



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



طراحی تلسکوپ چند طیفی فشرده متشکل از تلسکوپ کاسگرین و یک توری پراش بیضوی مقعر

نجما معصومی^۱، مرضیه افخمی^۲، عبدالناصر ذاکری^{۳*}

^۱بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، hide.felavin@gmail.com
^۲گروه تحقیقاتی سنسورها، پژوهشکده مکانیک، شیراز، ایران، marziafkhamsi@gmail.com
^{۳*}بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، zakeri@susc.ac.ir

چکیده - هدف ما در این مقاله طراحی یک تلسکوپ چند طیفی بهینه با کمترین ابیراهی و حجم ممکن و بالاترین کیفیت تصویر در منطقه طول موج مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) با میدان دید ۰-۳ درجه در محدوده طول موج ۰/۴۸-۰/۸۲ میکرومتر است. طراحی و شبیه سازی یک تلسکوپ چند طیفی فشرده جدید با تلسکوپ کاسگرین و یک توری مقعر بیضوی عبوری در نظر گرفته شده است که دارای حجم کم و وزن کم با ساختار ساده است. این طراحی جدید بدون نیاز به عدسی صاف کننده میدان است و کیفیت تصویر خوبی نسبت به سایر طراحی های تلسکوپ چند طیفی که تاکنون گزارش شده است دارد. برای این منظور ابتدا تلسکوپ اشمیت کاسگرین طراحی شد. توری مقعر بیضوی عبوری می تواند تعداد اجزای نوری را کاهش دهد. این تلسکوپ چند طیفی شبیه سازی شده می تواند تصاویر را دریافت کند و اطلاعات طیفی را به دست آورد. نمودار تابع انتقال مدولاسیون (MTF) برای بررسی کیفیت تصویر، نمودار نقطه ای برای نشان دادن جدایی طیف ها و نمودار انحنای میدان برای بررسی ابیراهی های سیستم گزارش شده است. نتایج نشان می دهد که وضوح طیفی با کیفیت تصویر عالی با کمترین ابیراهی ممکن حاصل شده است.

کلید واژه- تلسکوپ چند طیفی فشرده، توری مقعر بیضوی، MTF، انحنای میدان، ابیراهی.

Design of compact multi-spectral telescope consisting of Cassegrain- telescope and a concave elliptical grating

NAJMA MASOOMI¹, MARZIEH AFKHAM², AND ABDOLNASER ZAKERY^{3*}

¹Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71946-24795, Iran

²Sensor Research Group, Institute of Mechanics, Shiraz, Iran

³Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71946-24795, Iran

hide.felavin@gmail.com

marziafkhamsi@gmail.com

[*zakeri@susc.ac.ir](mailto:zakeri@susc.ac.ir)

Abstract- Our aim in this paper is to design an optimal multispectral telescope with the lowest possible aberration and volume and the highest image quality in the near-visible and infrared wavelength region (VNIR) with a field of view of 0-3 degrees in the wavelength range of 0.48-0.82 micrometers. The new design and simulation is a compact multispectral telescope with the Cassegrain telescope and a concave elliptical grating with low volume and lightweight with a simple structure. This new design is without the need for a field-sharpening lens and has

better image quality than other multispectral telescope designs reported so far. For this purpose, the Schmidt Cassegrain Telescope was first designed. The transitional elliptical concave grating can reduce the number of optical components. This simulated multispectral telescope can receive images and obtain spectral information. Modulation transfer function diagrams (MTFs) are reported to check image quality, point diagrams to show spectral separation, and field curvature diagrams to report system aberration. The results show that spectral resolution with excellent image quality is achieved with the least possible aberration.

Keywords: Compact multispectral telescope, Elliptical concave grating, MTF, Field curvature, Aberration.

مقدمه

تلسکوپ چند طیفی در برخی زمینه‌های تحقیقاتی مانند رصد زمین و سنجش از دور، کشاورزی و بررسی معادن اهمیت دارد [۱]. با توسعه سریع فناوری الکترونیک و ارتباطات، تلسکوپ چند طیفی فشرده مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲] و ضرب المثل "سریع تر، کوچکتر و ارزان تر" روند فعالیت‌های سنجش از دور و رصد زمین را تحت تاثیر قرار داده است.

۱. نقش توری پراش بیضوی در طراحی تلسکوپ چند طیفی:

برای طراحی یک سیستم چندطیفی، می‌توانیم از توری پراش محدب یا مقعر استفاده کنیم. ساخت یک توری پراش محدب دشوار است و تعداد دستگاه‌های نوری به دلیل استفاده از عدسی افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش اندازه سیستم می‌شود، کنترل ابیراهی‌ها دشوار می‌شود و کیفیت تصویر نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از توری‌های مقعر می‌توانیم این مشکلات را حل کنیم. توری پراش مقعر با حذف عناصر نوری اضافی سیستم را فشرده می‌کند. همچنین با کاهش ابیراهی سیستم، بازدهی پراش افزایش یافته و باعث بهبود خواص سیستم نوری می‌شود. در این مقاله، ما استفاده از یک توری پراش مقعر بیضوی را برای طراحی تلسکوپ چند طیفی در VNIR پیشنهاد می‌کنیم، و نشان می‌دهیم که با یک طراحی بسیار ساده، سیستم فشرده‌تر می‌شود و نمودارهای MTF و انحنای میدان تا حد زیادی بهبود می‌یابد. همچنین با کاهش ابیراهی‌های

سیستم باعث افزایش بهره پراش و بهبود خواص سیستم نوری می‌شود. یکی از معایب توری پراش مقعر کروی، وجود آستیگماتیسم قابل توجه است که استفاده از توری‌های پراش محدب به جای توری‌های پراش مقعر کروی، برای اصلاح این نقیصه، به صورت تئوری (۳) پیشنهاد شده است. یکی از راه‌های حذف ابیراهی آستیگماتیسم، استفاده از توری پراش مقعر بیضی است. توری پراش مقعر بیضوی دارای خواص نوری بهتر، ابیراهی آستیگماتیسم و ابیراهی کروی بسیار کمتر و همچنین وضوح طیفی بهتر از توری پراش مقعر کروی، در یک طول موج مشخص، است. توری بیضوی، یک سطح بیضوی است که به صورت یک عبارت چند جمله‌ای تعریف می‌شود. خطوط توری یا به یک اندازه فاصله دارند یا به صورت یک فاصله متغیر با استفاده از یک چهار جمله‌ای تعریف شده اند. فاصله متغیر خطوط توری-های پراش از طریق پارامتر بدون بُعد α طبق معادله زیر تغییر می‌یابد:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_0} + \alpha y \quad (1)$$

در معادله بالا F فرکانس موثر (خط در میکرون)، F_0 فرکانس ثابت عددی است (یعنی 0.1 خط در میکرون)، y مختصات در امتداد محور اپتیکی توری و α مربوط به تغییرات دوره‌ای بین دو طرف مقابل توری است.

اشعه‌های ردیابی شده از توری خطی طبق معادله (۲) شکسته می‌شوند:

$$n_2 \sin \theta_2 - n_1 \sin \theta_1 = \frac{M\lambda}{d} = M\lambda T \quad (2)$$

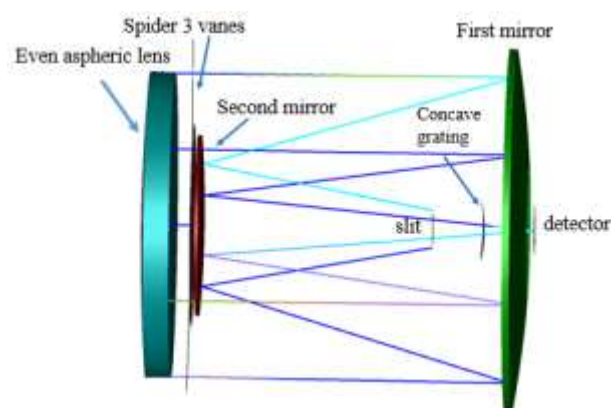
شده است. تلسکوپ طراحی شده به گونه‌ای است که با این عدد کانونی، کمترین طول را داشته و کاملاً فشرده است.

جدول ۱: مشخصات اپتیکی تلسکوپ چند طیفی فشرده با توری مقعر بیضی

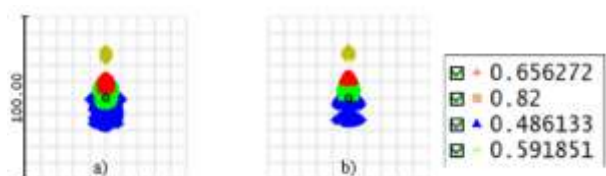
Parameter	Value
Working range (nm)	۴۸۰-۸۲۰
Field of view (degrees)	۰° و ۳°
F-number	۲/۷۶
Total length (cm)	۷/۷۲
Concave grating thickness (cm)	۰/۹۹

۲. طراحی تلسکوپ چند طیفی و نمودارهای به-دست آمده:

تلسکوپ چند طیفی، با استفاده از تلسکوپ کاسگرین و توری پراش مقعر بیضی، در محدوده طول موج‌های مرئی و نزدیک به فروسرخ (VNIR) در شکل ۱ طراحی شده است.



شکل ۱: شبیه‌سازی تلسکوپ چند طیفی فشرده با توری مقعر



شکل ۲: نمودار اندازه نقطه برای تلسکوپ چند طیفی با استفاده از توری مقعر برای میدان‌های دید مختلف (a) ۰ درجه و (b) ۳ درجه

که d فاصله موثر توری (بر حسب میکرومتر)، θ_1 زاویه شکست، θ_2 زاویه برخورد، M مرتبه پراش، λ طول موج (همیشه بر حسب میکرومتر)، n_1 و n_2 ضرایب شکست قبل و بعد از توری، و T فرکانس توری موثر (بر حسب تعداد خطوط در واحد میکرومتر) است. در نرم‌افزار OpticStudio فرکانس موثر توری پراش (T) از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{T} = d_{\text{eff}} = \frac{1}{T_0} + \alpha y + \beta y^2 + \Gamma y^3 + \Delta y^4 + \varepsilon y^5 \quad (2)$$

در این نرم‌افزار، مشخصات شکل سطح یک بیضی با اصطلاحات چند جمله‌ای کروی توسط معادلات زیر بیان می‌شود:

$$Z = \frac{cu^2}{1 + \sqrt{1 - u^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y) \quad (3)$$

$$u^2 = a^2 x^2 + b^2 y^2 \quad (4)$$

در این عبارات، x ، y و z مختصات سطح قطع کننده پرتو، a ، b و c ضرایبی هستند که شکل بیضی را تعریف می‌کنند. در این شبیه‌سازی از تابع Merit برای بهینه‌سازی داده‌ها استفاده کردیم. در شبیه‌سازی، a ، b و c تبدیل به متغیر شده و اعداد زیر حاصل شدند:

$$a = 1/82 \quad b = 0/4 \quad c = -1/73$$

ما از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای به دست آوردن شعاع و ضخامت مناسب و نیز مقادیر a ، b ، c استفاده کردیم. در جدول زیر، مشخصات اپتیکی تلسکوپ طراحی شده بیان

که مشاهده می‌شود، میزان انحنای آنها کم شده و کاهش این ابیراهی‌ها باعث بهبود کیفیت تصویر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی یک تلسکوپ چند طیفی بهینه، با کمترین ابیراهی و حجم ممکن، و نیز بالاترین کیفیت تصویر در منطقه طول موج مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) با میدان دید ۰-۳ درجه در محدوده طول موج ۰/۴۸-۰/۸۲ میکرومتر، با یک طراحی ساده ارائه شده است. در طراحی این تلسکوپ چند طیفی از توری پراش بیضوی مقعر استفاده شده است، که به دلیل ویژگی بیضوی گونه خود، باعث کاهش ابیراهی‌های سیستم و تعداد عناصر اپتیکی به کار رفته و در نهایت فشرده‌تر شدن سیستم شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تلسکوپ طراحی شده کیفیت تصویر خوبی را ارائه می‌نماید. تلسکوپ مذکور قابل استفاده در برخی زمینه‌های تحقیقاتی مانند رصد زمین و سنجش از دور، تصویر برداری از مزارع کشاورزی و نیز بررسی معادن است.

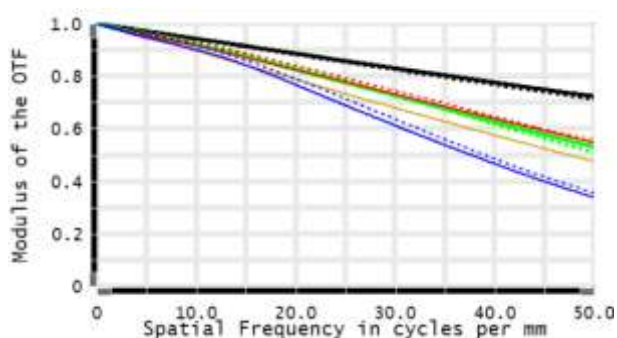
سپاسگزاری

این پروژه با همکاری سازمان تحقیقاتی پژوهشکده مکانیک انجام شده و مراتب سپاس از همکاری با این سازمان را داریم.

مرجع‌ها

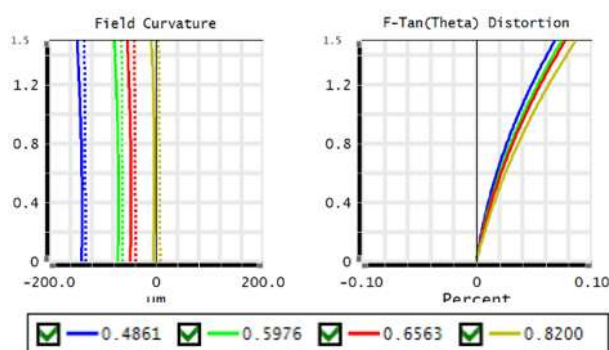
- [1] Kurihara J, Takahashi Y, Sakamoto Y, Kuwahara T, Yoshida K. HPT: A high spatial resolution multispectral sensor for microsatellite remote sensing. *Sensors*. 2018;18(2):619.
- [2] Costes V, Cassar G, Escarrat L, editors. Optical design of a compact telescope for the next generation earth observation system. International Conference on Space Optics—ICSO 2012; 2017: International Society for Optics and Photonics.
- [3] Das N, Murty M. Flat field spectrograph using convex holographic diffraction grating and concave mirror. *Pramana*. 1986;27(1):171-92.

شکل ۲، تفکیک طیفی انجام شده توسط تلسکوپ طراحی شده، به ازای طول موج‌های مشخص شده، نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار MTF برای تلسکوپ چند طیفی با استفاده از توری پراش مقعر برای میدان دید ۳ درجه

شکل ۳، نمودار MTF برای تلسکوپ چند طیفی طراحی شده، به ازای طول موج‌های مختلف معرفی شده در شکل ۲، نشان می‌دهد. برای بررسی کیفیت تصویر از طریق نمودار MTF باید مقادیر MTF به دست آمده، در فرکانس نایکوئیست از ۰/۲ بیشتر باشد. نمودار به دست آمده به دلیل وجود ابیراهی‌های سیستم همیشه از خط حد پراش فاصله دارد اما هر چه نمودار به دست آمده به خط حد پراش نزدیکتر باشد، کیفیت تصویر بهتر است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر MTF به ازای تمام طول موج‌های مشخص شده در فرکانس نایکوئیست ۵۰، از ۰/۲ بیشتر طراحی شده می‌باشد.



شکل ۴: نمودارهای انحنای میدان و اعوجاج تلسکوپ چند طیفی فشرده با توری مقعر

شکل ۴ نمودار ابیراهی‌های انحنای میدان و اعوجاج در تلسکوپ چند طیفی طراحی شده را نشان می‌دهد. همانطور