بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تعیین ثابت ساختار ضریب شکست جو متلاطم بر مبنای شیب شدت در لبه‌های تصاویر گسترده

مجتبی رحیمی[۱]، ابوالحسن مبشری[۲]، مهدی قائدرحمتی[۱]، جعفر بختیارشوهانی[۱]، مسلم جوادی‌منش[۱]، جلال جلالی[۱] و هادی نوذری[۱]

[۱] مؤسسه‌ی دکتر اردشیر حسین‌پور

[۲] پژوهشکده‌ی اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان

چکیده –در این مقاله روشی برای تعیین ثابت ساختار ضریب شکست جو متلاطم با استفاده از تصویربرداری با نرخ فریم بالا ارائه شده است. این روش بر مبنای پرش تصویر در صفحه‌ی کانونی سامانه‌ی اپتیکی است. به منظور تعیین ثابت ساختار ضریب شکست (C_n^2) محیط، از واریانس شدت در لبه‌های تصویر، که پیکسل‌هایی با گرادیان شدت بالا هستند، استفاده می‌شود. پارامترهای سامانه‌ی تصویربرداری با توجه به مقیاس همبستگی فضایی و زمانی زاویه فرود تعیین می‌شوند. این روش با استفاده از تصاویر ثبت شده در محیط به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از سایر روش‌ها دارد.

کلید واژه- تلاطم اپتیکی، ثابت ساختار ضریب شکست، پرش تصویر، شیب شدت.

Determination of refractive index structure constant of turbulent atmosphere based on intensity gradient of image edges

Mojtaba Rahimi[1], Abolhassan Mobasheri[2], Mehdi GhaedRahmati[1], Jafar Bakhtiar Shohani[1], Moslem Javadimanesh[1], Jalal Jalali[1] and Hadi Nozari[1]

Institute of Dr. Ardeshir Hosseinpour [1]

Optics and Laser Research Center, Malek-e-Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Isfahan [2]

Abstract- In this paper we propose an approach to determine the refractive index structure constant of turbulent atmosphere using the high frame rate imaging. This method is based on image jitter at the focal plane of the optical system. To determine the refractive index structure constant of environment, intensity variance of edge pixels, that have high intensity gradient, is used. Optical system parameters are determined regarded by the angle of arrival spatial and temporal correlation scale. This method has been examined experimentally, by using the captured images taken from the environment. Experimental results show good consistence with other methods.

Keywords: Optical Turbulence, Refractive Index Structure Constant, Image Jitter, Image Gradient.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

تلاطم اپتیکی همواره انتشار امواج نوری در جو را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو در کاربردهایی مانند تصویربرداری و انتشار باریکه‌ی لیزر تعیین قدرت تلاطم جو بسیار مورد توجه است. ثابت ساختار ضریب شکست (C_n^2) کمیتی برای سنجش قدرت تلاطم جو است. تاکنون روش‌های متعددی برای تعیین تجربی قدرت تلاطم جو ارائه شده است که استفاده از پارامترهای آب و هوایی [۱]، جابجایی لکه‌ی لیزر در صفحه‌ی تصویر [۲] و سوسوزنی [۳] از جمله‌ی این روش‌ها هستند. اغلب این روش‌ها نیازمند تجهیزاتی است که استفاده از آن‌ها را دشوار می‌کند.

یکی از اثرات تلاطم جو بر سامانه‌های تصویربرداری پرش تصویر است. پرش تصویر حرکت تصویر در صفحه‌ی کانون به دلیل تغییرات زاویه‌ی فرود جبهه موج انتشار یافته در جو است [۴]. در این مقاله با توجه به وابستگی واریانس پرش تصویر به قدرت تلاطم، روشی ساده بر مبنای پردازش تصویر برای تعیین قدرت تلاطم جو پیشنهاد می‌شود. سپس با توجه به شرایطی که برای روش پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود، نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه خواهد شد.

۲- مباحث نظری

هنگامی که موج نوری در جو متلاطم منتشر می‌شوند جبهه‌ی موج دچار اعوجاج می‌شود. از این رو راستای انتشار جبهه موجی که بر دهانه‌ی یک سامانه‌ی اپتیکی فرود می‌آید به طور تصادفی تغییر خواهد کرد. تغییرات زاویه‌ی فرود در سامانه‌های تصویربرداری باعث می‌شود تصویر هر نقطه از جسم به طور مداوم در صفحه‌ی کانون جابجا شود. این پدیده منجر به تغییرات زمانی و مکانی شدت تصویر و در نهایت باعث مات‌شدگی تصویر می‌شود.

۱-۲- زاویه فرود

زاویه‌ی فرود، راستای فرود موج اپتیکی بر دهانه‌ی آشکارساز است. برای یک سامانه‌ی تصویربرداری با قطر دهانه‌ی D که بسیار بزرگتر از مقیاس درونی جو است، واریانس زاویه‌ی فرود (β) از معادله‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۴]:

$$\beta^2 = 2.91 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz \qquad (۱)$$

برای یک چشمه‌ی نقطه‌ای در فاصله‌ی L، با فرض آن که جبهه موج در دهانه سامانه‌ی اپتیکی تخت در نظر گرفته شود و C_n^2 در مسیر انتشار موج ثابت باشد، واریانس جابجایی تصویر در صفحه‌ی کانونی بر حسب پیکسل از معادله‌ی (۲) به دست می‌آید [۵]:

$$\sigma^2 = \beta^2 IFOV^{-2} = 2.91 D^{-1/3} IFOV^{-2} L C_n^2 \qquad (۲)$$

که $IFOV$ میدان دید لحظه‌ای سامانه‌ی اپتیکی است.

۲-۲- مقیاس همبستگی زاویه فرود

ابیراهی‌های جبهه موج ناشی از تلاطم جو را می‌توان بر حسب بسط چند جمله‌ای‌های زرنیک توصیف کرد. برای اجسام نقطه‌ای زاویه‌ی ایزوپلانتیک به صورت زاویه‌ای بیان می‌شود که جملات مختلف چند جمله‌ای زرنیک همبسته هستند. برای اجسام گسترده اعوجاج لبه‌های تصویر ناشی از جملات دوم و سوم بسط (ابیراهی کج‌شدگی) است و جملات بالاتر در آن تأثیری ندارند. بنابراین زاویه ایزوپلانتیک متداول در این مورد کاربردی ندارد. به عبارت دیگر زاویه فرود برای جبهه موج بخش‌های مختلف جسم در تمام میدان دید به صورت کاتوره‌ای تغییر می‌کند و نتیجه آن به صورت حرکت مستقل از هم بخش‌های مختلف لبه تصویر مشاهده می‌شود. برای یک جسم گسترده به جای زاویه ایزوپلانتیک، مقیاس همبستگی زاویه فرود تعریف می‌شود که در شرایط $L_0 > 2D$ عبارت است از [۶]:

$$\theta_c \approx D/L \qquad (۳)$$

که L طول مسیر انتشار و L_0 مقیاس بیرونی تلاطم است. همبستگی زاویه فرود یکی از پارامترهای مهم در تعیین مشخصات سامانه تصویربرداری است.

یکی از پارامترهای مؤثر در تعیین قدرت تلاطم با استفاده از اعوجاج لبه تصویر، نرخ تصویربرداری سامانه است که توسط همبستگی زمانی تلاطم تعیین می‌شود.

همبستگی زمانی بین مجموعه‌ی تصاویر ثبت شده برای سامانه‌ای با قطر دهانه‌ی کوچکتر از مقیاس بیرونی جو از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\tau \approx D/V \qquad (۴)$$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

در این رابطه V سرعت باد در جو متلاطم است. برای به دست آوردن نتایج قابل قبول باید تصویربرداری در محیط به گونه‌ای انجام شود که سرعت داده‌برداری بسیار بیشتر از تغییرات مکانی و زمانی تصویر باشد. این شرایط را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

$$IFOV \ll D/L \quad (۵)$$

$$T \ll D/V \quad (۶)$$

در معادله فوق T زمان نوردهی است.

۲-۲- واریانس شدت

معادله‌ی (۲) رابطه بین C_n^2، میدان دید لحظه‌ای سامانه تصویربرداری و واریانس زاویه فرود را نشان می‌دهد. بر اساس بحث مطرح شده در بخش‌های قبل، تغییرات زاویه فرود پرتو به صورت جابجایی لبه‌های تصویر مشاهده می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط همبستگی زاویه‌ای و زمانی، با استفاده از رابطه‌ی بین واریانس شدت لبه تصویر و واریانس زاویه فرود جبهه موج می‌توان C_n^2 را تعیین کرد.

برای مجموعه تصاویری که همبستگی فضایی و زمانی لازم را داشته باشند، مقدار شدت در پیکسل (i,j) از تصویر kام را می‌توان با معادله‌ی (۷) به تصویر بدون حرکت ارتباط داد:

$$I(i,j,k) = I_0(i + \Delta x_{i,j,k}, j + \Delta y_{i,j,k}) \quad (۷)$$

در این رابطه Δx و Δy جابجایی افقی و عمودی تصویر در صفحه‌ی کانونی است. واریانس شدت هر پیکسل در مجموعه‌ای از k تصویر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_I^2(i,j) = \left\langle I^2(i,j) \right\rangle - \left\langle I(i,j) \right\rangle^2 \quad (۸)$$

با بسط تیلور رابطه (۷) و در نظر گرفتن گرادیان شدت در هر پیکسل تصویر ($G(i,j)$)، واریانس جابجایی شدت به صورت معادله‌ی (۹) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_I^2(i,j) = G^2(i,j)\sigma^2(i,j) \quad (۹)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه‌ی (۲)، معادله‌ی زیر برای محاسبه مقدار ثابت ساختار ضریب شکست برای هر کدام از پیکسل‌ها به دست می‌آید:

$$C_n^2(i,j) = \sigma_I^2 D^{1/3} IFOV^2 / 2.91 G^2(i,j) L \quad (۱۰)$$

در نهایت، ثابت ساختار ضریب شکست به صورت میانگین مقادیر به دست آمده محاسبه می‌شود.

۳- اندازه‌گیری تجربی

برای محاسبه‌ی ضریب ساختار جو با استفاده از روشی که در بخش قبل توضیح داده شد، فرآیند تصویربرداری در ساعت ۸-۱۰ صبح آبان ماه ۱۳۹۵ انجام شد. هدف مورد نظر در فاصله‌ی ۹۰۰ متری از محل قرارگیری سامانه‌ی اپتیکی واقع بوده است.

مشخصات سامانه‌ی اپتیکی مورد استفاده به شرح جدول (۱) است. این سامانه‌ی اپتیکی در ارتفاع ۱۲ متر از سطح زمین واقع شده بود.

جدول (۱) پارامترهای سامانه تصویربرداری

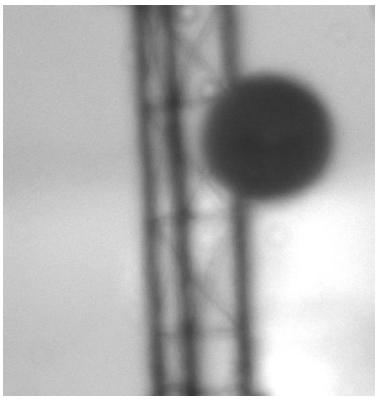
ردیف	پارامتر	نوع/ مقدار عددی
۱	نوع گیرنده اپتیکی	تلسکوپ اشمیت کاسگرین
۲	فاصله کانونی	۱۶۰۰ mm
۳	قطر دهانه	۹/۲۵ اینچ
۴	مدل دوربین	DMK 21AU04
۵	ابعاد پیکسل	۵/۶×۵/۶ µm
۶	نرخ فریم	۶۰ fps

متوسط سرعت باد در محل ۲ m/s و متوسط دمای هوا ^{0}C ۱۵ بوده است. بر اساس اطلاعات جدول (۱)، میدان دید لحظه‌ای سامانه اپتیکی ۳/۵ µrad است. بر اساس روابط (۳) و (۴) مقیاس همبستگی زاویه فرود برابر ۲۶۰ µrad و مقیاس زمانی برابر ۰/۱۲ s است که به خوبی شرایط (۵) و (۶) را برآورده می کند.

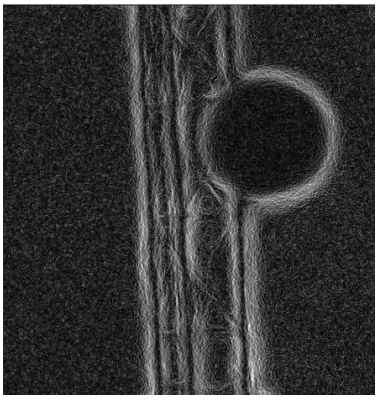
یک تصویر از مجموعه تصاویر ثبت شده در شکل ۱ نشان داده شده است. صحنه‌ی انتخاب شده برای تصویربرداری دارای پس‌زمینه‌ی یکنواخت و لبه‌های مشخص است که این لبه‌ها نقاط با گرادیان بالا را ایجاد می‌کنند.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل ۱: نمونه‌ای از مجموعه تصاویر ثبت شده از محیط.



شکل ۱: گرادیان تصویر با استفاده از فیلتر Sobel.

تصاویر گرفته شده با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB پردازش شدند. گرادیان تصاویر با استفاده از فیلتر Sobel به دست آمد که به عنوان نمونه یکی از آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در محاسبات تنها پیکسل‌های با گرادیان بالا در نظر گرفته شده است. این پیکسل‌ها در شکل ۲ به رنگ سفید هستند. با توجه به نرخ تصویربرداری، در هر مرحله انجام آزمایش، حداقل ۷۰۰۰ تصویر مورد پردازش قرار گرفته است.

جدول ۱: مقادیر محاسبه شده قدرت تلاطم در شرایط مختلف جوی.

# آزمایش	دما (^{0}C)	سرعت باد (m/s)	$C_n^2\,(m^{-2/3})$
۱	۱۲	۲/۱	۴/۴×۱۰$^{-۱۴}$
۲	۱۴	۱/۸	۲/۱×۱۰$^{-۱۴}$
۳	۱۸	۲/۲	۶/۷×۱۰$^{-۱۴}$

مقادیر به دست آمده C_n^2 از پردازش تصاویر و انجام محاسبات، در جدول (۲) ذکر شده است. مقادیر به دست آمده در این آزمایش، از لحاظ بزرگی تطابق زیادی با مقادیر به دست آمده در گزارش‌های مشابه دارند [۱] [۸].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بر مبنای تصویربرداری برای تعیین C_n^2 به عنوان معیاری برای سنجش قدرت تلاطم جو پیشنهاد شد. این روش بدون نیاز به چشمه‌ی نقطه‌ای و با استفاده از تجهیزات اپتیکی ساده برای تصاویر گسترده قابل استفاده است. در این روش، مقدار C_n^2 بر مبنای جابجایی لبه‌های تصویر تعیین می‌شود. کارآمدی این روش با آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست آمده، تطابق خوبی با گزارش‌های مشابه دارد.

مراجع

[1] Raj, A., J. Selvi, and S. Duraira, *Comparison of different models for ground-level atmospheric turbulence strength (Cn2) prediction with a new model according to local weather data for FSO applications*. Applied Optics, 2015. **54**(4): p. 802-815.

[2] Tunick, A., *Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path*. Optics Express, 2008. **16**(19): p. 14645-14654.

[3] Love, G.D., et al. *Horizontal turbulence measurements using SLODAR*. 2005.

[4] Andrews, L.C ,Field Guide to Atmospheric Optics. 2004: SPIE.

[5] Johnston, R.A., et al., *Horizontal scintillation detection and ranging Cn2(z) estimation.* Applied Optics, 2003. **42**(18): p. 3451-3459.

[6] Mikhail S. Belen'kii, J.M.S., and Patti Gillespie, *Turbulence-induced edge image waviness: theory and experiment.* Applied Optics, 2001. **40**(9): p. 1321-1328.

[7] R. Avila, A.Z., J. Borgnino, F. Martin, A. Agabi, A. Tokovinin, *Theoretical spatiotemporal analysis of angle of arrival induced by atmospheric turbulence as observed with the grating scale monitor experiment*. J. Opt. Soc. Am. A, 1997. **14**(11): p. 3070-3082.

[۸]. سپهری‌زاده، مبشری و ثقفی‌فر، تعیین قدرت تلاطم جو با استفاده از اندازه گیری تجربی سوسوزنی یک ستاره دوتایی در جو متلاطم، چهارمین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، اصفهان دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]