



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## طراحی و شبیه سازی سیستم اپتیکی حسگر ردیاب ستاره با استفاده از نرم افزار

### ZEMAX

حامد آریان فرد ، حامد قامت، بهروز رئیسی

گروه حسگرهای فضایی، پژوهشگاه مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

چکیده - سیستم اپتیکی، بخش مهمی از فناوری ردیاب های ستاره است، تعداد قطعات اپتیکی به کار رفته باید برای تسهیل پردازش و مونتاژ با حفظ کارایی به حداقل برسد. علاوه بر این، جرم و حجم ردیاب ستاره را می توان با کاهش ابعاد محوری و شعاعی سیستم اپتیکی کوچک کرد. در این مقاله به تبعیت از سیستم های اپتیکی نانوحسگرهای ستاره مانند ST-16 (ساخت شرکت Sinclair Interplanetary) و حسگر تصویر پیکسل فعال CMOS انتخابی (مدل MT9P031) ، سیستم اپتیکی مورد نظر، طراحی، شبیه سازی و بهینه سازی شده است.

کلید واژه- ردیاب ستاره، سیستم اپتیکی کامپکت، ابیراهی، بهینه سازی، ارزیابی کیفیت تصویر.

## Designing and Simulation of the Optical System of the Star Tracker Sensor, Using the ZEMAX Software

Hamed Arianfard ([h.arianfard@isrc.ac.ir](mailto:h.arianfard@isrc.ac.ir)), Hamed Ghamat ([hamedghamat@gmail.com](mailto:hamedghamat@gmail.com))  
Behrooz Raeisy ([b.raeisy@isrc.ir](mailto:b.raeisy@isrc.ir))

Space Sensor Group, Institute of Mechanics Iranian Space Research Center

**Abstract-** optical system is an important part of star tracker technology, the number of optical components used must be minimized to facilitate processing and assembly, while maintaining efficiency. Additionally, the mass and volume of the star tracker can be reduced by reducing the axial and radial dimensions of the optical system. In this paper, following the use of Star nano-sensor optical systems such as ST-16 (manufactured by Sinclair Interplanetary) and selected CMOS active pixel image sensor (MT9P031 model), the desired optical system, is designed, simulated and optimized.

Keywords: Star Tracker, Compact Optical System, aberration, Optimization, Image quality evaluation

## مقدمه

فناوری ردیاب ستاره شامل توسعه سیستم اپتیک، پردازش تصویر و تطبیق الگوی ستاره ها می باشد. در این بین، طراحی سیستم اپتیک بخش مهمی از آن را شامل می شود. هر سیستم اپتیک دارای پارامترهای عملکردی مختلفی است که کیفیت آن با استفاده از این پارامترها، قابل ارزیابی هستند. میدان دید وسیع، جرم پایین، حجم کم و دقت بالا اهمیت بسزایی را در تحقیق و توسعه ردیاب های ستاره دارند [۱]. طراحان اولیه براساس تئوری زایدل پی بردند که سیستم اپتیک با تقارن جلو به عقب می تواند ابیراهی های کما، اعوجاج و رنگ جانبی را حذف کند [۲]. در سال ۱۹۸۰ والتر ماندلر<sup>۱</sup> فرایندی را برای طراحی لنزهای گوسی دوگانه ارائه داد، که اغلب به عنوان ساختار پایه و مدرن برای طراحی لنزهای گوسی دوگانه در نظر گرفته می شود [۳]، که اساس طراحی سیستم اپتیک مدنظر ما می باشد. در این مقاله، بر اساس الزامات سیستم اپتیک مربوط به حسگر ستاره، ساختار اولیه و مواد سیستم اپتیک، و سپس بهینه سازی ساختار سیستم اپتیک انجام شده است. عملکرد تصویربرداری سیستم اپتیک با استفاده از منحنی های نمودار لکه، نمودار غلظت انرژی، نمودار تابع انتقال مدولاسیون منحنی های ابیراهی ارزیابی شده اند.

## پارامترهای عملکردی سیستم اپتیک

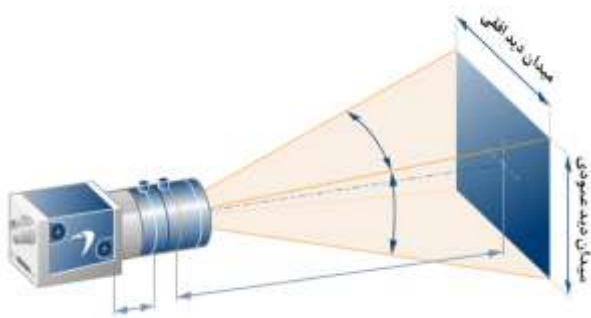
از آنجایی که پارامترهای عملکردی سیستم اپتیک بایستی برای کاربردهای مورد نظر تعیین شوند، بنابراین بایستی مقدار طول کانونی سیستم اپتیک را با توجه به ابعاد حسگر تصویر و میدان دید انتخاب شده بدست آورد.

ابتدا مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم اپتیک هدف را بدست آوردیم. اندازه پیکسل حسگر تصویر انتخابی (مدل MT9P031) برای حسگر ستاره مورد نظر  $2.2\mu m \times 2.2\mu m$  است [۲]. زیرا ویژگی های این حسگر کاملاً سازگار با کاربردهای فضایی است. بنابراین بایستی مقدار طول کانونی سیستم اپتیک را با توجه به ابعاد حسگر تصویر و میدان دید انتخاب شده (FOV)، بدست آورد. اگر پهنا و ارتفاع مانیتور به ترتیب  $t_v$  و  $t_h$  در نظر گرفته شوند، آنگاه داریم:

$$\tan\left(\frac{FOV_v}{2}\right) = \frac{t_v}{2f} \quad (1)$$

$$\tan\left(\frac{FOV_h}{2}\right) = \frac{t_h}{2f} \quad (2)$$

که  $f$  بیان کننده طول کانونی و  $FOV_v$ ،  $FOV_h$  میدان های دید عمودی و افقی هستند. از آنجا که میدان دید به قدر ستاره ها هم وابسته است، برای اینکه حداقل سه ستاره در میدان دید ردیاب ستاره وجود داشته باشد (قدر آستانه +۶) ما میدان دید  $15^\circ \times 20^\circ$  را انتخاب کردیم [۵]. بنابراین طبق روابط ۱ و ۲، طول کانونی موثر سیستم اپتیک در حدود ۱۶ میلی متر بدست می آید. از طرفی عدد F (F#) سیستم های اپتیک مربوط به ردیاب ستاره نیز بایستی بین ۱ تا ۲ باشد [۶]. بنابراین با توجه به مقادیر مربوط به دو پارامتر کلیدی سیستم و اینکه طیف انتقال سیستم ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر باشد طراحی و بهینه سازی سیستم اپتیک را انجام دادیم.



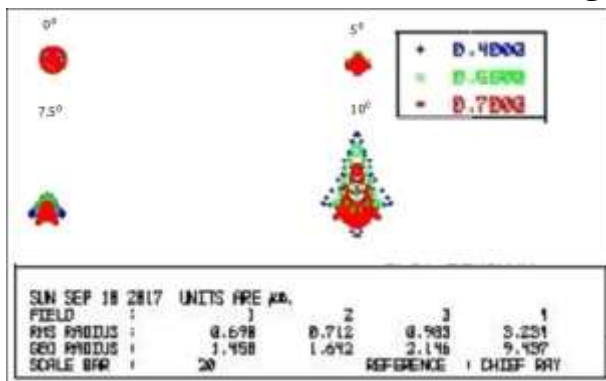
شکل ۱: شماتیک میدان دید افقی و عمودی سیستم اپتیک ردیاب ستاره.

## طراحی سیستم اپتیک

برای طراحی سیستم اپتیک مدنظر، برخی ساختارهای اپتیک موجود به عنوان ساختار اولیه بررسی شدند [۶-۸]. در سیستم اپتیک ردیاب ستاره، ما باید ابیراهی های کروی، آستیگماتیسم، و رنگی را به حداقل برسانیم. همچنین ابیراهی محور عمودی اثر بزرگی را در موقعیت مرکزی تصویر دارد. برای مواد با ضریب شکست بالا، ابیراهی کروی کوچکتر است. همچنین، لنزهای اپتیک با ضریب شکست بالا نیاز به ضخامت کمتری دارند و کوچک سازی سیستم اپتیک را برآورده می کنند. به همین دلیل از شیشه ی فلینت که دارای ضریب شکست بالا است استفاده شد. از طرفی برای کاهش ابیراهی رنگی از

<sup>1</sup> Walter Mandler

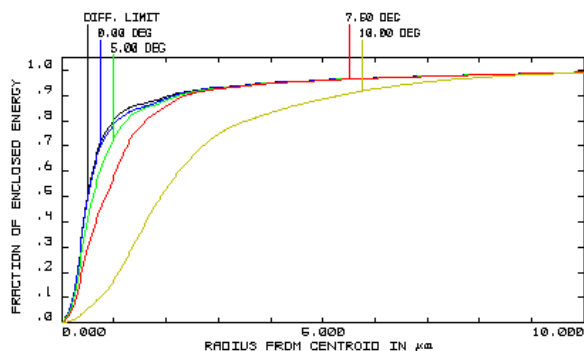
باشد [۸]. همچنین اختلاف شعاع لکه (rms) در میدان دیدهای مختلف نباید بیش از حد بزرگ باشد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده، شعاع rms نمودار لکه برای میدان دید اول و دوم در حدود ۰/۷ میکرومتر، میدان دید سوم در حدود ۱ میکرومتر و میدان دید چهارم در حدود ۳/۲ میکرومتر است. از آنجایی که سایز پیکسل حسگر تصویر ۲/۲ میکرومتر است، بنابراین اندازه لکه الزامات سیستم اپتیکی ردیاب ستاره را برآورده می کند.



شکل ۳: نمودار لکه سیستم اپتیکی

## ۲- منحنی توزیع انرژی

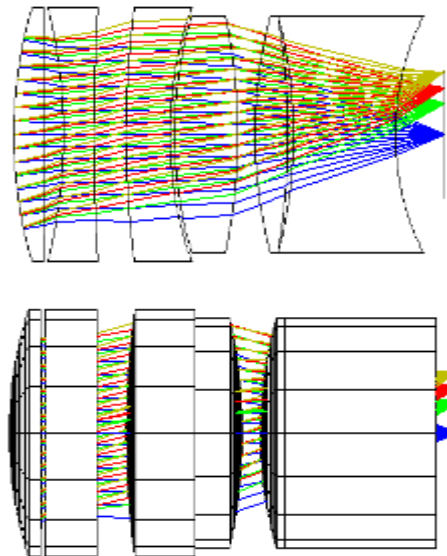
انرژی محصور شده، درصدی از انرژی، به عنوان تابعی از قطر تصویر، برای بررسی کیفیت تصویر می باشد. برای سیستم اپتیکی ردیاب ستاره، بایستی ۸۰ درصد انرژی محصور در قطر کمتر از دو تا سه پیکسل باشد [۸]. مطابق شکل ۴ برای میدان دید کامل ۸۰ درصد توزیع غلظت انرژی در قطر کمتر از ۶/۸ میکرومتر قرار گرفته است. بنابراین سیستم اپتیکی ارائه شده الزامات ردیاب ستاره را برآورده می کند.



شکل ۴: منحنی توزیع غلظت انرژی سیستم اپتیکی

## ۳- تابع انتقال مدولاسیون (MTF)

شیشه کراون که دارای ضریب شکست پایین است استفاده کردیم. با توجه به شکل ۲، در سیستم اپتیکی شش لنز، که از سمت چپ، شیشه کراون ULTRAN30، شیشه فلینت BAFN6، شیشه فلینت SF3، شیشه فلینت N-LAF2، شیشه فلینت N15 و شیشه کراون KDP به ترتیب قرار دارند. مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم اپتیکی در جدول ۱ آورده شده.



شکل ۲: پیکربندی ساختار سیستم اپتیکی ارائه شده.

جدول ۱: عملکرد سیستم اپتیکی اولیه

میدان دید	$20^\circ \times 15^\circ$
طول کانونی موثر	۱۶ میلی متر
F#	۱/۸۸
بازه طیفی	۴۰۰ - ۷۰۰ میکرومتر
طول موج مرکزی	۵۵۰ نانومتر

## بررسی عملکرد سیستم اپتیکی

برای ارزیابی کیفیت تصویر و عملکرد سیستم اپتیکی مورد نظر، نمودار نقطه ای، غلظت انرژی، تابع انتقال مدولاسیون و منحنی های ابیراهی در نقاط محور ( $0^\circ, 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ$ ) بررسی شده اند.

### ۱- نمودار لکه

نمودار لکه، تصویر هندسی شکل گرفته، در هنگام تصویربرداری از یک جسم نقطه ای می باشد. دقت اندازه لکه تصویر ستاره باید کمتر از ۲ یا ۳ برابر اندازه پیکسل حسگر تصویر مورد نیاز

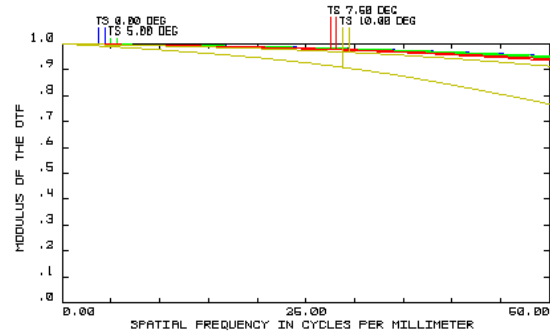
## نتیجه گیری

ساختار سیستم اپتیکی ارائه شده، از شش لنز مثبت و منفی تشکیل شده است. سیستم اپتیکی فوق دارای میدان دید وسیع  $15^\circ \times 20^\circ$ ، طول کانونی مؤثر ۱۶ میلی متر، F# برابر ۱/۸۸ می باشد. طول کلی سیستم اپتیکی برابر ۳۰/۱ میلی متر است. سیستم فوق دارای ساختار ساده و تعداد لنزهای کمتری نسبت به سیستم های اپتیکی مشابه می باشد. بنابراین سیستم فوق دارای جرم و حجم مناسبی برای استفاده در حسگرهای ردیاب ستاره کوچک است. مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم اپتیکی ارائه شده الزامات کاربردی مربوط به حسگر ستاره را برآورده می کند.

## مرجع ها

- [1] C. H. L. Ma, X. Wang, and D. Dai, "Advances and accuracy performance of the star trackers," in *Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*, 2013.
- [2] R. P. Jonas and M. D. Thorpe, "Double Gauss Lens Design: A Review of Some Classics Using Modern Methods," in *International Optical Design*, Vancouver, 2006, p. MB2.
- [3] W. Mandler, "Design Of Basic Double Gauss Lenses," *Proc. SPIE 0237, 1980 International Lens Design Conference*, 1980, pp. 222-233.
- [4] J. Enright, D. Sinclair, and Ch. Fernando, "COTS Detectors for Nanosatellite Star Trackers: A Case Study," in *Small Satellite Conference*, 2011.
- [5] I. S. Kruzilov, "Evaluation of instrument stellar magnitudes without recourse to data as to star spectral classes," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 6, pp. 063537-1-063537-11, 2012.
- [6] M. Moldabekov, D. Akhmedov, S. Yelubayev, V. Ten, B. Albazarov, A. Shamro, et al., "Features of design and development of the optical head of star tracker," *Proc. SPIE 9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*, pp. 924122-924122-11, 2014.
- [7] S. Thibault and M. Wang, "Fast camera objective designs for spectrograph of Mont Megantique telescope," *Proc. SPIE 5249, Optical Design and Engineering*, pp. 122-133, 2004.
- [8] S. Wang and Y. Geng, "Large field and high precision optical system for star tracker," in *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pp. 484-489, 2014.

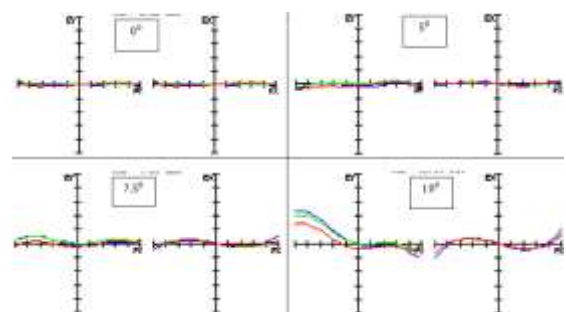
تابع انتقال مدولاسیون (MTF) به عنوان بهترین شاخص ارزیابی کیفیت تصویر سیستم اپتیکی در طراحی اپتیکی مدرن شناخته شده است. MTF انتقال مدولاسیون از شی به تصویر توسط لنز را به عنوان تابعی از فرکانس فضایی ارائه می دهد. یک معیار برای عملکرد عالی (معیاری که اغلب به عنوان یک هدف طراحی برای لنزهای دوربین فیلمبرداری حرفه ای استفاده می شود) این است که ۵۰ درصد MTF را در مقدار فرکانس فضایی ۵۰ جستجو کنید. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده، برای سیستم فوق بالای ۷۷ درصد MTF تمام میدان در فرکانس  $50 \text{ cycles/mm}$  وجود دارد. بنابراین سیستم اپتیکی ارائه شده الزامات ردیاب ستاره را برآورده می کند.



شکل ۵: نمودارهای MTF سیستم اپتیکی ارائه شده.

## ۴-نمودارهای ابیراهی پرتو

شکل منحنی ابیراهی پرتو می تواند نشان دهد که چه نوع ابیراهی در سیستم اپتیکی برای میدان دید وجود دارد. نمودارهای ابیراهی چهار میدان دید در طول موج های مختلف سیستم اپتیکی ارائه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. محور افقی شعاع پرتو و محور عمودی ابیراهی رنگی جانبی را نشان می دهد. سمت چپ مربوط منحنی های ابیراهی مماسی و سمت راست مربوط به منحنی های ابیراهی ساجیتال است. طبق شکل ۵ ابیراهی های سیستم اپتیکی مورد نظر به صورت بهینه برطرف شده است.



شکل ۶: منحنی های ابیراهی پرتو سیستم اپتیکی بهینه شده