



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



طراحی اپتیکی طیف‌سنج چند شیئی با توان تفکیک بالا برای تلسکوپ رصدخانه ملی ایران

سارا خداجوی کویشاهی^۱؛ معصومه دشتدار^۲

^۱دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی؛ تهران اوین

^۲رصدخانه ملی ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

چکیده- هدف این پژوهش طراحی سیستم اپتیکی است که بتواند از خروجی تلسکوپ رصد خانه ملی ایران با قطر ۳/۴ متر، طیف و تصویر بگیرد. طیف‌سنج چند شیئی مورد نظر که با نرم افزار زیمکس طراحی شده است، دارای توان تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ بوده و برای بازه بسیار بزرگ طیفی ۳۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر بهینه شده است. به عبارت دیگر این طیف‌سنج طیف‌های ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسرخ را تا حد بسیار مطلوبی تفکیک می‌کند. این سیستم که برای میدان دید ۶ دقیقه قوسی در آسمان بهینه شده است، قابلیت آن را دارد که ۹۸ درصد انرژی دریافت شده را در فضای ۲ × ۲ پیکسل از آشکارساز محصور نماید و همچنین تمامی سطوح کروی بکاررفته در این طیف‌سنج، ضمن کاهش هزینه‌های ساخت، فرایند ساخت آن را نیز تسهیل می‌کنند. در این پژوهش ضمن شرح جزئیات بخش‌های مختلف این طیف‌سنج، به بیان قابلیت‌های آن پرداخته خواهد شد.

کلید واژه- توان تفکیک، زیمکس، سیستم اپتیکی، طیف‌سنج، میدان دید.

The Optical Design of a Multi Object and high Resolution Spectrometer for Iranian National Observatory Telescope

Sara Khodajoye Kavishahi¹; Masoomeh Dashtdar^{1, 2}

¹Department of Physics, Shahid Beheshti University; Tehran, Evin

²Iranian National Observatory, Institute for research in fundamental science (IPM)

Abstract- Our goal in this research is to design an optical system that can take the spectrum and picture of the Iranian National Observatory (INO) telescope output with a diameter of 3/4 meter. This multi object spectrometer that is designed by Zemax software has a spectral resolution of about 4000, and has been optimized for 350 to 950 nm spectral range. In other words, this spectrometer separate, very good, ultraviolet, visible and infrared region of the spectrum. This system is optimized for 6 arc min field of view in the sky. The system also has the capability to enclosure 98% of the received energy in the space of 2 × 2 pixels of the detector. Also, all surfaces are spherical that reduce cost and facilitate fabrication. In this paper, we present a detailed description of different sections of the spectrometer and its capabilities.

Keywords: Spectral resolution, Zemax, Optical system, Spectrometer, Field of view.

۱- مقدمه

طیف‌سنجی از دیرباز یکی از مهمترین ابزارهای در دسترس منجمان برای انجام محاسبات نجومی و کیهانی در فضا است که این امر تنها با در دست داشتن طیف‌سنج‌های دقیق قابل دسترسی است. طیف‌سنج‌ها متناسب با اهداف نجومی، در بازه‌های طیفی متفاوت، با قدرت تفکیک مختلف، به صورت تک شیئی یا چند شیئی (توانایی طیف‌سنجی چند هدف نجومی را هم زمان دارد) طراحی شده‌اند. در این مقاله برای اولین بار طیف‌سنج چند شیئی برای تلسکوپ رصدخانه ملی ایران طراحی شده است. این طیف‌سنج برای میدان دید ۶ دقیقه قوسی بهینه شده و دارای توان تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ است، که در گروه طیف‌سنج‌ها با توان تفکیک بالا قرار می‌گیرد. گفتنی است که تمامی طیف‌سنج‌هایی که با چنین توان تفکیکی تاکنون برای تلسکوپ‌های مختلف دنیا طراحی شده‌اند، بازه طیفی بسیار محدودی را تحت پوشش قرار می‌دهند، در حالی که این طیف‌سنج قابلیت آن را دارد که طیف‌ها در ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسرخ را به طور همزمان، تا حد بسیار مطلوبی تفکیک نماید.

۲- اهداف و محدودیت‌های کلی در طراحی

از ویژگی‌های اساسی تلسکوپ‌ها که تا حد زیادی تعیین کننده شکل نهایی طیف‌سنج طراحی شده برای آن‌ها است: قطر روزنه، نسبت کانونی و پهنای شکاف (معادل با دید جوی در مکان تلسکوپ) است. قطر روزنه تلسکوپ ملی ایران، ۳/۴ متر، نسبت کانونی ۱۱/۲۳ و پهنای شکاف ۰/۵ ثانیه قوسی در آسمان است. علاوه بر مشخصات تلسکوپ، ابعاد و اندازه پیکسل‌های آشکار ساز عامل موثری دیگری در طراحی اپتیکی طیف‌سنج به شمار می‌رود که ایجاد محدودیت در فاصله کانونی دوربین به کار رفته در سیستم خواهد کرد [۱]. آشکار ساز مد نظر دارای ابعاد $4k \times 4k$ با اندازه پیکسل ۱۵ میکرون است. با توجه به ابعاد آشکار ساز و تفکیک مورد نیاز، توری با تعداد خطوط توری ۶۰۰ خط بر میلی‌متر به عنوان قطعه پراش دهنده نور انتخاب شد. به کمک معادله توری پراش،

$a(\sin\theta_i + \sin\theta_m) = m\lambda$ می‌توان زاویه بین بالاترین و پایین‌ترین طول موج را محاسبه نمود و از طریق تطبیق آن با ابعاد آشکار ساز، فاصله کانونی مناسب را برای دوربین تخمین زد. اگر f_2 فاصله کانونی دوربین و φ زاویه بین بالاترین و پایین‌ترین طول موج باشد، آن گاه مساحتی از آشکار ساز که با

طیف دریافت شده روشن خواهد شد برابر است با: $X = 2f_2 \tan \frac{\varphi}{2}$. از سوی دیگر اگر θ میدان دید تلسکوپ برحسب درجه و f_t فاصله کانونی کل سیستم باشد، آن گاه جابجایی طیفی روی آشکار ساز برای میدان دید ۶ دقیقه قوسی برابر با $x = f_t \tan \theta$ است. حال f_2 باید به گونه‌ای انتخاب شود که رابطه $X + x < 4k$ برقرار باشد. برای طول موج‌های ۳۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر، $\varphi = 11.32^\circ$ بوده و f_2 برای برقراری شرط بالا حدود 130 mm در نظر گرفته شده است. در زیر شرایط کلی حاکم بر محاسبات اولیه مربوط به طراحی طیف‌سنج که علاوه بر بالا بردن توان تفکیک سیستم، کمک می‌کند تا طیف‌سنج ارائه شده، هیچ یک از پرتوهایی را که در میدان دید ۶ دقیقه قوسی قرار دارند (میدان دید مطلوب برای تلسکوپ ملی ایران) از دست ندهد، بیان شده است [۲]:

شرط اول: $F_c < F_T$ ، که F_c نسبت کانونی موازی کننده و F_T نسبت کانونی تلسکوپ است.

شرط دوم: $r > 1$ ، که r ، فاکتور تغییر شکل دهنده سیستم بوده، و از رابطه زیر محاسبه می‌شود: $r = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$ در این رابطه α زاویه ورودی به سطح توری و β زاویه پراش است.

شرط سوم: $\frac{f_1}{f_2} \geq 2$ ، که f_1 و f_2 به ترتیب فاصله کانونی موازی کننده و دوربین هستند.

شرط چهارم: $\frac{f_2}{d_2} \geq F_0$ ، که F_0 و f_2 به ترتیب، فاصله کانونی و نسبت کانونی دوربین و d_2 قطر باریکه خروجی از توری پراش است.

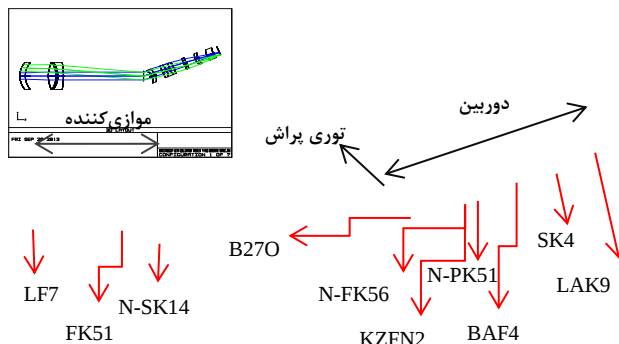
توان تفکیک با توجه به مشخصات ذکر شده برای قسمت‌های مختلف طیف‌سنج و پهنای در نصف ماکزیمم از تصویر ستاره بر روی آشکار ساز در راستای پاشندگی، $FWHM_t$ ، به دست می‌آید که برابر است با $R = \frac{r \cdot f_2}{FWHM_t} \left(\tan \alpha + \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \right)$

۳- پیکربندی اپتیکی

در شکل (۱) پیکربندی اپتیکی طیف‌سنج، که دارای سه بخش اصلی موازی کننده، توری پراش و دوربین است، به همراه نام شیشه به کار رفته در هر عدسی نمایش داده شده است، که همگی از فهرست محصولات شرکت شات (schott) انتخاب شده‌اند. در ادامه به تشریح این بخش‌ها خواهیم پرداخت.

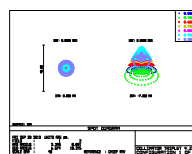
۳-۱- موازی کننده

موازی کننده از ۳ عدسی تشکیل شده است که پرتوها را در فاصله ۳۰ سانتی متری از کانون تلسکوپ دریافت می کند.



شکل ۱: پیکربندی اپتیکی طیفسنج شامل موازی کننده، توری پراش و دوربین

عدسی اول نقش اصلی را در موازی کردن پرتوها بر عهده دارد و دو عدسی دیگر به منظور تصحیح ابیراهی های موجود در سیستم به کار گرفته شده اند. فاصله کانونی موازی کننده ۳۵۷/۲۴۴ میلی متر بوده و نسبت کانونی آن ۶/۵ است. طول کلی سیستم ۲۰ سانتی متر است. می توان به طور واضح مشاهده نمود که شرط اول در طراحی موازی کننده کاملاً برقرار است. در شکل (۲) تصویر نقطه ای موازی کننده در صفحه کانونی آن، که با قرار دادن یک سطح پاراکسیال در مقابلش تصویر گیری شده، نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، مشکل ابیراهی تا حد مطلوبی رفع شده است [۳].



شکل ۲: تصویر نقطه ای موازی کننده در صفحه کانونی آن، که توسط قرار دادن یک سطح پاراکسیال در مقابل موازی کننده ثبت شده است.

در شکل (۲) مقدار ریشه مربع متوسط شعاع (RMS radius)

برای میدان های دید صفر و ۶ دقیقه قوسی محاسبه و نمایش داده شده است، که به ترتیب ۳ و ۸ میکرون هستند. از آنجا که اندازه هر پیکسل آشکارساز در حدود ۱۵ میکرون است، مقادیر فوق کیفیت بالای موازی کننده را تأیید می کنند.

۳-۲- توری پراش

توری پراش شامل ۶۰۰ خط بر میلی متر بوده و در فاصله ۲۹ سانتی متری از آخرین عدسی موازی کننده قرار دارد. زاویه برخورد پرتوها به سطح توری نزدیک به خط عمود بوده و زاویه پراش برای طول موج میانی با 650 nm ، در حدود 23° خواهد بود. در اینجا می توان برقرار بودن شرط دوم در طراحی یک طیفسنج را، برای طول موج میانی، مورد بررسی قرار داد. طبق تعریف داریم: $r = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = 1.08$. از آنجا که $r > 1$ است پس شرط دوم برقرار خواهد بود. حال اگر به جای توری عبوری، از توری فروزیده با زاویه فروزش $17/5^\circ$ استفاده نماییم، تنها کافیت که دوربین را در زاویه $24/73^\circ$ نسبت به توری قرار دهیم تا به همین تفکیک دست یابیم.

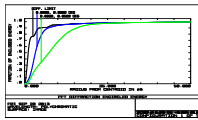
۳-۳- دوربین

سیستم کانونی کننده یا دوربین به کار رفته در این طیفسنج، شامل یک عدسی سه گانه و چهار عدسی منفرد است. طول کلی سیستم $29/7\text{ cm}$ بوده و دارای فاصله کانونی $129/973\text{ mm}$ است. نسبت کانونی آن $2/95$ است. به خوبی می توان مشاهده نمود که شرط سوم نیز که در طراحی طیفسنج باید مد نظر قرار گیرد، کاملاً برقرار است.

در بررسی شرط چهارم قبل از هر چیز باید d_2 را محاسبه کنیم. $d_2 = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot \frac{f_1}{f_2} + \frac{X \cdot P \cdot N}{f_2}$ که در این رابطه $X = 30\text{ mm}$ فاصله بین توری و اولین عدسی کانونی کننده، $N = 4k = 4096$ و $p = 15\mu$ اندازه هر پیکسل آشکارساز و تعداد پیکسل های آشکارساز مورد نظر است. برای طول موج 650 nm و $\alpha = 0^\circ$ و $\beta = 22.95^\circ$ است. با قرار دادن مقادیر فوق در معادله، مقدار $43/43\text{ mm}$ برای d_2 محاسبه خواهد شد. و داریم: $\frac{f_2}{d_2} = 3$ ، که این مقدار بزرگتر از $F_0 = 2.95$ ، نسبت کانونی دوربین است. بنابراین شرط آخر نیز در اینجا برقرار است.

در شکل (۳) تصویر نقطه ای پرتوها را در صفحه کانونی دوربین،

درجه، حد فاصل بین دو خط قرمز، محدوده یک پیکسل را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمودار انرژی پراش در سطح آشکارساز برای همه طول موج ها و میدان دید صفر و ۶ دقیقه قوسی طیف‌سنج

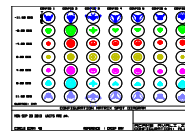
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، طیف‌سنج با توان تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ برای تلسکوپ رصد خانه ملی ایران طراحی شده است. طیف-سنج‌هایی که تا کنون طراحی شده‌اند بازه طیفی بسیار محدودی را شامل می‌شوند اما طیف‌سنج طراحی شده، توانایی آن را دارد که بازه طیفی بسیار گسترده‌ای را پوشش دهد و به طور همزمان طیف‌ها را در ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسرخ تا حد بسیار مطلوبی تفکیک نماید. تصویر نقطه‌ای سیستم در صفحه کانونی آن، که برای تمامی طول موج‌ها دارای شعاعی کمتر از یک پیکسل است، بیانگر کیفیت بالا در دریافت اطلاعات طیفی و کاهش نویز در تفکیک نهایی آن‌ها است. از سوی دیگر استفاده از کمترین تعداد عدسی در طراحی این سیستم موجب کاهش وزن و ابعاد آن شده است. همچنین شایان ذکر است که تمامی عدسی‌های به کار رفته در سیستم، شامل سطوح کروی هستند که این امر فرایند ساخت طیف‌سنج را نیز تسهیل می‌کند.

مراجع

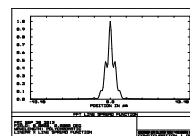
- [1] Stephen A. Smee, Robert H. Barkhouser, Karl Glazebrook, *Design of a multi-object, high throughput, low resolution fiber spectrograph for WFMOS*, **proceeding of the SPIE**, vol. 6269, pp. 626921, 2006
- [2] Oleron, France, *Astronomical Spectroscopy for Amateurs*, **edp sciences**, vol. 47, pp. 39-71, 2011
- [3] Morgan, G. E, Ringwald, F. A, Buil, C, Garrett, M, *Spectra and Light Curve Analysis of Nova V475 Scuti*, **NASA ADS**, vol. 117, pp. 938-943, 2005
- [4] Oleron, France, *Astronomical Spectroscopy for Amateurs*, **edp sciences**, vol. 47, pp. 39-71, 2011
- [5] Jian Ge, Alex Kuterv, Bruce Dean, Harvey Moseley, bruc. Woodgate & Cathy Marx, *the Optical design of rapid infrared-visible multi-object spectrometer: a NGST Demonstration Instrument*, **proceeding of the SPIE**, vol. 4850, pp. 535-543, 2003

برای میدان دید 23° تا 23° نشان داده شده است. این میدان با توجه به زاویه پراش توری برای طول موج‌های مختلف محاسبه شده است. که بزرگترین آن‌ها در حدود ۶ میکرون است. اندازه لکه برای هر طول موج در صفحه کانونی طیف-سنج، محدوده‌ای کمتر از یک پیکسل را به خود اختصاص می‌دهد. به این روش تصویرگیری، که در آن نور دریافت شده، در فضایی کمتر از یک پیکسل کانونی می‌شود، اصطلاحاً نمونه برداری کم می‌گویند [۴]. که این امر ناشی از افزایش کیفیت اطلاعات و کاهش نویز در سیستم است. این طیف‌سنج برای زاویه دید ۳۶۰ ثانیه قوسی در آسمان بهینه شده است که در شکل (۴) پاسخ ضربه‌ای سیستم برای طول موج ۵۵۰ نانومتر و میدان دید صفر درجه، نشان داده



شکل ۳: اندازه لکه در صفحه کانونی دوربین، به ترتیب از چپ به راست برای طول موج‌های ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ نانومتر

شده است. حد فاصل دو خط قرمز محدوده یک پیکسل را نشان می‌دهد. در شکل (۶) نیز نمودار انرژی محصور در سطح آشکارساز برای کل سیستم دیده می‌شود که با محدوده پراش مقایسه شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که ۹۸ درصد انرژی در مساحت ۲×۲ پیکسل از سطح آشکارساز محصور شده است [۵]. این سطح انرژی همان طور کاملاً با محدوده پراش قابل مقایسه است.



شکل ۴: پاسخ ضربه‌ای سیستم برای طول موج ۵۵۰ نانومتر و میدان دید صفر