بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ 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

# مقایسه آزمایشگاهی اندازه‌گیری قدرت تلاطم جو به روش زاویه فرود پرتو و سوسوزنی پرتو

ندا شمسی‌پور[۱]، ابوالحسن مبشری[۲]، سید ایوب موسوی[۲]، محمد مردای[۳]

۱- گروه فیزیک- دانشگاه شهرکرد

۲- پژوهشکده علوم و فن‌آوری اپتیک و لیزر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- اصفهان

۳- گروه پژوهشی فوتونیک- دانشگاه شهرکرد

**چکیده - آشفتگی جو عامل تنزل کیفیت تصویربرداری و ارتباطات لیزری بی‌سیم است و روش‌های متفاوتی برای تعیین قدرت آشفتگی جوی پیشنهاد شده است. در این مقاله برای تعیین ثابت ساختار ضریب شکست جو، از دو روش افت و خیز زاویه فرود پرتو و افت و خیز شدت پرتو استفاده شده است. شبیه سازی آشفتگی جوی با استفاده از صفحات فاز انجام شده است و این صفحات با پاشیدن اسپری مو بر روی صفحات شیشه‌ای ساخته شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که با وجود تفاوت در منشاء و توصیف افت و خیز زاویه فرود پرتو و سوسوزنی پرتو، مقادیر به دست آمده برای ثابت ساختار ضریب شکست از دو روش با یکدیگر برابر هستند.**

کلید واژه- آشفتگی جوی، صفحات فاز، تابع چگالی احتمال گاما- گاما، ثابت ساختار ضریب شکست، زاویه فرود پرتو

# Experimental comparison of optical turbulence strength measurements by means of angle of arrival and beam scintillation methods

Neda Shamsipour[1], Abolhasan Mobashery[2], Sayed Ayoub Mousavi[2], Mohammad Moradi[3]

1- Physic department- ShahreKord University

2- Optics and laser science research center- Malek Ashtar University of technology- Isfahan

3- Photonics Research Group - ShahreKord University

Abstract-.Optical turbulence reduces the imaging and laser communication qualities. Various methods have been proposed for measuring the optical turbulence strength. In this article, two methods of angle of arrival fluctuation and beam intensity fluctuation have been used for the measurement of refractive index structure constant. Optical turbulence has been simulated by means of phase screens. In order to make phase screen, a hair spray was sprayed on glass plates. Our measurements show that despite differences in the source and description of these two methods, the values obtained for the refractive index structure constant are equal.

Keywords: optical turbulence, phase screen, gamma- gamma probability distribution function, refractive index structure constant, angle of arrival

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]



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

## ۱- مقدمه

عملکرد سامانه‌های نوری مثل تلسکوپ‌های نجومی و سامانه‌های ارتباط لیزری به صورت قابل توجهی توسط آشفتگی جو کاهش می‌یابد. آشفتگی جو ناشی از افت و خیز ضریب شکست جو در نقاط مختلف است که مستقیما با نوسانات دمایی و حرکت توده‌های هوا ارتباط دارد. در سامانه‌های تصویربرداری، اثر آشفتگی جو در نوردهی کوتاه به صورت رقص تصویر و در نوردهی بلند به صورت مات‌شدگی تصویر دیده می‌شود. اثر آشفتگی جو در این سامانه‌ها، به صورت افت و خیز فاز پرتو در نظر گرفته می‌شود و از افت و خیز دامنه میدان الکتریکی میدان نور صرف‌نظر می‌شود. در سامانه‌های ارتباط لیزری (FSO)[1]، اثر آشفتگی به صورت نوسانات دامنه خود را نشان می‌دهد که به عنوان سوسوزنی شناخته می‌شود.

با توجه به جنبه‌های مختلف ذکر شده اثر آشفتگی جو بر جبهه موج، فرمول‌بندی‌های متفاوتی برای هر کدام وجود دارد. تمام این فرمول‌بندی‌ها مبتنی بر ماهیت آماری آشفتگی جو است که اولین بار توسط کالماگروف پایه‌ریزی شد. بر این اساس روش‌های مختلفی مثل افت و خیز زاویه فرود پرتو[۱]، آشکارسازی سوسوزنی و بردیابی [۲]، آشکارسازی شیب جبهه موج و بردیابی [۳] و ... برای تعیین پارامترهای توصیف کننده آشفتگی جو ارائه شده است. مهمترین پارامتر توصیف کننده قدرت تلاطم جو، ثابت ساختار ضریب شکست ($C_n^2$) است.

در این مقاله دو روش زاویه فرود پرتو و سوسوزنی پرتو در مردمک ورودی سیستم برای تعیین پارامتر $C_n^2$ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه اصول نظری زاویه فرود پرتو و تابع چگالی احتمال سوسوزنی پرتو توضیح داده می‌شود. برای شبیه سازی آزمایشگاهی آشفتگی جوی از روش شناخته شده صفحات فازی استفاده شده است که در بخش روش انجام آزمایش توضیح داده می‌شود و نتایج آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲- مبانی نظری

ساختار ضریب شکست معیاری از قدرت نوسانات ضریب شکست است. در فاصله زمانی ثابت و ارتفاع ثابت از سطح زمین معقول است تصور کنیم که $C_n^2$ است. نمایه عمودی آشفتگی جوی که با ثابت ساختار ضریب شکست $C_n^2$ توصیف می‌شود. مقدار $C_n^2$ در محدوده $10^{-17}m^{\frac{-2}{3}}$ یا کمتر برای آشفتگی ضعیف و در محدوده $10^{-13}m^{\frac{-2}{3}}$ یا بیشتر برای وقتی است که آشفتگی قوی باشد.

### ۲-۱- زاویه فرود پرتو و رقص تصویر

زاویه‌ی فرود پرتو به عنوان میانگین شیب جبهه‌ی موج آشفته شده در محل مردمک ورودی سیستم تصویربرداری تعریف می‌شود که تابعی از مقدار میانگین گرادیان نوسانات ضریب شکست در مسیر انتشار است. تغییر زاویه فرود پرتو به صورت رقص تصویر در کانون سیستم اپتیکی مشاهده می‌شود. بنابراین داریم:

$$\alpha_x = \frac{x_c}{F} \qquad \alpha_y = \frac{y_c}{F} \tag{۱}$$

که $F$ فاصله‌ی کانونی گیرنده اپتیکی، $x_c$ و $y_c$ مختصات مرکز پرتو روی صفحه کانون گیرنده است. در طیف کالماگروف، واریانس زاویه فرود عبارت است از [۱]:

$$\sigma^2_{\alpha_{x,y}} = 2.91 C_n^2 L D^{-1/3} \tag{۲}$$

که D قطر دهانه گیرنده اپتیکی و L طول مسیر انتشار پرتو در آشفتگی جو است. براساس رابطه‌ی بالا، با در نظر گرفتن پرتوهایی با قطرهای مختلف می‌توان پارامتر $C_n^2$ را تعیین کرد.

با توجه به توصیف ابیراهی جبهه موج بر حسب چند جمله‌ای‌های زرنیک، جابجایی تصویر در صفحه کانون سیستم اپتیکی را می‌توان به جملات اولیه بسط شامل ابیراهی کج شدگی و کما نسبت داد. در حالی که جملات بالاتر بسط، به دلیل فرکانس بالای تغییرات، باعث سوسوزنی پرتو می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که منشاء این دو پدیده جملات متفاوت ابیراهی جبهه موج است.

### ۲-۲- افت و خیز شدت پرتو: سوسوزنی

هنگام عبور پرتو از لایه‌های آشفته جو، علاوه بر فاز جبهه موج دامنه آن نیز دچار افت و خیز می‌شود که به عنوان سوسوزنی شناخته می‌شود. این پدیده در مخابرات نوری فضای آزاد تاثیر مخربی دارد. واریانس رایتوف، $\sigma_1^2$، یکی از

[1] Free Space Optical communication



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

معیارهای مورد استفاده برای تعیین قدرت آشفتگی جوی است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_1^2 = 1.23 L^{\frac{11}{6}} k^{\frac{7}{6}} C_n^2 \quad (۳)$$

که k عدد موج و L فاصله انتشار موج نوری است.

برای توصیف اثر آشفتگی جو بر شدت پرتوهای نور از تابع چگالی احتمال استفاده می‌شود. توابع چگالی مختلفی برای توصیف نوسانات شدت وجود دارد از جمله لوگ-نرمال و گاما-گاما [۴]. تابع توزیع لوگ-نرمال در رژیم آشفتگی ضعیف اعتبار دارد در حالی که تابع توزیع گاما-گاما هر دو رژیم آشفتگی قوی و ضعیف را شامل می‌شود. این تابع توزیع عبارتست از:

$$p_I(s) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\langle i_s\rangle}\left(\frac{s}{\langle i_s\rangle}\right)^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta s}{\langle i_s\rangle}}\right). \quad (۴)$$

پارامترهای $\alpha$ و $\beta$ وابسته به مقیاس کوچک و بزرگ آشفتگی جوی هستند:

$$\alpha = 1/\left[\exp\left(\frac{0.20\sigma_1^2}{\left(1+0.19\sigma_1^{12/5}\right)^{7/6}}\right)-1\right] \quad (۵)$$

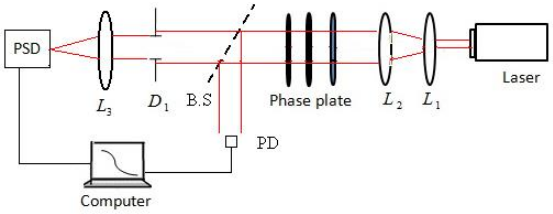
$$\beta = 1/\left[\exp\left(\frac{0.20\sigma_1^2}{\left(1+0.23\sigma_1^{12/5}\right)^{5/6}}\right)-1\right] \quad (۶)$$

برای تعیین پارامتر $C_n^2$ با استفاده از این روابط لازم است که افت و خیز شدت پرتو در مردمک ورودی سیستم اندازه‌گیری شود. با برازش رابطه (۴) بر تابع توزیع شدت می‌توان ضرائب $\alpha$ و $\beta$ را تعیین کرد و سپس مقدار $C_n^2$ را از واریانس رایتوف به دست آورد.

## ۳- روش انجام آزمایش و نتایج

برای ساخت صفحات فاز از روش پوشش دادن صفحات شیشه‌ای توسط اسپری مو استفاده شده است. این روش اولین بار توسط توماس معرفی شده است [۵] و به دلیل سادگی و ارزان بودن یک روش آزمایشگاهی مناسب است. سپس صفحات فاز بر روی یک موتور DC قرار گرفت 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 پرتو شکاف به دو بخش مساوی تقسیم شده است. قسمتی از پرتو پس از عبور از روزنه متغیر $D_1$ توسط عدسی $L_3$ روی حسگر حساس به موقعیت (PSD) کانونی می‌شود. بخش دوم پرتو به یک فوتودیود (PD) به ابعاد 10mm×۱۰mm برخورد می‌کند. این فوتودیود باید افت و خیز شدت در محل مردمک را ثبت کند، بنابراین در فاصله مساوی با فاصله بین $L_3$ و پرتو شکاف (B.S) قرار دارد.

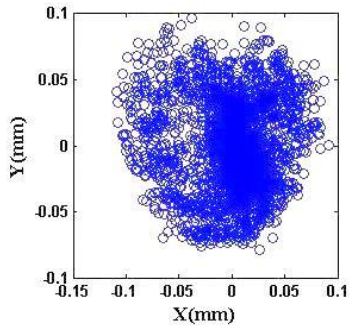
توسط عدسی $L_3$ بر روی PSD کانونی می‌شود. روزنه‌ی متغیر $D_1$ که روبروی عدسی $L_3$ قرار می‌گیرد امکان دریافت پرتو با قطرهای مختلف را فراهم می‌کند. سیگنال PSD پس از دریافت توسط یک تقویت‌کننده به کامپیوتر ارسال می‌شود.




شکل۱:طرحواره‌ی چیدمان آزمایش

### ۳-۱- افت و خیز راویه فرود پرتو

اولین مساله مورد بررسی همگنی و همسانگردی طیف توان زاویه‌ی فرود پرتو است. شکل(۲) تغییرات افت و خیز پرتو در صفحه‌ی حسگر را 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.




شکل۲: تغییرات افت و خیز پرتو در بازه‌ی زمانی ۱۲۰ ثانیه

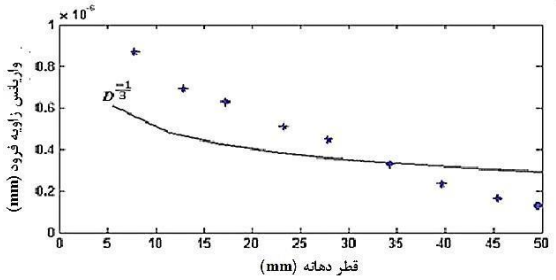
سپس برای تعیین پارامتر $C_n^2$ برای سه صفحه فاز، تغییرات واریانس زاویه‌ی فرود بر حسب قطر دهانه‌های مختلف تعیین



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

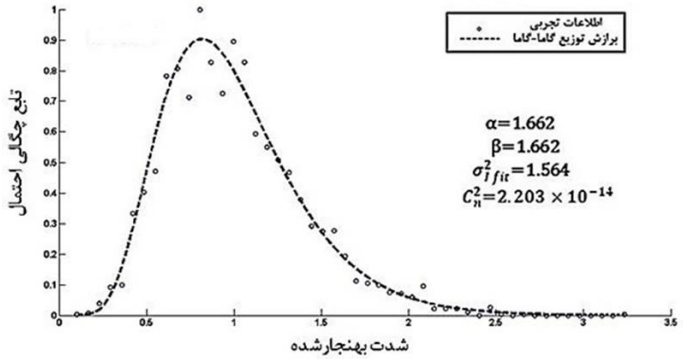
شد. شکل (۳) منحنی این تغییرات را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۲) و برازش کردن منحنی بر داده‌های تجربی، مقدار $C_n^2$ محاسبه می‌شود. برای شکل (۳) مقدار $C_n^2$ برای طول مسیر انتشار معادل ۱۰۰۰ m برابر $2.1\times10^{-14}m^{-2/3}$ به دست آمد. در شکل (۳) منحنی پیوسته بر اساس رابطه (۲) رسم شده است که 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 رابطه (۲) است.




شکل۳: تغییرات واریانس زاویه فرود بر حسب قطر دهانه‌ی پرتو

## ۲-۳- اندازه‌گیری افت و خیز شدت پرتو

در شکل (۱) پرتو دریافتی در محل آشکارساز فوتودیود کانونی نشده است و فقط بخشی از آن به آشکارساز می‌رسد. افت‌وخیزهای شدت توسط رایانه ثبت می‌گردد. بعد از اندازه‌گیری شدت در یک بازه زمانی معین، مقادیر شدت را به واحد بهنجار کرده و نمودار هیستوگرام شدت رسم شد. سپس با برازش کردن تابع چگالی احتمال گاما-گاما، رابطه (۴)، روی نمودار هیستوگرام بهنجار شده پارامترهای $\alpha$ و $\beta$ به دست آمد. با استفاده از مقدار واریانس رایتوف و رابطه (۳) مقدار $C_n^2$ برای صفحات فاز تعیین شد. شکل (۴) نمودار تابع چگالی احتمال گاما- گاما را بر حسب شدت بهنجار شده رسم کرده‌ایم. با درنظرگرفتن $L=1000m$ مقدار $C_n^2$ برابر $2.203\times10^{-14}m^{-2/3}$ به‌دست آمد. با تکرار آزمایش با صفحات فاز مختلف، مقدار $C_n^2$ به دست آمده از هر دو روش تطابق خوبی با یکدیگر داشتند.




شکل ۴: نمودار تابع چگالی گاما-گاما بر حسب شدت بهنجار شده.

## ۴- نتیجه گیری

اندازه‌گیری افت و خیز موقعیت تصویر در صفحه کانون یک سیستم اپتیکی و آشکارسازی سوسوزنی در مردمک ورودی سیستم دو روش متفاوت برای تعیین قدرت تلاطم جو هستند. در این مقاله ابتدا با پاشیدن اسپری مو بر روی صفحات شیشه‌ای و بررسی همگنی و همسانگردی طیف توان صفحات، صفحات فاز مناسب برای شبیه‌سازی آشفتگی جوی آماده سازی شد. سپس با اندازه‌گیری افت و خیز مکان پرتو در صفحه کانون و همچنین اندازه‌گیری افت و خیزهای شدت، ثابت ساختار ضریب شکست اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که با وجود تفاوت پارامترهای اولیه اندازه‌گیری، مقدار $C_n^2$ به دست آمده برای هر دو روش یکسان است.

## ۵- مراجع


[1] S. Manning, B.A. Clare, K.J. Grant, and K.A. Mudge, "Development and implementation of a robust angle of arrival turbulence measurement system", Optical Engineering, Vol. 54(11), pp. 114104-1-9, 2015 .

[2] H. W. Shepherd, J. Osborn, R. W. Wilson, T. Butterley, R. Avila, "Stereo–SCIDAR: Optical turbulence profiling with high sensitivity using a modified SCIDAR instrument", Mon. Not. R. Astron. Soc, Vol. 437(4), pp. 3568-3577, 2013

[3] M. Goodwin, C. Jenkins, A. Lambert, "Generalized Slope Detection and Ranging turbulence profiling at Las Campanas Observatory," MNRAS, Vol. 461 (2), pp 1701-1717, 2016.

[4] D. T. Wayne, *et al*, "Comparing the log- normal and gamma- gamma model to experimental probability density function of aperture averaging", Proc. SPIE, vol.7814, pp78140k0-6, 2010.

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




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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]