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

تولید و مطالعه‌ی تلاطم همرفتی غیر کلموگروفی با محاسبه‌ی چگالی طیفی توان فاز جبهه‌ی موج نور عبوری از آن

ابراهیم محمدی رازی[۱]، سیف اله رسولی[۱و۲]

[۱]دانشکده فیزیک ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان

[۲] مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

چکیده - اخیراً چیدمانی جدید مبتنی بر تکنیک ماره و بهره‌گیری از دو عدد تلسکوپ، برای بررسی محیط‌های متلاطم نظیر جو و محیط متلاطم همرفتی آزمایشگاهی توسط مولفین معرفی شده است. در این مقاله با استفاده از یک تلسکوپ جبهه موج تخت تولید و در محیط متلاطمِ همرفتیِ آزمایشگاهی انتشار داده می‌شود. از یک گرم‌کن برقی با مساحت رویی ۵۰×۱۰۰ سانتیمتر مربع برای ایجاد گرادیان‌های دمایی و نیز ایجاد محیط متلاطم همرفتی استفاده می‌شود. می‌توان دمای گرم‌کن را در بازه ۲۰ تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد با دقت یک درجه تغییر داد. در انتهای مسیر انتشار با استفاده ازتلسکوپی دیگر و حسگرماره‌ای دوکاناله‌ای جبهه‌ی موج ، جبهه‌ی موج نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی بازسازی می‌شود. سپس تابع کواریانس فاز محاسبه و با استفاده از آن چگالی طیفی توان فاز در دو راستای موازی سطح گرم‌کن و عمود بر آن بدست می‌آید. با مقایسه‌ی تابع برازش شده به چگالی طیفی توان بدست آمده از داده‌های تجربی با مدل کلموگروف مشاهده می‌شود که محیط متلاطم همرفتی، غیر کلموگروفی است. بعلاوه تاثیر گرادیان‌های دمایی مختلف بر چگالی طیفی توان بررسی می‌شود.

کلید واژه- تلاطم، همرفت، حسگر جبهه‌موج، گرادیان دما، چگالی طیفی توان.

Generation and investigation of Non-Kolmogrov convective air turbulence by the measurement of phase power spectrum of light beam propagating through it

Ebrahim Mohammady Razi[1], Saifollah Rasouli[1, 2],

[1]Department of Physics, Institute of Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran, P. O. Box: 45195-1159.
[2]Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran, P. O. Box: 45195-1159.

Abstract- Recently, a novel set-up based on moiré technique in conjunction with use of two telescopes have presented by the authors for investigation of turbulent media. In this work, by use of a telescope a plane wave is produced and propagates through a convective air turbulence medium. A flat plane heater with an upper surface area of 50×100 cm^2 is used to produce temperature gradients (TG). The heater's temperature is controlled from room temperature to 200ºC. At the end of the turbulent medium, the second telescope and a two-channel moiré based wave front sensor have been installed. Analyzing the data of the wave front sensor, the aberrated wave front was reconstructed. Then using phase covariance function measurement, power spectrum was calculated in two directions. By comparing the phase power spectrum with the Kolmogrov model we show that the convective air turbulence is Non-Kolmogrov. Also, the effect of TG on power spectrum was investigated.

Keywords: turbulence, convection, Wave front sensing, Temperature gradient, phase power spectrum.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

در یک سیال متلاطم تابع توزیع سرعت، دما و چگالی ذرات برحسب زمان و مکان به صورت تصادفی هستند. به عبارت دیگر سرعت، دما و چگالی ذرات در هر نقطه درون سیال در گذر زمان را می‌توان با متغیرهای تصادفی بیان نمود. همچنین در یک زمان در نقاط مختلف هم چنین قاعده ای برقرار است. حرکت‌های تلاطمی در حضور گرادیان‌های دما، رطوبت و فشار باعث اختلال در ضریب شکست نور هنگام عبور از محیط متلاطم می‌شود که در اصطلاح آن‌را تلاطم اپتیکی گویند. مطالعه‌ی تلاطم جوی با توجه به نقش پررنگ آن در بسیاری از حوزه‌های سنجش و ارتباطات حائز اهمیت است. مدل‌های مختلفی برای بررسی تلاطم اپتیکی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل کلموگروف، تاتارسکی، ون کارمن و نیز مدل تعمیم یافته اشاره کرد. مدل کلموگروف که بر پایه همگن و همسانگرد بودن تلاطم استوار است تنها در ناحیه لختی اعتبار دارد. آزمایش‌های متعددی در جو انحراف از این مدل را نشان داده‌اند. با توجه به کنترل ناپذیری شرایط جوی، در این مقاله در نظر است محیط متلاطم همرفتی با شرایط مشابه تلاطم جوی لایه‌های نزدیک سطح زمین در آزمایشگاه تولید شود. سپس با استفاده از یک چیدمان جدید آزمایشگاهی شامل دو تلسکوپ با دهانه‌های ورودی ۱۴و ۸ اینچ و حسگر مارهای دو کانالهی جبههی موج، چگالی طیفی توان فاز جبههی موج عبوری از محیط متلاطم همرفتی محاسبه می‌شود. در نهایت با برازش تابع چگالی طیفی نشان خواهیم داد که محیط متلاطم همرفتی در حضور گرادیان دمای دو بعدی ناکلموگروف است.

۲- آزمایش

شکل۱ چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. این چیدمان [۱] شامل لیزر، عدسی اسفریک، دو عدد تلسکوپ، گرم-کن برقی، حسگر مارهای دوکانالهی جبههی موج ، دوربین CCD و رایانه می‌باشد. باریکه لیزر پیوسته با دمش دیودی با توان ۵۰ میلی‌وات و طول‌موج ۵۳۲ نانومتر توسط یک عدسی اسفریک کانونی می‌شود. محل عدسی اسفریک به گونه‌ای تنظیم می‌شود تا کانون آن بر کانون پشتی تلسکوپ اول منطبق گردد. پرتو لیزر توسط تلسکوپ پهن و موازی شده و بعد از عبور از محیط متلاطم وارد تلسکوپ دوم می‌شود. دو تلسکوپ کاملاً هم خط شده‌اند. قطر تلسکوپ اول و دوم به ترتیب ۱۴ و ۸ اینچ است. از یک گرم‌کن برقی با سطح مقطع ۵۰×۱۰۰ سانتیمتر مربع برای ایجاد گرادیان دما و نیز ایجاد محیط متلاطم همرفتی استفاده شده است. دمای گرم‌کن در بازه‌ی ۲۰ الی۱۶۰ درجه‌ی سانتیگراد تغییر می‌کند. ناحیه‌ی متلاطم توسط دو دیواره‌ی پلاستیکی از دیگر بخش‌ها جدا شده است. دو تلسکوپ در ارتفاع ۸۰ سانتیمتری نسبت به گرم‌کن قرار دارند. در انتهای تلسکوپ دوم حسگر جبههی موج مارهای دوکاناله قرار گرفته است. این حسگر اولین بار توسط رسولی و همکارانش[۲] برای مطالعه‌ی تلاطم جوی معرفی شد. جبهه‌ی موج نور توسط تحلیل داده‌های این حسگر بازسازی شده و اطلاعات مربوط به جبهه‌ی موج عبوری از لایه‌ی متلاطم محاسبه می‌شود.

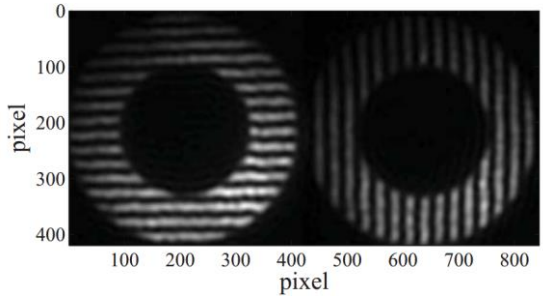




شکل ۱: چیدمان آزمایش به همراه نمای بزرگ شده حسگر مارهای دو کانالهی جبههی موج

از پدیده‌ی تالبوت و اثر مارهی چرخشی در طراحی این حسگر استفاده شده است. باریکه‌ی لیزر پس از عبور از محیط متلاطم وارد تلسکوپ دوم می‌شود. یک عدسی موازی‌ساز طوری پشت تلسکوپ دوم قرار گرفته که کانون

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۲: نمونه الگوی ماره ثبت شده توسط CCD

آن بر کانون تلسکوپ منطبق است. باریکه‌ی لیزر پس از کانونی شدن توسط تلسکوپ بوسیله‌ی این عدسی موازی شده و با قطری کوچکتر وارد حسگر جبهه‌ی موج می‌شود. سپس توسط باریکه شکن BS به دو قسمت با شدت برابر تقسیم شده و هر قسمت وارد یک کانال می‌شود. در هر کانال یک انحراف‌سنج ماره‌ای متشکل از دو توری به فاصله‌ی تالبوت z_k از هم قرار دارد. با قرار دادن توری دوم در مکان خود تصویر توری اول طرح ماره در هر کانال تشکیل خواهد شد. راستای خطوط توری‌ها در دو کانال نسبت به هم به گونه‌ایست که در یکی طرح ماره‌ی افقی و در دیگری ماره‌ی قائم تشکیل شود. بلافاصله بعد از توری-های دوم از هر کانال یک صفحه مات قرار داده شده تا نقش ماره مربوط به هر کانال بر روی آن‌ها تشکیل شود. با استفاده از یک عدسی تصویرساز مناسب نقش فریز ماره بر روی صفحه‌ی حساس دوربین CCD تصویر شده و توسط آن به رایانه منتقل می‌شود تا مورد تحلیل قرار گیرد. گام توری‌های مورد استفاده در این حسگر ۰/۱ میلیمتر و فاصله‌ی تالبوت ۳۷/۵ میلیمتراست. برای انجام آزمایش دمای گرم‌کن را در بازه‌ی ۲۸ تا ۱۶۰ درجه‌ی سانتیگراد با تغییرات ۱۰ درجه تغییر داده و برای هر دما ۵ بار آزمایش را تکرار کرده، سپس از نتایج میانگین‌گیری می‌کنیم. سرعت داده‌برداری توسط دوربین CCD، ۳۰ تصویر در ثانیه و زمان نوردهی ۱ میلی‌ثانیه است. برای بررسی هر داده، از ۲۰۰۰ تصویر استفاده شده است.

۳- محاسبه‌ی چگالی طیفی توان فاز جبهه‌ی موج

روش بازسازی جبهه‌ی موج پس از عبور از محیط متلاطم با استفاده از حسگر ماره‌ی دوکاناله‌ی جبهه‌ی موج در مرجع [۱و۳] به طور مفصل بحث شده است. پس از بازسازی جبهه‌ی موج در دهانه‌ی تلسکوپ دوم می‌توان تابع کواریانس فاز را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد

$$B_\varphi(\xi) = \left\langle \varphi^*(\vec{r})\varphi(\vec{r}+\vec{\xi}) \right\rangle \qquad (۲)$$

که $B_\varphi(\xi)$ تابع کواریانس فاز بین دو نقطه به فاصله ξ، φ فاز جبهه‌ی موج و $\langle ... \rangle$ میانگین‌گیری آنسامبلی است. در برخی کاربردهای فرایندهای تصادفی از تابع چگالی طیفی توان که تبدیل فوریه تابع کواریانس است و تغییر رفتار فرایند تصادفی را در ناحیه‌ی فرکانس فضایی نشان می‌دهد استفاده می‌شود. رابطه‌ی بین چگالی طیفی توان $\phi_\varphi(\kappa)$، و تابع کواریانس $B_\varphi(\xi)$ در یک بعد به صورت زیر است [۴]

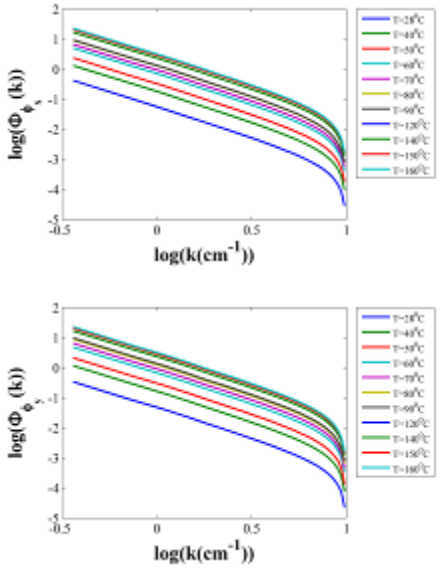
$$\phi_\varphi(\kappa) = \frac{1}{2\pi^2\kappa}\int_0^\infty B_\varphi(\xi)\sin(\kappa\zeta)\zeta d\zeta \qquad (۳)$$

با استفاده از این رابطه، می‌توان چگالی طیفی توان را در دماهای مختلف گرم‌کن و در دو راستای x، موازی سطح گرم‌کن، و y ،عمود بر آن، محاسبه کرد. شکل (۳) چگالی طیفی توان را برای دو راستای x و y نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، ارتفاع چگالی طیفی توان در دو راستا با افزایش دما افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع نشان دهنده‌ی افزایش شدت تلاطم است. با استفاده از این تابع، می‌توان کلموگروفی بودن تلاطم را بررسی کرد. چگالی طیفی توان فاز یک بعدی در مدل کلموگروف به صورت زیر است [۵]

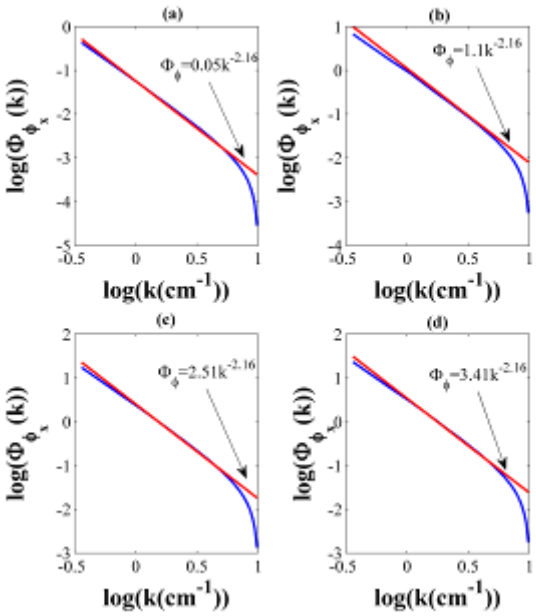
$$\phi_\varphi(\kappa) \propto \kappa^{-5/3} \qquad (۴)$$

شکل(۴) نمودار لگاریتمی چگالی طیفی توان را به همراه تابع برازش شده در دماهای مختلف گرم‌کن را نشان می‌دهد. در مدل کلموگروف اندازه‌ی نمای چگالی طیفی توان ۱/۶۶ است. با توجه به این‌که نمای تابع برازش شده کمتر از این مقدار است، تلاطم همرفتی غیر کلموگروفی است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۳: چگالی طیفی توان فاز در دو راستا و در دماهای مختلف گرم‌کن



شکل ۴: تابع برازش شده‌ی چگالی طیفی توان فاز بر داده‌های تجربی در دمای a) ۴۰ b) ۷۰ c) ۱۴۰ d) ۱۶۰ درجه‌ی سانتیگراد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از گرم‌کن برقی محیط متلاطم همرفتی مشابه تلاطم جوی لایه‌های نزدیک سطح زمین تولید شد. با استفاده از چیدمان جدیدی که قبلاً توسط مولفین برای بررسی محیط متلاطم ارایه شد جبهه‌ی موج نور پس از عبور از محیط متلاطم بازسازی شد. با محاسبه‌ی تابع کواریانس فاز چگالی طیف توانی فاز جبهه موج در دو راستا تعیین شد. با مقایسه چگالی طیفی توان با مدل کلموگروف مشخص شد که محیط متلاطم همرفتی غیر کلموگروفی است. در نهایت تاثیر گرادیان‌های دمایی مختلف بر این تابع تعیین گردید.

مراجع

[۱] ابراهیم محمدی رازی، سیفاله رسولی، محسن دشتی، *تعیین ابیراهی‌های جبهه موج باریکه نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی و تاثیر گرادیان‌های دمایی دو بعدی مختلف بر آن*، سومین کنفرانس لیزر و کاربردهای آن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۳

[2] Rasouli S. et al, "An adjustable, high- sensitivity, and wide dynamic range two channel wave-front sensor based on the moiré deflectometry", Optics Express 18(23), 23907-23915, 2010.

[3] Dashti M. et al, *Measurement and statistical analysis of wavefront distortions induced by atmospheric turbulence using two-channel moiré deflectometry*, **J. Opt.** 14,095704 (2012) 1-10.

[4] L. C. Andrews, R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, SPIE Press, 2005.

[5] V. P. Lukin, *Optical measurement of the outer scale of atmospheric turbulence*, **Proc. SPIE**, Vol. 1968, 1993.1

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]