شبیه‌سازی آزمایشگاهی مدل لایه‌ای آشفتگی جوی

ندا شمسی‌پور[۱]، ابوالحسن مبشری[۲] و محمد مرادی[۳]

[۱،۳]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

[۲]پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان

چکیده – آشفتگی جو عامل تنزل کیفیت ارتباطات لیزری بی‌سیم است. شبیه‌سازی جبهه‌ی موج واپیچیده اولین قدم برای بررسی اثر آشفتگی بر پرتو عبوری از جو و همچنین طراحی سیستم تصحیح آن است. در این مقاله برای ساخت صفحات فاز، از پاشیدن اسپری مو بر روی صفحات شیشه‌ایی استفاده شده است. مقدار ماده اسپری شده بر روی شیشه تعیین‌کننده پارامتر آشفتگی جوی مثل پارامتر فرید است. با استفاده از طیف فضایی-زمانی واریانس افت و خیز زاویه‌ی فرود پرتو، پارامتر فرید و سرعت جریان آشفتگی به‌دست آورده شد. در این روش صفحاتی با قدرت آشفتگی مختلف برای شبیه‌سازی مدل لایه‌ای جو با هم ترکیب شده‌اند و صفحات چرخنده با سرعت‌های مختلف، سرعت جریان متلاطم در لایه‌های جو را شبیه‌سازی می‌کنند.

کلید واژه- آشفتگی جوی، پارامتر فرید، زاویه‌ی فرود پرتو، طیف فضایی-زمانی

Laboratory simulation of layered model of atmospheric turbulence

Neda Shamsipour[1], AbolHasan Mobasheri[2] and Mohammad Moradi[3]

Physics department faculty of science, University of Shahrekord, Shahrekord[1,3]

Optics and Laser Research Center, Malek Ashtar university of Technology, Shahin Shahr[2]

Abstract- Atmosphere turbulence cause to reduce quality of wireless laser communication. The first step for studying turbulence effect on beam which passes thorough atmosphere and also designing correcting system of it is simulation of distorted wave front. In this paper, we made phase screen by spraying hair spray on glass screens. Amount of matter which sprayed on platform is determinative of turbulence parameters, such as Fried parameter. By using spatiotemporal spectrum variance fluctuations of beam angle of arrival, Fried parameters and velocity of turbulence flow were obtain. in this method, verity phase plates with different turbulence strength have been combined to simulate layered model of atmosphere and rotated plates with different speed, simulate turbulent flow in atmosphere layers.

Keywords: Atmospheric turbulence, Angel of arrival, Fried parameter, Spatiotemporal spectrum

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده از مخابرات نوری فضای آزاد، به دلیل امکان ارسال حجم بیشتری از اطلاعات افزایش یافته است. متاسفانه عملکرد این سیستم به طور قابل توجهی توسط آشفتگی جو کاهش می‌یابد. آشفتگی جو ناشی از افت و خیز ضریب شکست است و باعث سوسوزنی پرتو می‌شود. اثر دیگر آن کاهش همدوسی فضایی-زمانی و کاهش توان پرتو است. اپتیک تطبیقی روشی موثر برای کاهش ابیراهی ناشی از آشفتگی جو است. در این سیستم، آینه‌ی تغییر شکل پذیر برای جبران افت و خیزهای فاز استفاده می‌شود. میزان تصحیح جبهه‌ی موج و همچنین انتخاب آینه‌ی تغییر شکل پذیر یکی از بخش‌های مهم طراحی سیستم اپتیک تطبیقی است. بنابراین شبیه‌سازی جبهه‌ی موج واپیچیده اولین قدم برای طراحی یک سیستم تصحیح ابیراهی جو است.

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی جو وجود دارد. از جمله این روش‌ها محفظه‌ی هوای گرم [۱]، محفظه‌ی آب [۲]، مدولاتورهای فضایی [۳] و صفحه فازی [۴] است. در محفظه‌ی هوای گرم برای شبیه‌سازی لایه‌های مختلف آشفتگی جوی با نمایه‌ی مناسب ثابت ساختار ضریب شکست، باید از چندین محفظه‌ی متوالی یا عبور چندگانه پرتوها از یک محفظه استفاده شود. محفظه‌های متوالی باعث افزایش حجم محیط شبیه‌سازی می‌شوند. از طرف دیگر هنگام استفاده از عبور چندگانه پرتوها باید از همپوشانی پرتوها جلوگیری شود [۱]. به همین دلیل در این مقاله سعی شده است برای کاهش قیمت و پیچیدگی روش شبیه‌سازی از صفحات فاز استفاده شود. در این طرح برخلاف روش‌های معمول از چندین صفحه فاز برای شبیه‌سازی لایه‌های مختلف آشفتگی جو استفاده شده است.

۲- مبانی نظری

۲-۱- ساختار لایه‌ای جو و سوسوزنی

نمایه‌ی عمودی آشفتگی جوی که با ثابت ساختار ضریب شکست C_N^2 توصیف می‌شود، از ساختاری لایه‌ای تشکیل شده است. اولین لایه، لایه‌ی سطح زمین است که تا ارتفاع $100-300m$ گسترده شده است و $50\%-70\%$ قدرت آشفتگی $(\int C_N^2 dh)$ را شامل می‌شود. دو تا سه لایه هر کدام با قدرت آشفتگی $10\%-20\%$ در ارتفاع چندین کیلومتری بالای سطح زمین قرار دارند و در نهایت لایه‌ی تراپاپوز با قدرت آشفتگی $10\%-20\%$ در ارتفاع $10-20km$ قرار می‌گیرد [۵]. در ارتفاع بیش از $30km$ اثر آشفتگی قابل صرف نظر کردن است. قدرت آشفتگی کل جو توسط پارامتر r_0 به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$r_0^{-5/3} = 0.4234(\frac{2\pi}{\lambda})\int_0^\infty C_N^2(h)dh \qquad (۱)$$

هنگام عبور پرتو از این لایه‌های آشفته، علاوه بر فاز جبهه‌ی موج دامنه‌ی آن نیز دچار افت و خیز می‌شود که به عنوان سوسوزنی شناخته می‌شود. این پدیده در مخابرات نوری فضای آزاد تاثیر مخربی دارد. میزان سوسوزنی توسط ضریب سوسوزنی تعیین می‌شود [۵]:

$$\sigma_I^2 = 17.22D^{-7/3}\int h^2 C_N^2(h)dh \qquad (۲)$$

بر اساس نتایج رودیر، لایه‌هایی با ارتفاع 0، $5-6km$ و $10km$ بیشترین اثر را در ایجاد سوسوزنی دارند [۵]. در این مقاله برای انجام شبیه‌سازی آشفتگی جوی سه لایه در ارتفاع‌های 0، $5km$ و $10km$ که به ترتیب شامل 70%، 20% و 10% قدرت آشفتگی هستند، در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه پارامتر r_0 کلی محیط برای طول موج $0.6\mu m$ برابر $0.2m$ باشد، طبق رابطه‌ی (۱) پارامتر r_0 هر لایه برابر $0.25m$، $0.53m$ و $0.8m$ خواهد بود. با فرض اینکه قطرگیرنده در شرایط واقعی $0.5m$ باشد، فرآیند شبیه‌سازی را در مقیاس $\frac{1}{100}$ انجام می‌دهیم تا نسبت $\frac{D}{r_0}$ در محیط واقعی و شبیه‌سازی یکسان باشد. در ادامه روش مشخصه‌یابی و ساخت صفحات فاز ارائه می‌شود.

۲-۲- مشخصه‌یابی صفحات فاز

مناسب‌ترین روش برای مشخصه‌یابی شبیه‌ساز آشفتگی، استفاده از روش زاویه‌ی فرود پرتو است [۱]. زاویه‌ی فرود پرتو به عنوان میانگین شیب جبهه‌ی موج آشفته شده در محل مردمک ورودی سیستم تعریف می‌شود.

$$\alpha_x = \frac{x_c}{F} \quad \alpha_y = \frac{y_c}{F}. \qquad (۳)$$

که F فاصله‌ی کانونی گیرنده اپتیکی، x_c و y_c مختصات مرکز پرتو روی صفحه کانون گیرنده است. برای

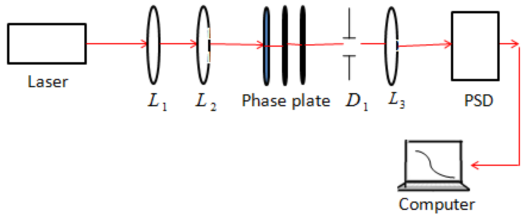
تعیین آمار افت و خیز زاویه‌ی فرود پرتو معمولا از یک CCD سریع یا حسگر حساس به موقعیت (PSD[1]) استفاده می‌شود. در طیف کالماگروف، واریانس زاویه‌ی فرود عبارت است از [۱]:

$$\sigma^2_{\alpha_{x,y}} = 0.1698(\frac{\lambda}{D})^2(\frac{D}{r_0})^{\frac{5}{3}} \qquad (۴)$$

براساس رابطه‌ی بالا، واریانس زاویه‌ی فرود پرتو با افزایش قطر پرتو، کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن پرتوهایی با قطرهای مختلف می‌توان پارامتر r_0 را تعیین کرد. با استفاده از تبدیل فوریه سری زمانی $\alpha_{x,y}(t)$ می‌توان سرعت حرکت تلاطم و همچنین مقیاس درونی و بیرونی را تعیین کرد. در واقع، طیف توان زمانی زاویه‌ی فرود پرتو در چهار بازه‌ی فرکانسی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در فرکانس‌های پایین، تغییرات آن بر حسب فرکانس به صورت f^{2}، در فرکانس‌های میانی به صورت $f^{\frac{-2}{3}}$، در فرکانس‌های بالا به صورت $f^{\frac{-11}{3}}$ و در فرکانس‌های خیلی زیاد به صورت نمایی با توان دوم فرکانس کاهش می‌یابد. تقاطع خط مجانب فرکانس‌های پایین (f^{2}) و خط مجانبی فرکانس‌های میانی ($f^{\frac{-2}{3}}$) در نقطه $f_{L_0}=\frac{V_a}{L_0}$ و خط مجانبی فرکانس‌های میانی و مجانب فرکانس‌های بالا در نقطه‌ی $f_D = 0.3\frac{V_a}{D}$ یکدیگر را قطع می‌کنند [۵]. خط مجانبی فرکانس‌های بالا پس از نقطه‌ی $f_{l_0}=\frac{V_a}{l_0}$ به شدت میرا می‌شود. پس از رسم طیف توان زاویه‌ی فرود پرتو برحسب فرکانس و تعیین محل برخورد خطوط مجانب، ابتدا سرعت حرکت آشفتگی V_a و سپس مقیاس بیرونی L_0 و مقیاس درونی l_0 تعیین می‌شود.

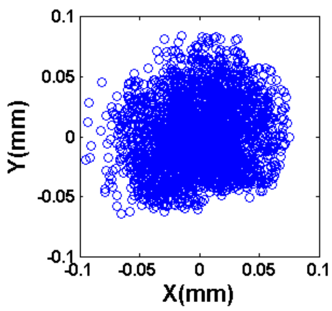
۳- روش انجام آزمایش و نتایج

برای ساخت صفحات فاز از روش پوشش دادن صفحات شیشه‌ایی توسط اسپری مو استفاده شده است. این روش اولین بار توسط توماس معرفی شده است [۶] و به دلیل سادگی و ارزان بودن یک روش آزمایشگاهی مناسب است. سپس صفحات فاز بر روی یک موتور DC قرار می‌گیرند تا با حرکت دورانی آن تغییرات دینامیکی آشفتگی ایجاد شود. برای انجام آزمایش از چیدمان شکل (۱) استفاده شد. در این چیدمان عدسی‌های L_1 و L_2 به عنوان یک پرتوگستر عمل کرده و ابعاد پرتو را به اندازه‌ی دلخواه افزایش می‌دهند. پرتو پهن شده پس از عبور از صفحات فاز، توسط عدسی L_3 بر روی PSD کانونی می‌شود. روزنه‌ی متغیر D_1 که روبروی عدسی L_3 قرار می‌گیرد امکان دریافت پرتو با قطرهای مختلف را فراهم می‌کند. سیگنال PSD پس از دریافت توسط یک تقویت‌کننده به کامپیوتر ارسال می‌شود.



شکل ۱. طرحواره‌ی چیدمان آزمایش

اولین مساله مورد بررسی همگنی و همسانگردی طیف توان زاویه‌ی فرود پرتو است.

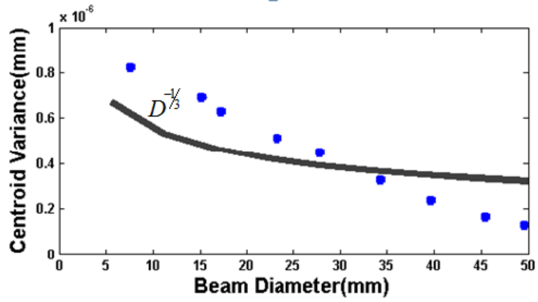


شکل۲. تغییرات افت و خیز پرتو در بازه‌ی زمانی ۱۸۰ ثانیه

شکل (۲) تغییرات افت و خیز پرتو در راستای y را بر حسب x نشان می‌دهد. تقارن این شکل نشان‌دهنده‌ی همگن و همسانگرد بودن طیف توان دریافتی است. صرفا صفحاتی به عنوان شبیه ساز تلاطم در نظر گرفته شده است که نسبت $\frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}$ آن‌ها تقریبا برابر ۱ باشد تا همگنی و همسانگردی طیف تضمین شود. در این مرحله با استفاده از رابطه (۲) مقدار r_0 برای یک قطر پرتو مشخص برای صفحات مختلف بین $0.5mm$ تا $1.9mm$ به دست آمد. دامنه‌ی تغییرات r_0 به دلیل مقدار مواد اسپری شده بر روی صفحات شیشه‌ایی بود. برای تعیین پارامتر r_0 برای سه صفحه فاز، تغییرات واریانس زاویه‌ی فرود بر حسب قطر دهانه‌های مختلف تعیین شد. شکل

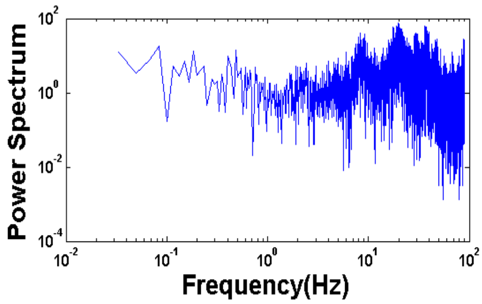
[1] Position Sensitive Detector

(۳) منحنی این تغییرات را نشان می‌دهد. مقدار r_0 به دست آمده برابر $0.19mm$ است که نشان از آشفتگی شدید است. در شکل (۳) منحنی پیوسته بر اساس رابطه‌ی (۴) رسم شده است که کاهش واریانس زاویه فرود به صورت $D^{\frac{-1}{3}}$ را نشان می‌دهد. انحراف بین مقادیر تجربی و خط پیوسته به دلیل در نظر نگرفتن اثر ناشی از مقیاس درونی و بیرونی در رابطه‌ی (۴) است.



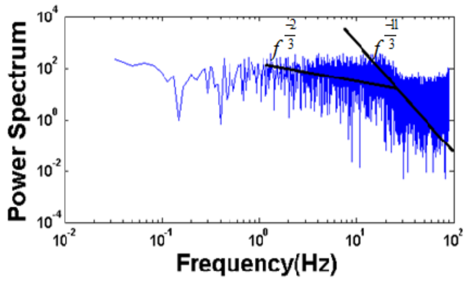
شکل۳. تغییرات واریانس زاویه فرود بر حسب قطر دهانه‌ی پرتو

در مرحله بعد آزمایش‌ها، طیف توان افت وخیز زاویه‌ی فرود پرتو ابتدا برای یک صفحه فاز ثبت شد. شکل (۴) نمونه‌ایی از طیف توان یک صفحه فاز است. رفتار مجانبی برای فرکانس‌های پایین، میانی و بالا به دقت خوبی قابل مشاهده نیست.



شکل۴. طیف توان برحسب فرکانس زمانی برای یک صفحه فاز.

در مرحله بعد، از سه صفحه فاز متوالی استفاده کردیم. طیف توان افت وخیز زاویه‌ی فرود پرتو برای سه صفحه فاز متوالی را ثبت کردیم. شکل(۵) نمونه‌ای از طیف توان را نشان می‌دهد، که در آن خطوط مجانب $f^{\frac{-2}{3}}$ و $f^{\frac{-11}{3}}$ رسم شده است. با پیدا کردن فرکانسی که این دو خط یکدیگر را قطع می‌کنند، سرعت جریان متلاطم تعیین شد که برابر $5\frac{m}{s}$ به دست آمد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده با تغییر دادن سرعت چرخش صفحات فاز می‌توان سرعت جریان تلاطم در لایه‌های مختلف را کنترل کرد. همچنین با تغییر دادن راستای صفحه فاز نسبت به پرتو عبوری می‌توان جهت وزش باد در لایه‌های مختلف را کنترل کرد.



شکل۵. طیف توان بر حسب فرکانس زمانی برای سه صفحه فاز

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از صفحات فاز یک روش مناسب و ارزان قیمت برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی جو است. در این روش برای ساخت صفحات فاز، از پاشیدن اسپری مو بر روی صفحات شیشه‌ای استفاده شده است. با استفاده از روش زاویه‌ی فرود پرتو، پارامتر های r_0 و سرعت آشفتگی جو به‌دست آمد. مقدار ماده اسپری شده در شیشه تعیین‌کننده پارامتر های آشفتگی جو است. می‌توان نتیجه گرفت تعداد صفحات فاز بیشتر آشفتگی اپتیکی قوی‌تری را ایجاد خواهد کرد. این روش امکان شبیه‌سازی ویژگی لایه‌ای آشفتگی جوی را به سادگی فراهم می‌کند.

مراجع

[1] O. Keskin, L. Jolissaint, C. Bradley, "Hot-air optical turbulence generator for the testing of adaptive optics systems: Principles and characterization", Applied Optics, Vol. 45, No. 20, pp. 4888-4897, 2006 .

[2] C. C. Davis, Y. Zhang, M. L. Plett, P. P. Dinge1s, P. R. Barbie, D. W. Rush, "Characterization of a liquid-filled turbulence simulator", Proc. of SPIE, Vol. 3432, pp. 38-49, 1998

[3] S. H. Eng, D. M. Cai, Z. Wang, K. Alameh, W. Jiang, "Optimization of liquid-crystal spatial light modulator for precise phase generation", ECU Publications Pre. 2011, pp. 105-108, 2007.

[4] H. d. Man, N. Doelman, M. Krutzen, "First results with an adaptive optics test bench", Proc. of SPIE, Vol. 4839, pp. 121-130, 2003.

[5] L. Jolissaint, "Optical turbulence generators for testingastronomical adaptive optics systems: A review and designer guide", The Astronomical Society of the Pacific, Vol. 118, pp. 1205-1224, 2006.

[6] S. Thomas, "A simple turbulence simulator for adaptive optics", Proc. SPIE 5490, pp. 277-286X, 2004.