

مدل سازی، طراحی نرم افزار و چیدمان تجربی طیف سنجی دگرآمیز فضایی

حمید قاسم جهرودی، سید حسن توسلی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی (ره)، پژوهشکده لیزر و پلاسما

در این مقاله، مدل سازی و طراحی نرم افزار طیف سنج دگرآمیز فضایی با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است. علاوه بر این، این سیستم بصورت تجربی پیاده سازی شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ارائه شده، تمامی پارامترهای تجربی (اپتیک ورودی، تداخل سنجی، اپتیک خروجی، آشکارسازی، بازده ها، خطاها و نوفه های) سیستم را مدل سازی نموده است و توانایی تحلیل انواع تغییرات پارامتریک را دارا می باشد. نرم افزار طراحی شده، محیط کاربری گرافیکی مناسبی را برای انجام محاسبات مربوطه و کالیبره کردن سیستم، طبق دو روش تقریبی و وارونه طیفی و همچنین کنترل اجزاء مدل، ایجاد می نماید.

کلید واژه: طیف سنج، دگرآمیز، فضایی، مدل سازی

Modeling, Software Design and Experimental Setup of Spatial Heterodyne Spectroscopy (SHS)

Hamid Ghassem Jahroudi, Seyed Hassan Tavassoli

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

In this article, the modeling and software design for Spatial Heterodyne Spectrometer is performed by Matlab software. In addition, this system is experimentally experienced and its results are investigated. The model covers and considers all experimental parameters (entrance optics, interferometry, exit optics, detection, efficiencies, errors and noises) of the system and is capable to analyze all types of parametric changes. The designed software presents a convenient graphical user interface for related calculations and system calibration based on two methods of approximation and spectral inversion as well as model elements control.

Keywords: Heterodyne, Modeling, Spatial, Spectrometer

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

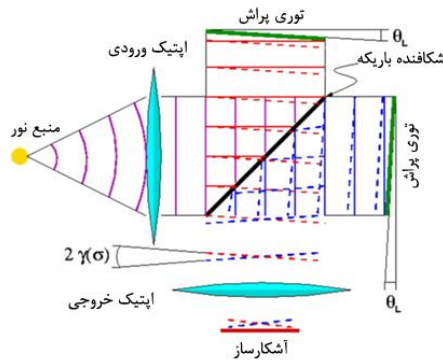
طیف سنجی دگرآمیز فضایی یک تکنیک طیف سنجی مبتنی بر ایجاد طرح تداخلی و تبدیل فوری آن است که دارای مزایای زیادی از قبیل: تفکیک پذیری طیفی بالا، پذیرش نوری زیاد و ساختار مقاوم به دلیل نداشتن اجزای متحرک، برخلاف اغلب روش های مبتنی بر تبدیل فوری است. اولین بار این روش توسط جان هارلندر به عنوان رساله دکتری معرفی و به کارگیری شد [۱]. پس از آن مورد استقبال سازمان هوانوردی و فضایی آمریکا قرار گرفت [۲]. در سال های اخیر با توجه به مزیت های این روش، برخی از مطالعات طیف سنجی دیگر نیز با این تکنیک انجام شده اند.

در این مقاله، ما با تکیه بر مبانی فیزیکی این تکنیک، اقدام به مدل سازی گونه پایه این سیستم نموده ایم. لازم به ذکر است که از مؤسسه روجستر آمریکا، مدل سازی ای مشابه این کار با ویژگی های متفاوت، برای ناحیه فرسرخ دور گزارش شده است [۳]. همچنین با ایجاد چیدمان اپتیکی مناسب و کسب نتایج تجربی، به تحلیل نتایج آن پرداخته ایم.

۲- طیف سنج دگرآمیز فضایی

اپتیک ورودی، نور را موازی می کند و سپس نور به قسمت تداخل سنج وارد می گردد (شکل ۱). بخش تداخل سنج، شامل یک تداخل سنج مایکلسون است که به جای آینه، در آن از توری بازتابی که نسبت به محور موازی با شیارهای توری به اندازه زاویه لیترو منحرف شده است، استفاده می شود. نور ورودی در تداخل سنج، پس از برخورد به شکافنده باریکه نور به دو قسمت تقسیم شده و هر قسمت توسط توری پراش، پاشیده شده و دوباره در جلوی شکافنده با یکدیگر تلاقی می کنند. این دو جبهه موج بر روی آشکارساز طرح تداخلی ای موسوم به فریزهای فیزو^۲ تشکیل می دهند. عدد موج دگرآمیز (در اینجا عدد موج لیترو^۳ که همه طیف ها نسبت به آن سنجیده می شود)، عدد موجی است که بعد از خروج از شکافنده،

تشکیل جبهه های موج موازی بایکدیگر می دهد و بسامد



شکل ۱: شمای کلی طیف سنج دگرآمیز فضایی (SHS)

فضایی صفر را روی آشکارساز ایجاد می نماید. رابطه پراش برای جزء توری SHS با این رابطه بیان می شود:

$$k(\sin(\theta_L) + \sin(\theta_L - \gamma)) = mG \quad (1)$$

k ، عدد موج، θ_L زاویه لیترو، γ زاویه میان جبهه موج لیترو و جبهه موج خروجی، m مرتبه پراش و G چگالی شیارهای توری است. فریزهای فیزیکی تشکیل شونده بر روی آشکارساز، در روش تقریبی دارای تابعیت خطی با عدد موج ورودی، به صورت زیر هستند:

$$f = 4 \tan(\theta_L)(k_L - k) \quad (2)$$

که در آن f بسامد فضایی فریزها، k عدد موج ورودی و k_L عدد موج لیترو می باشد. طرح تداخلی ایجاد شده به عنوان تابعی از مکان بر روی آشکارساز از این رابطه:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} L(k) [1 + \cos(2\pi \cdot f \cdot x)] dk \quad (3)$$

بدست می آید که $L(k)$ معرف تابش طیفی اندازه گیری شده در ورودی سیستم است. تابع شدت طرح تداخلی به جز یک جمله ثابت، همان تبدیل فوری است که در نتیجه، با گرفتن عکس تبدیل فوری از شدت طرح تداخلی، می توان تابش طیفی ورودی را بازیابی کرد [۱].

۳- مدل سازی و نرم افزار

مدل سازی طیف سنج دارای شش بخش اصلی می باشد که به اختصار، به شرح زیر است:

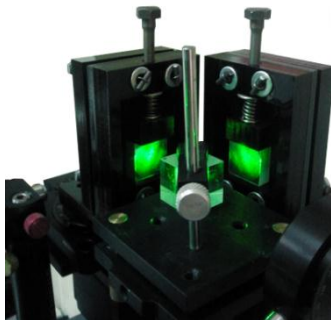
۱. ورودی سیستم ما که توسط نرم افزار کنترل می شود و

¹ Etendue

² Fizeau Fringes

³ Littrow Wavenumber

مشاهده است. ویژگی های وسایل بکار رفته در آزمایش و همچنین ویژگی های خروجی آن، در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: تصویر قسمتی از چیدمان تجربی. نور لیزر پس از باز شدن و موازی سازی، از تداخل سنج عبور می کند

لازم بذکر است که در مدل سازی، مانند طیف نمونه تجربی، بعنوان ورودی، از اطلاعات طیفی یک لیزر با توان حدود ۱۵ mw با دو پیک در ۵۳۰/۹۷ nm و ۵۳۳/۲۷ nm که توسط طیف سنج (Ocean Optics HR2000+) اندازه گیری شده، استفاده گردیده است (شکل ۳-الف). در روند مدل سازی ما، اطلاعات طیفی ورودی، تبدیل به طرح تداخلی می شود و سپس دوباره به طیف، بازیابی می گردد.

۵- نتایج و بحث

برای بررسی سهم خطاها در انحراف طیف بدست آمده نسبت به ورودی سیستم، ما پارامتر زاویه جدایی میان طیف ورودی و خروجی را با استفاده از الگوریتم نگارنده زاویه طیفی (SAM)^۴ بکار گرفته ایم. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{L_{recovered}(k) \cdot L_{input}(k)}{|L_{recovered}(k)| \cdot |L_{input}(k)|} \right] \quad (4)$$

که در آن با فرض برداری بودن تابش طیف ورودی $L_{input}(k)$ و طیف خروجی $L_{recovered}(k)$ ؛ ضرب داخلی و اندازه آن ها، بکار می رود. میزان ایده آل زاویه جدایی صفر درجه است. در شکل ۴، مشاهده می شود که مؤثرترین خطا در سیستم، خطای زاویه لیترو است.

در آزمایش، نور لیزر یادشده، به عنوان ورودی به سیستم تابانده شده است. شکل ۵-الف طرح تداخلی تشکیل شده بر روی آشکارساز را نشان می دهد. با اعمال الگوریتم

شامل اطلاعات توری پراش، شکافنده باریکه نور، آشکارساز و روزنه ورودی سیستم است. ۲. اپتیک ورودی

جدول ۱: مشخصه های مورد استفاده در آزمایش. * مقادیر تئوری

150 lines/mm - 25×25 mm 500 nm Ruled	توری پراش
25mm cube - Non-polarizing	شکافنده باریکه نور
Toshiba Linear CCD array	آشکارساز
2.14 degrees	زاویه لیترو
40.8 nm [497.4, 538.2]	بازه طول موجی
~0.074 nm - ~3 cm ⁻¹	رزولوشن طیفی*
6750	قدرت تفکیک*

که در آن تابع گذردهی ورودی به همراه میدان دید سیستم روی طیف ورودی اثر می کنند. ۳. تداخل سنجی که در آن با در نظر گرفتن تابع بازده توری ها و همچنین توابع گذردهی و جذب شکافنده موج به همراه خطاهای مربوط به زاویه لیترو، فاز تداخلی و لرزش، طرح تداخلی با رزولوشن بالا ایجاد می گردد. ۴. اپتیک خروجی نیز تابع گذردهی خروجی را روی طرح تداخلی ایجاد شده اعمال می کند. ۵. آشکارسازی که طرح تداخلی نهایی با توجه به تعداد پیکسل های آشکارساز، توسط آن نمونه گیری می شود. در این بخش انواع نوفه های مربوط به خواندن اطلاعات، تبدیل فوتون به الکترون در آشکارساز، الکترونیک پس از آشکارساز، کوانتیده کردن اطلاعات و همچنین نوفه وابسته به نرخ خطای بیت، روی طرح تداخلی سوار می شوند. ۶. خروجی سیستم، شامل نسبت سیگنال به نویز سیستم و نیز طرح تداخلی تصحیح شده می باشد. پس از تولید طرح تداخلی نهایی، این طرح با استفاده از الگوریتم پردازش، به طیف اولیه بازیابی می شود. لازم به ذکر است در این مدل، تابع پاسخ سیستم با استفاده از طیف لامپ کوارتز هالوژن، بدست می آید و برای بازیابی صحیح طیف عبور کننده از سیستم، بکار می رود.

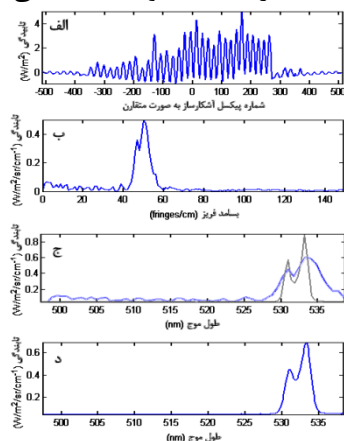
از طریق این مدل می توان کلیه عوامل مؤثر بر طیف سنج و پردازش نهایی آن را بررسی کرد که شرح مختصری از آن در قسمت نتایج آمده است.

۴- چیدمان تجربی

قسمتی از چیدمان اپتیکی استفاده شده، در شکل ۲ قابل

⁴ Spectral Angle Mapper algorithm

، سیستم را کالیبره کرد. با دقت در طیف بدست آمده و مقایسه آن با طیف ورودی اندازه گیری شده با طیف سنج Ocean Optics، می بینیم که طیف تجربی ما تفاوت هایی دارد (شکل ۵-ج). اینجاست که مدل سازی به کمک ما می آید. در محیط آزمایشگاه، دو مسأله اساسی در مورد



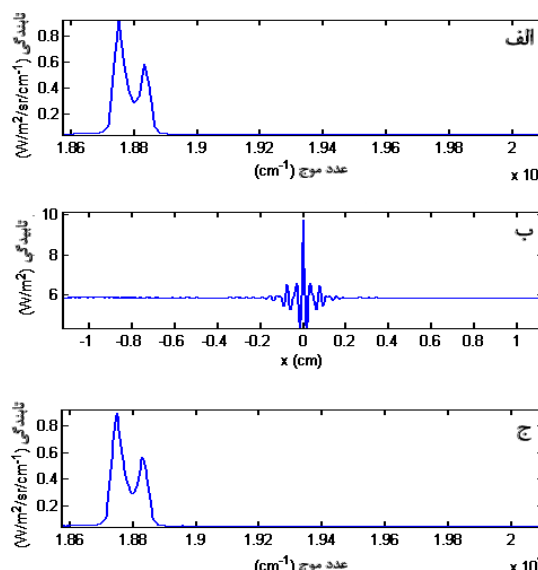
شکل ۵: خروجی های حاصل از چینش اپتیکی. (الف) طرح تداخلی ثبت شده توسط آشکارساز (ب) طیف بازایی شده از طرح تداخلی بر حسب بسامد فریز (ج) طیف تجربی (آبی) و طیف معیار (د) طیف خروجی مدل سازی شده با احتساب 0.03° درجه خطای زاویه لیترو

خطاها جلب توجه می کند که یکی لرزش غیر استاندارد آزمایشگاه و دیگری دقت میکرومترهای چرخشی ای است که توری ها روی آن ها سوار شده و زاویه لیترو با آن ها اندازه گیری می شود. می خواهیم عمده ترین نوع خطای یعنی خطای زاویه لیترو را بررسی کنیم. با توجه به این نکته که دقت میکرومترهای چرخشی ما 0.01° درجه است، با فرض خطای 0.03° درجه، خروجی مدل را بررسی می کنیم (شکل ۵-د). مشاهده می شود که طیف، دچار تغییر شکل شده و عمق دره میان دو پیک کاهش یافته است. پس می توان سهم بزرگی را برای این خطا در آزمایش لحاظ کرد.

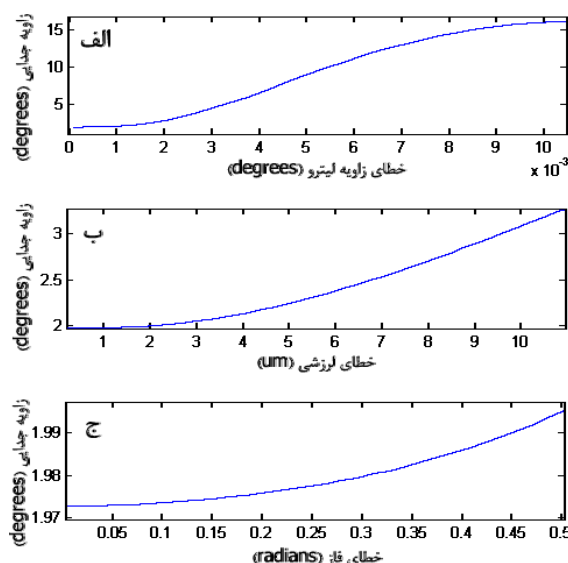
مراجع

- [1] John M. Harlander, "Spatial heterodyne spectroscopy: Interferometric performance at any wavelength without scanning", Wisconsin, 1991 (PhD dissertation).
- [2] John M. Harlander, "Spatial Heterodyne Spectroscopy for High Spectral Resolution Space-Based Remote Sensing", Optics & Photonics News January 2004
- [3] Cara Perkins, "Spatial heterodyne spectrometer: modeling and interferogram processing for calibrated spectral radiance measurements", doi: 10.1117/12.2023765
- [4] Christoph R. Englert, "SHIM-Fire Breadboard Instrument Design, Integration, and First Measurements", NRL, 2005.
- [5] Qisheng Cai, "A broadband spectral inversion method for spatial heterodyne spectroscopy", doi: 10.1117/12.2072263

پردازش طرح تداخلی و گرفتن تبدیل فوریه معکوس از آن، طیف لیزر به صورت تابعی از بسامد فریز، بدست می آید (شکل ۵-ب). با استفاده از روابط تبدیل بسامد فریز به



شکل ۳: (الف) طیف لیزر به عنوان ورودی مدل. (ب) طرح تداخلی ایجاد شده بر روی آشکارساز. (ج) طیف خروجی بازایی شده



شکل ۴: بررسی رابطه زاویه جدایی میانگین با (الف) میزان خطای زاویه لیتروی توری ها (ب) میزان خطای ناشی از اثرات لرزش بر سیستم (ج) مقدار خطای فاز جمله تداخلی

طول موج و دانستن مقادیر دقیق دو پیک بر حسب طول موج [۴]، می توان به کمک نرم افزار، طبق یکی از روش های تقریبی و یا وارونه طیفی^۵ (بدون احتساب تقریب) [۵]

⁵ Spectral Inversion Method