi_e| + |\varphi_r| \quad (2-6)$$

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

۳- شبیه سازی و بهینه سازی

طول مناسب تلسکوپ از رابطه $L = F_0 - S_1 + S_r + F_e$ 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_0 را نزدیک به ۷ اینچ (۱۷۸ mm) در نظر می گیریم. مجموعه ی شیئی تلسکوپ و گیرنده را جهت کاستن ابیراهی های کروی و رنگی از ترکیب دو تایی افام چسبیده شیشه های فلینت کرون BK7 (۵۱۷۶۴۲) و F12 (۶۴۸۳۳۹) با دهانه ناپوشیده ۴۰ mm در نظر گرفته و از آنجا که لازم است قطر صفحه تصویر در فاصله 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 میلان دید تعریف شده برای گیرنده که دو برابر واگرایی لیزر ارسالی یعنی $0.8 \text{ mrad} = 0.4 \times 2$ است از رابطه

$$f.o.v = 2 \text{Arc tan} \left(\frac{D_i}{2f_o} \right) \quad (2-6)$$

با فاصله کانونی $f_o = 178 \text{ mm}$ برای مجموعه ی شیئی و قطر صفحه تصویر D_i می توان نشان داد که برای لیزر برگشتی تا واگرایی ۰.۸ 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 تقریباً ۲ برابر عنصر دوم که یک عنصر منفی با توان ۵/۹۷- است در نظر گرفتیم. با در نظر گرفتن ملاحظات قطر، شعاع عنصر و انتخاب ضلخت مناسب برای ساخت اطلاعات را در نرم افزار ZEMAX وارد کرده که شمای اپتیکی مجموعه ی مورد نظر را در شکل (۲) می بینید

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

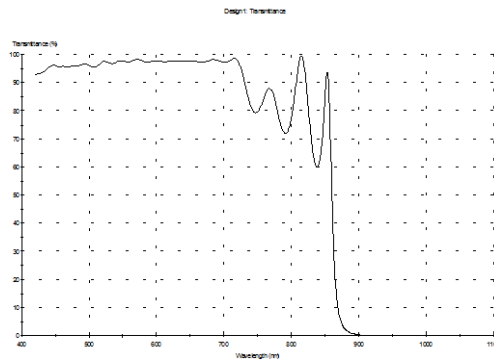


Table Aberration Coefficients:

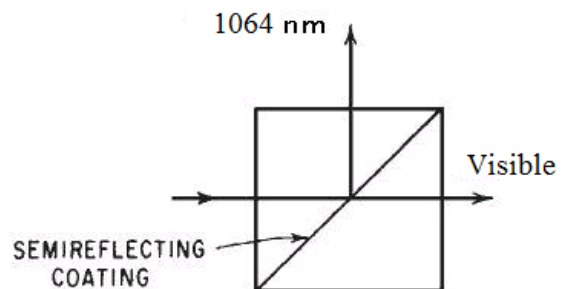
urf	SPHA S1	COMA S2	ASTI S3	FCUR S4	DIST S5
IO	0.024748	0.004901	0.000971	0.001472	0.000484
2	-0.096138	0.005916	-0.000364	-0.000360	0.000045
3	0.073471	-0.012063	0.001980	0.000885	-0.000471
4	-0.004956	0.001511	-0.000460	0.000000	0.000140
5	0.004647	-0.001416	0.000432	-0.000000	-0.000132
6	-0.001841	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
DT	-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 لحنه تنها تا دو رقم اعشار امکان پذیر 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 $\lambda/20$ دارای هم محوری ۱۷ ثابته می باشند تا پرتو های نور با کمترین انحراف به سمت منشور های راست گوشه دوتایی شده هدایت شوند در فرآیند ساخت این منشور ها سعی شده خطاها به حداقل خود برسد و در نهایت با دقت زاویه ای، هرمیت و انحراف پرتو کمتر از ۱۰ ثابته ساخته شده اند به طوری که پس از دوتایی نمودن نیز انحراف نور در آن ها به کمتر از ۱۵ ثابته می رسد. برای جدا سازی پرتو لیزر و طیف مرئی از هم، از یک ساختار پرتو شکاف دو ناحیه ای (Dichroic beam splitter) استفاده شده است. در این 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 اند به طوری که عبور نور برای طیف مرئی بیشتر از ۹۵٪ و بازتاب در طول موج 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): نمودار لایه نشانی عنصر پرتو شکاف

۴- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی طراحی و شبیه سازی و تلورانس گذاری و ساخت مجموعه شیئی سلمانه دو منظوره ی تلسکوپی دید مستقیم به همراه گیرنده اپتیکی شرح داده شده است. طراحی مجموعه شیئی نخست با بکارگیری اصول اولیه اپتیکی انجام گرفت سپس به منظور بهینه سازی سیستم و رسیدن به توان تفکیک زاویه ای مورد نظر با انتخاب پارامترهای شعاع و ضخامت به عنوان متغیر و اعمال عملگرهای مناسب برای کاهش قطر لکه و ابیراهی های سیستم و نیز کاهش قطر صفحه تصویر تا بعد ناحیه حساس آشکارساز مجموعه به حد پراش نزدیک می شود. در ادامه پارامترهای متغیر مانند شعاع لحنه، ضخامتها و فواصل بهینه با تلورانس گذاری و توجه به نکات عملی فرآیند ساخت، آماده می شود. از آنجا که در این سلمانه هر دو مجموعه ی تلسکوپی دید مستقیم و گیرنده لیزر بازگشتی، محور اپتیکی واحدی داشته و در یک مسیر واقع شده اند لذا نگرانی در خصوص هم محور سازی مجموعه وجود ندارد و از این حیث حائز اهمیت است. همچنین ساخت عناصر برای داشتن کمترین انحراف در مجموعه و لایه نشانی پرتو شکاف برای جداسازی نور لیزر از طیف مرئی از دقت بالایی برخوردار 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.
- [۳] Zemax Manual, *Optical design program user guide*//2005.
- [۴] R.R. Shannon, *The Art and Science of Optical Desing*, Cambridge university press, 1997.