بررسی تابع همدوسی فضایی باریکه نور عبوری ازمحیط متلاطم همرفتی

ابراهیم محمدی رازی[۱]، رضا شکوهی قهفرخی[۱]

[۱]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده – در این مقاله تاثیر محیط متلاطم همرفتی آزمایشگاهی بر میزان همدوسی جبهه موج عبوری از آن بررسی می‌شود. تلاطم همرفتی ایجاد شده مشابه تلاطم همرفتی لایه‌های سطح زمین است. این محیط متلاطم توسط گرم‌کن برقی با ابعاد $100\times200cm^2$ ایجاد شده است. جبهه‌ی موج تخت از این محیط همرفتی عبور داده می‌شود. با استفاده از حسگر ماره‌ای دو کاناله جبهه‌ی موج، جبهه‌ی موج نور عبوری از این محیط در انتهای مسیر بازسازی می‌شود. با استفاده از داده‌های فاز جبهه‌ی موج، تابع ساختار فاز جبهه‌ی موج محاسبه می‌شود. با فرض گاوسی بودن افت و خیزهای ضریب شکست محیط که منجر به افت و خیزهای جبهه موج می‌شود و با استفاده از تابع ساختار فاز جبهه موج، تابع همدوسی نور لیزر محاسبه می‌شود. در نهایت تاثیر گرادیان‌های دمایی متفاوت بر میزان همدوسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که هرچه گرادیان دما در محیط متلاطم بیشتر باشد میزان همدوسی پرتو نوری با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

کلید واژه- تابع همدوسی، تلاطم همرفتی، حسگر جبهه موج.

Investigation the spatial coherence function of light beam propagating through convective air turbulence

Ebrahim Mohammadi Razi[1], Reza Shokoohi [1]

[1]Faculty of Physics, Department of Basic sciences, University of Bojnord, Bojnord, Iran, P. O. Box:1339

Abstract- In this paper, the effect of convective air turbulence on light beam's coherence function, which propagated through it has been investigated. The produced convective air turbulence is similar to convective turbulence of ground layers. This turbulence medium has been created by electrical heater with dimensions of 100×200 cm^2. The plane wave has been propagated through the turbulent medium. The propagated light's Wave front from this medium has been reconstructed at the end of path using moiré based wave front sensor. Using the wave front sensor data, the phase structure function of the light was calculated. Assuming the Gaussian statistics of refractive index which causes the Gaussian optical phase fluctuations, the coherence function of light beam's was calculated. Then the effects of different temperature gradients on the coherence function were studied. The results show that, in high temperature gradients the light beam's coherence function decreases faster.

Keywords: Coherence Function, Convective turbulence, Wave front sensor.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل گسترش روز افزون کاربردهای مهم استفاده از لیزر در بحث ارتباطات نوری فضای آزاد، تصویربرداری ، هدف‌یابی و ...، بررسی رفتار انتشاری باریکه‌های لیزری در جو متلاطم از جمله موضوعات حائز اهمیت می‌باشد[۱]. همراه شدن افت و خیزهای دما و فشار با حرکت باد، منشا تلاطم در محیط‌هایی نظیر جو است. تغییرات تصادفی ضریب شکست جو که از آن به عنوان تلاطم اپتیکی یاد می‌شود، ناشی از همین افت و خیزهاست. توزیع تصادفی مکانی و زمانی ضریب شکست تغییراتی را در باریکه‌ی نور عبوری از جو ایجاد می‌کند که خود را به صورت افت و خیزهای زمانی شدت و فاز جبهه-ی موج باریکه نور نشان می‌دهد. در اثر این افت و خیزها، ویژگی‌های پرتو لیزر عبوری از آن از جمله واگرایی، قطبش، کیفیت پرتو و درجه همدوسی فضایی و زمانی دچار تغییر می‌شود. سطح زمین که منشا تلاطم در لایه-های نزدیک خود است به علت داشتن پوشش‌های گیاهی و خاکی متفاوت میزان متفاوتی از نور خورشید را جذب می‌کند. در نتیجه قسمت‌های مختلف سطح زمین دارای دمای متفاوتی است. از طرفی هر چه از سطح زمین دور می‌شویم دمای محیط به علت فاصله گرفتن از منبع گرمایی کاهش می‌یابد . در نتیجه نور عبوری از لایه‌های نزدیک سطح زمین در مسیرهای موازی سطح زمین گرادیان دمای متفاوتی را در دو راستای موازی سطح و عمود بر آن تجربه می‌کند. بررسی پارامترهای مختلف جو متلاطم از جمله گرادیان دما، سرعت و جهت بادهای برشی و ... بر ویژگی‌های پرتو نور عبوری از آن به علت کنترل ناپذیری این پارامترها بسیار دشوار است. بدین منظور نویسندگان در پژوهش‌های اخیر خود ابتدا با ساخت گرم‌کن برقی محیط متلاطم همرفتی کنترل شده-ی آزمایشگاهی نظیر تلاطم لایه‌های نزدیک سطح زمین تولید نمودند و با استفاده از داده‌های حسگر ماره‌ای دوکاناله‌ی جبهه موج آمار افت و خیزهای زاویه فرود و نیز تاثیر محیط متلاطم همرفتی را بر ابیراهی‌های جبهه‌ی موج باریکه عبوری از آن را مورد بررسی قرار دادند[۲و۳]. با توجه به اینکه همدوسی فضایی لیزر و نیز تاثیر محیط متلاطم بر آن تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته است لذا در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از داده‌های حسگر ماره‌ای دوکاناله‌ی جبهه‌ی موج پس از بازسازی جبهه موج پرتو عبوری از محیط متلاطم، تابع همدوسی فضایی باریکه را محاسبه نموده و تاثیر گرادیان دمای متفاوت بر آن مورد بررسی قرار گیرد.

چیدمان آزمایش

شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش را نشان می-دهد[۲]. در این چیدمان نور لیزر Nd-YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از تلسکوپ اول موازی شده و وارد محیط متلاطم همرفتی می‌شود. از یک گرم‌کن برقی با ابعاد $100\times200cm^2$ با دمای قابل تنظیم برای ایجاد گرادیان دما و نیز ایجاد محیط متلاطم همرفتی مشابه لایه‌های نزدیک سطح زمین استفاده شده است. نور عبوری از محیط متلاطم توسط تلسکوپ دوم دریافت می-شود. این نور با استفاده از یک عدسی که کانون آن بر کانون تلسکوپ دوم منطبق است با قطر کمتر وارد حسگر ماره‌ای دو کاناله‌ی جبهه موج می‌شود. نحوه‌ی کار این حسگر به طور مفصل در مرجع[۴] بیان شده است. با استفاده از داده‌های این حسگر جبهه‌ی موج نور عبوری از محیط تلاطمی در دهانه تلسکوپ دوم بازسازی می‌شود. بعد از بازسازی جبهه‌ی موج تابع ساختار فاز آن به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود[۱]

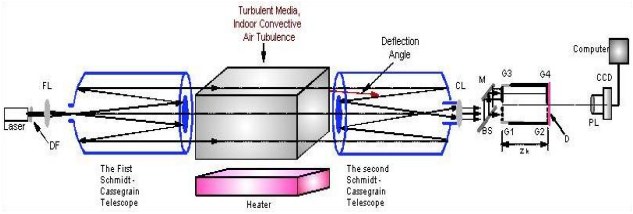
$$D_\varphi(\vec{r})=\left\langle\left|\varphi(\vec{R}+\vec{r})-\varphi(\vec{R})\right|^2\right\rangle, \quad (1)$$

که در آن $\varphi(\vec{R})$ و $\varphi(\vec{R}+\vec{r})$ به ترتیب مقادیر فاز در دو نقطه $\vec{R}$ و $\vec{R}+\vec{r}$ می‌باشند. در راستای y به علت فاصله گرفتن از منبع گرما، گرادیان دمای عمودی وجود دارد. بعلاوه با توجه به اینکه سطح گرم‌کن به طور کاملاً یکنواخت گرم نمی‌شود در راستای x نیز گرادیان دما داریم[۳]. گرادیان دما در دو راستا با هم متفاوت‌اند. گرادیان دما در راستای عمود بر سطح گرم‌کن به مراتب بیشتر از گرادیان در سطح آن می‌باشد(گرادیان دما در دو راستا تقریباً مشابه لایه‌های سطح زمین است). به علت تغییرات دما نسبت به ارتفاع از گرم‌کن شدت تلاطم نیز در ارتفاع‌های مختلف متفاوت است. برای بررسی تاثیر گرادیان‌های دمای مختلف بر میزان همدوسی فضایی پرتو

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

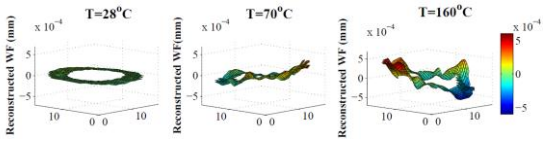
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

لیزر، دمای سطح گرم‌کن را در بازه ۲۸-۱۶۰ درجه سانتیگراد با تغییرات ۱۰ درجه‌ای بالا می‌بریم. هنگامی که گرم‌کن خاموش است دمای محیط آزمایشگاهی ۲۸ درجه است. در هر دما ۱۰۰۰۰ تصویر از فریز ماره حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه‌ی موج با سرعت ۳۰ تصویر در ثانیه ثبت شده و در نتیجه ۱۰۰۰۰ جبهه‌ی موج با سرعت مشابه در دهانه تلسکوپ دوم بازسازی می‌شود. در نهایت تابع ساختار فاز در این دو راستا تعیین می‌شود. برای این کار نقاطی از جبهه موج را که در یک راستا به یک فاصله از هم قرار دارند انتخاب و مربع اختلاف فاز آن‌ها را محاسبه می‌کنیم. سپس میانگین‌گیری آنسامبلی برای هر فاصله معین برای جبهه موج انجام می‌شود. در نهایت میانگین-گیری را بر روی تعداد جبهه موج‌های بازسازی شده در هر دما انجام می‌دهیم.



شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش: استفاده از دو تلسکوپ رو در رو و حسگر ماره‌ای دو کاناله‌ی جبهه‌ی موج برای بازسازی جبهه موج. CL، BS ، G،M به ترتیب عدسی کانونی کننده، پرتوشکاف، آینه و توری است.

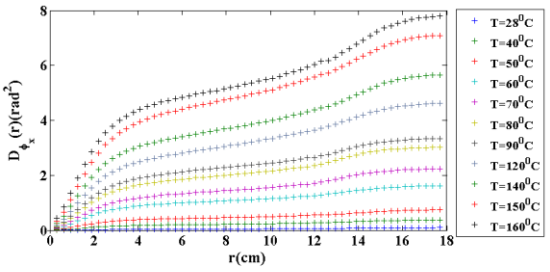
تابع ساختار فاز را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود. ناحیه‌ی کوچکتر از بازه لختی که در آن فاصله بین دو نقطه کوچکتر از مقیاس درونی تلاطم است($r < l_0$)، ناحیه لختی($l_0 < r < L_0$) و ناحیه‌ای که فاصله بین نقاطی که تابع ساختار را محاسبه می‌کنیم بزرگتر از مقیاس بیرونی تلاطم است($r > L_0$).



شکل ۲: جبهه موج بازسازی شده توسط حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج در ارتفاع ۸۰ سانتیمتری در دماهای مختلف سطح گرم‌کن.

نتایج

شکل۲ جبهه موج بازسازی شده توسط حسگر ماره‌ای را نشان می‌دهد. در این آزمایش باریکه نور در ارتفاع ۸۰ سانتیمتری نسبت به گرم‌کن محیط متلاطم را طی می-کند. همانگونه که ادعا شده است هنگامی که گرم‌کن خاموش است جبهه موج تخت است. با افزایش دمای سطح گرم‌کن میزان تلاطم شدیدتر شده در نتیجه اعوجاج جبهه موج نیز بیشتر می‌شود. این اعوجاج‌ها در دمای ۱۶۰ درجه به اوج خود می‌رسند. اعوجاج‌های جبهه‌ی موج را می‌توان بر حسب توابع زرنیکه بیان نمود. هرچه دمای سطح گرم‌کن بیشتر شود سهم توابع بالاتر زرنیکه در ابیراهی‌های جبهه موج بیشتر می‌شود. با استفاده از جبهه موج حاصله می‌توان تابع ساختار فاز آن را محاسبه نمود. شکل ۳ تابع ساختار فاز جبهه موج را نشان می‌دهد. رفتار تابع ساختار در ناحیه دوم و سوم که در قبلاً اشاره شد در این شکل به طور کامل دیده می‌شود. همچنین به علت اینکه کمترین فاصله قابل اندازه‌گیری در روی جبهه موج در حدود ۳ میلیمتر است و این فاصله از مرتبه مقیاس درونی تلاطم است، رفتار تابع ساختار در ناحیه اول را نمی‌توان مشاهده نمود. مطابق شکل با افزایش دمای سطح گرم‌کن ارتفاع تابع ساختار افزایش می‌یابد. ارتفاع تابع ساختار با شدت تلاطم، C_n^2، متناسب است. بعبارت دیگر افت و خیز زاویه فرود نور در گرادیان‌های دمای بالاتر، بیشتر است.



شکل ۲: رفتار تابع ساختار فاز جبهه موج در حضور گرادیان دمای مختلف. ارتفاع مسیر عبور نور لیزر نسبت به گرم‌کن ۸۰ سانتیمتر است.

هنگامی که نور لیزر از محیط متلاطم عبور می‌کند درجه همدوسی فضایی و زمانی آن کاهش می‌یابد. همدوسی فضایی یا به عبارت دیگر همبستگی فاز جبهه موج نور در دو نقطه از جبهه موج با رابطه زیر تعریف می‌شود

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

$$C(r_1,r_2)=\langle\psi(r_1)\psi^*(r_2)\rangle$$
$$\psi(r_1)=e^{i\varphi(r_1)},\qquad \psi(r_2)=e^{i\varphi(r_2)} \qquad (۲)$$
$$\Rightarrow C(r_1,r_2)=\langle e^{i\varphi(r_1)-i\varphi(r_2)}\rangle$$

که در رابطه بالا $\psi(r)$ جبهه موج در مکان r و $\varphi(r)$ فاز جبهه موج و $C(r_1,r_2)$ همبستگی فاز یا تابع همدوسی فاز جبهه موج است. برای هر متغیر تصادفی با توزیع گاوسی داریم:

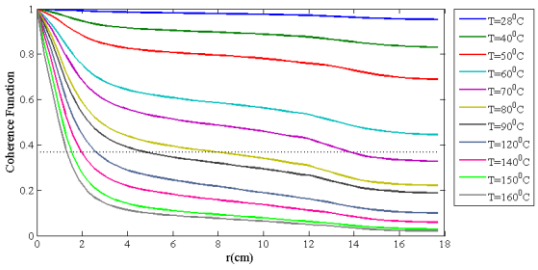
$$\langle e^{i\varphi}\rangle=e^{\frac{\langle\varphi^2\rangle}{2}}, \qquad (۳)$$

به علت وجود گرایان دمای موازی سطح گرم‌کن و عمود بر آن و نیز با توجه به جریان‌های تلاطمی محیط، پرتو نور هنگام عبور از محیط متلاطم بسته‌های هوایی با دمای متفاوت و به تبع آن ضریب شکست متفاوتی را تجربه می‌کند. این افت و خیزها در ضریب شکست توزیع کاتوره‌ای گاوسی دارند. در نتیجه تابع همبستگی فضایی به صورت زیر درمی‌آید.

(۴)

$$C(r_1,r_2)=\langle e^{i\varphi(r_1)-i\varphi(r_2)}\rangle$$
$$=e^{-\frac{\langle(\varphi(r_2)-\varphi(r_1))^2\rangle}{2}}=e^{-\frac{D_\varphi(\vec{r})}{2}},$$

شکل ۴ تابع همدوسی فضایی فاز جبهه موج عبوری از محیط متلاطم همرفتی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تابع همدوسی فضایی پرتو نور در ابتدا تخت پس از عبور از محیط متلاطم همرفتی در حضور گرادیان‌های دمایی مختلف.

همانگونه که از شکل ۴ پیداست با افزایش دمای سطح گرم‌کن تابع همدوسی با سرعت بیشتری افت پیدا می‌کند. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد دمای بالای گرم‌کن باعث افزایش قدرت تلاطم خواهد شد. تلاطم قوی‌تر افت و خیز بیشتر جبهه موج را به دنبال دارد که باعث کاهش همدوسی فضایی پرتو لیزر می‌شود. برای بررسی بهتر خط $C=e^{-1}$ نیز در شکل رسم شده است که معیاری است از طول همدوسی فضایی. به عبارت این خط فاصله‌ای روی جبهه موج را نشان می‌دهد که در آن مقدار همدوسی ۰/۳۶ مقدار ماکزیمم خود است. در دماهای پایین سطح گرم‌کن میزان همدوسی افت چندانی ندارد اما در دماهای بالای ۷۰ درجه سانتیگراد میزان همدوسی کاهش می‌یابد. در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد و در فاصله ۸۰ سانتیمتری از گرم‌کن طول همدوسی کمتر از ۲ سانتیمتر است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک گرم‌کن برقی محیط متلاطم همرفتی نظیر محیط تلاطمی جوی در لایه‌های نزدیک سطح زمین در آزمایشگاه تولید شد. با استفاده از حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج، جبهه موج نور عبوری از این محیط بازسازی شد. با استفاده از فاز جبهه موج، تابع ساختار فاز در حضور گرادیان دما محاسبه شد. با فرض گاوسی بودن افت و خیز ضریب شکست و با استفاده از تابع ساختار فاز، تابع همدوسی فضایی جبهه موج نور لیزر هنگام که در ارتفاع ۸۰ سانتیمتر از منبع گرمایی از محیط متلاطم انتشار می‌یابد استخراج شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دمای سطح گرم‌کن تابع ساختار فاز کاهش می‌یابد. همدوسی فضایی جبهه موج در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد کمتر از ۲ سانتیمتر است.

مراجع

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

[۲] محمدی رازی. ابراهیم ، رسولی. سیف اله، دشتی. محسن، "تعیین ابیراهی‌های جبهه موج باریکه نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی و تاثیر گرادیان‌های دمایی دوبعدی بر آن"، سومین کنفرانس بین المللی لیزر و کاربردهای آن، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۳.

[۳] محمدی رازی. ابراهیم ، رسولی. سیف اله، "بررسی آمار تلاطم همرفتی با استفاده از انحراف‌سنج ماره‌ای دو کاناله"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۴.

[4] M. Dashti, S. Rasouli, "Measurement and statistical analysis of the wave front distortion induced by atmospheric turbulence using two channel wave-front sensor moiré deflectometry ", J. Opt., Vol. 14, 095704, 2012.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]