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

اثر تلاطم نوری جو بر پارامتر انتشار پرتو باریکه لیزری با نمایه تخت

حسین صیام پور، نبی هادیلو، مهدی علوی نژاد

آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده - پارامتر انتشار پرتو (کیفیت پرتو) باریکه لیزری با نمایه تخت در جو متلاطم با بهره گیری از انتگرال هویگنس فرنل تعمیم یافته و تابع توزیع ویگنر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهد که کیفیت پرتو علاوه براینکه به پارامترهای چشمه لیزری همانند مرتبه باریکه، درجه همدوسی فضایی و طول موج لیزر وابسته است به مدل تلاطم نوری جو و پارامترهای آن نیز وابسته است. همچنین اثر جو متلاطم بر کیفیت پرتو لیزر با افزایش مرتبه باریکه لیزری و کاهش درجه همدوسی فضایی چشمه لیزری کاهش می‌یابد.

کلید واژه- باریکه لیزری با نمایه تخت، پارامتر انتشار پرتو (کیفیت پرتو)، تلاطم نوری جو.

Effect of atmospheric optical turbulence on the beam propagation factor of flat-topped beam

Hossein siampoor, Naby hadilou, Mahdi alavinejad

Photonics Laboratory, Physics Department, Iran University of Science and Technology, Tehran

Abstract- Beam propagation factor of flat-topped (FT) beam through atmospheric turbulence is investigated based on the extended Huygens–Fresnel integral and the Wigner distribution function. Our results show that beam quality of FT beam in turbulence depends on the beam characteristic, for example order of FT beam, degree of spatial coherence length, wavelength, and also model of optical turbulence and its parameters. Moreover, the effect of the turbulence on the beam quality of FT beam is smaller for beam with a higher order and a lower degree of spatial coherence length of the source.

Keywords: Beam propagation factor, Atmospheric optical turbulence, Flat-topped beam

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]

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

۱- مقدمه

انتشار لیزر در جو تحت تأثیر پدیده‌های مختلفی قرار می‌گیرد. تلاطم نوری جو که به صورت افت‌وخیزهای کاتوره‌ای در ضریب شکست تعریف می‌شود، باعث تغییرات قابل توجه‌ای در ویژگی‌های پرتو لیزر از جمله واگرایی، درجه همدوسی، قطبش و کیفیت پرتو لیزر می‌شود. در بحث انتشار لیزر در چند دهه گذشته، دیدگاه طیف کولموگروف و یا حالت‌های تعمیم یافته آن که در واقع مقیاس درونی و بیرونی تلاطم را در نظر می‌گرفتند، مورد استفاده قرار می‌گرفت. سیستم‌های اپتیک تطبیقی همگی براساس دیدگاه کولموگروف طراحی و بهینه‌سازی شده‌اند. سیستم‌های ارتباطات لیزری فضای آزاد نیز همینگونه هستند. اما به هر حال شواهد تجربی متعددی وجود دارد که نشان دهنده انحراف‌های قابل توجه‌ای نسبت به دیدگاه طیف کولموگروف است[۳-۱]. از انجایی که مطالعه ویژگی‌های انتشار لیزر در جو متلاطم موضوعی بنیادی در بحث فیزیک لیزر و کاربردهای آن می‌باشد، در این مقاله قصد داریم اثر تلاطم نوری جو را بر پارامتر انتشار پرتو لیزر با نمایه تخت که در بسیاری از کاربردهای لیزر از جمله ارتباطات نوری مورد توجه قرار گرفته است، با درنظر گرفتن انحراف از دیدگاه کولموگروف بررسی کنیم.

۲- پارامتر انتشار پرتو لیزر در جو متلاطم

پارامتر کیفیت پرتو برای هر نمایه باریکه لیزری دلخواه بزرگتر یا مساوی مقدار واحد ($M^2 \geq 1$) است. هرچه مقدار این پارامتر کمتر باشد، باریکه لیزری از کیفیت بهتر و در نتیجه از واگرایی کمتری و قابلیت تمرکزپذیری بیشتری برخوردار خواهد بود. تلاطم نوری جو عاملی است که اثرات قابل توجه‌ای بر مشخصات باریکه لیزر منتشر شده در جو می‌گذارد و پارامتر M^2 فاکتور مهم و مفیدی جهت شناخت این اثرات تلاطم نوری جو بر باریکه لیزری است.

۲-۱- انتشار پرتو لیزر در جو متلاطم

باریکه لیزری همدوس جزیی به وسیله تابع توزیع چگالی طیفی مشخص می‌شود. تابع چگالی طیفی باریکه لیزری با نمایه تخت در صفحه فرستنده ($z=0$) در رابطه (۱) نشان داده شده است [۴]

$$W^{(0)}(\rho_1',\rho_2',z=0)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}\frac{(-1)^{n+m-2}}{N^3}\binom{N}{n}\binom{N}{m}\times\exp\left\{-\left[\frac{n\rho_1'^2+m\rho_2'^2}{4w_0^2}+\frac{l(\rho_1'-\rho_2')^2}{2\sigma_0^2}\right]\right\} \quad (۱)$$

در این رابطه w_0 کمر باریکه با نمایه گوسی، N مرتبه باریکه لیزری با نمایه تخت، $\binom{N}{n}$ نشان‌دهنده ضریب دوجمله‌ای و σ_0 طول همدوسی چشمه لیزری را نشان می‌دهد. انتشار باریکه لیزری همدوس جزئی در جو متلاطم به وسیله انتگرال هویگنس-فرنل تعمیم یافته توصیف می‌شود [۵]:

$$W(\rho_1,\rho_2,z)=(\frac{k}{2\pi z})^2\iint d^2\rho_1'\iint d^2\rho_2' W^{(0)}(\rho_1',\rho_2',z=0)\times\exp\left\{\frac{-ik}{2z}\left[(\rho_1-\rho_1')^2-(\rho_2-\rho_2')^2\right]\right\}\times\left\langle\exp[\psi(\rho_1,\rho_1',z)+\psi^*(\rho_2,\rho_2',z)]\right\rangle \quad (۲)$$

در رابطه انتگرالی انتشار لیزر در جو، z مسافت انتشار لیزر، (ρ_1,ρ_2) بردارموقعیت در صفحه گیرنده، k عدد موج لیزر و $\psi(\rho_1,\rho_1',z)$ بخش کاتوره‌ای فاز مختلط یک موج کروی است که در یک محیط متلاطم منتشر می‌شود و میانگین آنسامبلی آن برابر است با [۶]:

$$\left\langle\exp[\psi(\rho_1,\rho_1',z)+\psi^*(\rho_2,\rho_2',z)]\right\rangle=\exp\{-4\pi^2k^2z\int_0^1\int_0^\infty d\kappa d\xi\kappa\Phi_n(\kappa,\alpha)\times[1-J_0(\kappa|(1-\xi)(\rho_1-\rho_2)+\xi(\rho_1'-\rho'_2))]\} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) $\Phi_n(\kappa,\alpha)$ طیف توان فضایی افت‌وخیزهای ضریب شکست جو متلاطم است و به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$\Phi_n(\kappa,\alpha)=A(\alpha)\tilde{C}_n^2\frac{\exp[-(k^2/k_m^2)]}{(k^2+k_0^2)^{\alpha/2}}$$
$$0\leq k<\infty, 3<\alpha\leq 5 \quad (۴)$$

$\tilde{C}_n^2$ پارامتر ساختار ضریب شکست تعمیم یافته، $k_0=2\pi/L_0$ $k_m=c(\alpha)/l_0$، l_0 مقیاس درونی

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]

و L_0 مقیاس بیرونی تلاطم را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن مقدار $\alpha = 11/3$، $l_0 = 0$، $L_0 = \infty$ در رابطه (۴) طیف توان فضایی افت‌وخیزهای ضریب شکست به مدل طیف کولموگروف تبدیل می‌شود.

۲-۲- مدل سازی پارامتر انتشار پرتو لیزر منتشر شده در جو متلاطم

پارامتر انتشار پرتو لیزر براساس ممان مرتبه دوم تابع توزیع ویگنر، به صورت زیر تعریف می‌شود [۹-۷]:

$$M^2(z) = k\left[\langle\rho^2\rangle\langle\theta^2\rangle - \langle\rho.\theta\rangle^2\right]^{1/2} \qquad (۵)$$

$$\langle\rho^2\rangle = \langle x^2\rangle + \langle y^2\rangle$$
$$\langle\theta^2\rangle = \langle\theta_x^2\rangle + \langle\theta_y^2\rangle$$
$$\langle\rho.\theta\rangle = \langle x\theta_x\rangle + \langle y\theta_y\rangle \qquad (۶)$$

ممان مرتبه $n_1 + n_2 + m_1 + m_2$ تابع توزیع ویگنر به صورت رابطه (۷) داده می‌شود [۸]:

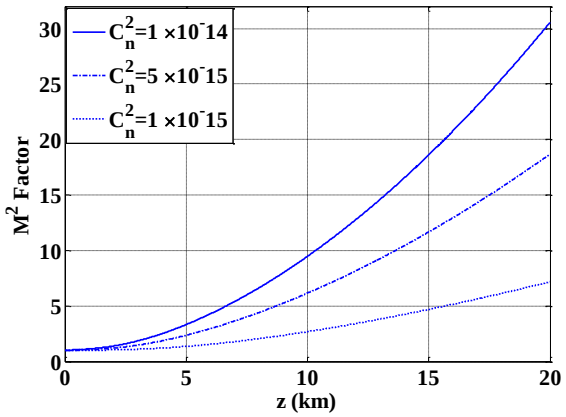
$$\langle x^{n_1} y^{n_2} \theta_x^{m_1} \theta_y^{m_2}\rangle = (\frac{1}{P})\iint d^2\rho d^2\theta . x^{n_1} y^{n_2} \theta_x^{m_1} \theta_y^{m_2} \times h(\rho,\theta,z) \qquad (۷)$$

$$P = \iint h(\rho,\theta,z) d^2\rho d^2\theta \qquad (۸)$$

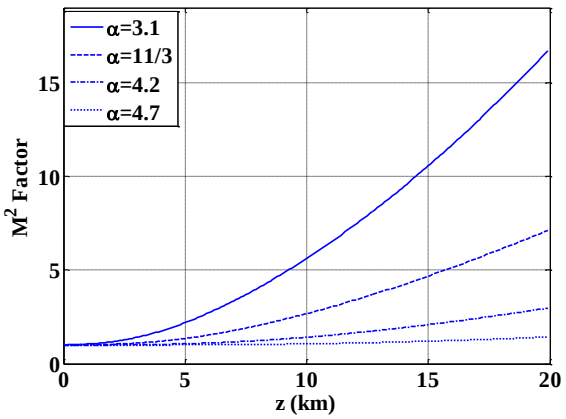
در رابطه (۷) $h(\rho,\theta,z)$ تبدیل فوریه تابع چگالی طیفی متقابل در صفحه گیرنده است. با محاسبه رابطه‌های (۸-۶) و جایگذاری آنها در رابطه (۵) پارامتر انتشار پرتو لیزر با نمایه تخت و به لحاظ فضایی، همدوس جزئی در عبور از جو متلاطم قابل محاسبه است.

۲-۳- نتایج و ارزیابی شبیه‌سازی عددی

در شکل‌های ۲و۱ تغییرات پارامتر انتشار پرتو به نسبت $M^2(z)/M^2(0)$ برحسب فاصله انتشار لیزر شبیه سازی شده است. و پارامترهای $L_0 = 1m, l_0 = 0.01m$ $w_0 = 0.05m$ $\sigma_0 = 0.01m$ در هر دو حالت یکسان هستند. در شکل ۱ تغییرات پارامتر انتشار پرتو باریکه لیزری مرتبه $N = 3$ برحسب فاصله انتشار، برای مقادیر متفاوت قدرت تلاطم جوی و انتشار در جو کولموگروفی نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۱ به خوبی روشن است با افزایش قدرت تلاطم جو پرتو پارامتر کیفیت پرتو به سرعت کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی تغییرات کیفیت پرتو برای مقادیر متفاوت پارامتر α در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که از نمودارها دیده می‌شود پارامتر انتشار پرتو لیزر برای مقادیر مختلف α یکسان نیست و با کاهش مقدار نمای توان در طیف توان



شکل ۱: تغییرات پارامتر انتشار پرتو برحسب فاصله انتشار برای مقادیر مختلف قدرت تلاطم جو

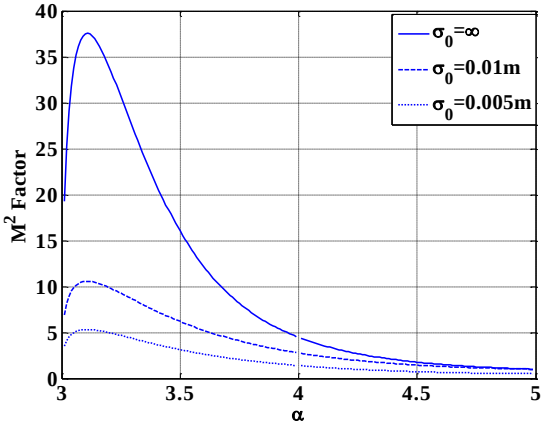


شکل ۲: تغییرات پارامتر انتشار پرتو برحسب فاصله انتشار برای مقادیر مختلف α

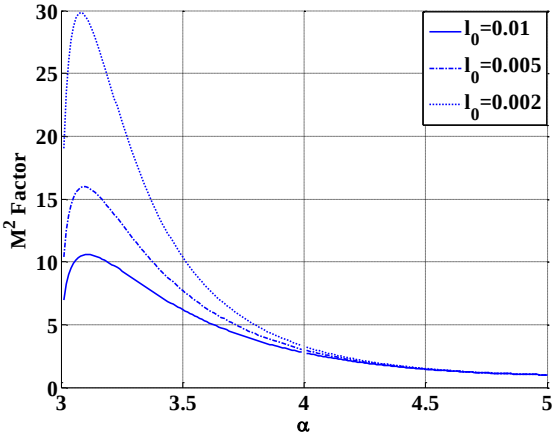
فضایی افت‌وخیزهای ضریب شکست جو، کیفیت پرتو کاهش می‌یابد. بررسی دقیقتر رفتار پارامتر کیفیت پرتو به صورت تابعی از α برای مقادیر مختلف درجه همدوسی فضایی چشمه لیزری و مقیاس درونی و مقیاس بیرونی تلاطم جو در شکل‌های ۴و۳ به صورت نسبت M^2/M_{free}^2 رسم گردیده است. این نسبت در واقع معیاری از اثر گذاری تلاطم جو بر کیفیت پرتو لیزر است. در این

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]

شبیه‌سازی گیرنده در فاصله $z=15km$ از فرستنده قرار دارد و M^2_{free} کیفیت پرتو در فضای آزاد است. سایر پارامترهای پرتو جو متلاطم و چشمه لیزری همانند شکل ۲ در نظر گرفته شده است. بررسی رفتار کیفیت پرتو برحسب α بیانگر این حقیقت است که پارامتر انتشار پرتو با افزایش α افزایش می‌یابد تا به بیشینه مقدار خود که نزدیک $\alpha=3.11$ قرار دارد برسد



شکل ۳: تغییرات پارامتر انتشار پرتو برحسب α برای مقادیر متفاوت درجه همدوسی فضایی چشمه لیزری



شکل ۴: تغییرات پارامتر انتشار پرتو برحسب α برای مقادیر متفاوت مقیاس درونی تلاطم

بعد از این مقدار پارامتر انتشار پرتو روند نزولی خواهد داشت و بنابراین کیفیت پرتو افزایش می‌یابد. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که هر چه قدر درجه همدوسی چسمه لیزری کمتر باشد کیفیت پرتو لیزر در صفحه گیرنده بیشتر خواهد بود و باریکه لیزری با این ویژگی کمتر تحت تأثیر جو متلاطم قرار می‌گیرد. مقایسه نقش مقیاس درونی بر کیفیت پرتو نیز نشان می‌دهد که با افزایش l_0 کیفیت پرتو افزایش می‌یابد و این افزایش برای مقادیر کمتر پارامتر α بیشتر نمایان می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

پارامتر انتشار پرتو باریکه لیزری با نمایه تخت و به لحاظ فضایی همدوس جزئی در جو متلاطم کولموگروف و غیرکولموگروف به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی از انتگرال هویگنس-فرنل تعمیم‌یافته و ممان‌های مرتبه دوم تابع توزیع ویگنر استفاده گردید. بررسی رفتار پارامتر انتشار پرتو نشان می‌دهد که کیفیت پرتو با انتشار در جو متلاطم کاهش می‌یابد و این پارامتر به مرتبه باریکه، درجه همدوسی فضایی، طول موج لیزر، پهنای کمره پرتو، مدل طیف توان فضایی افت‌وخیزهای ضریب شکست، مقیاس درونی و بیرونی تلاطم وابسته است. اثر جو متلاطم با افزایش مرتبه باریکه لیزری، کاهش درجه همدوسی فضایی چشمه لیزری کمتر می‌شود. همچنین کمترین مقدار پارامتر کیفیت پرتو نزدیک $\alpha=5$ و بیشترین مقدار آن نزدیک $\alpha=3.1$ رخ می‌دهد.

مراجع

[1] Gurvich A.S., Belenkii, M.S., *Influence of stratospheric turbulence on infrared imaging*, **J. Opt. Soc. Am**. A. 12 (1995) 2517-2522.

[2] Golbraikh E., Kopeika N., *Behavior of structure function of refraction coefficients in different turbulent fields*, **Applied Optics**, 43 (2004) 6151-6156.

[3] Gladysz S, Stein K., Sucher E., Sprung D., *Measuring non-Kolmogorov turbulence*, **Proc. of SPIE**. (2013).

[4] Ghafary B., Alavinejad M., Siampoor H., *Focal shift and focal switch of partially coherent flat-topped beams passing through an alignment and misalignment lens system with aperture*, **Modern Optics**. 57 (2010) 2075–2081.

[5] Youquan D., Bin z., *Second moments of partially coherent beam in atmospheric turbulence*, **Optics Letters**, 34(2009) 563-565.

[6] Gbur G., Wolf E., *Spreading of partially coherent beams in random media*, **J. Opt. Soc. Am**. A, 19 (2002) 1592–1598.

[7] Lin-yan C., Bin-dang X., Xiao-guang X., *Generalized atmospheric turbulence MTF for wave propagating through non-Kolmogorov turbulence*, **Optics Express**. 18 (2010) 21269- 21283.

[8] Youquan D., Bin z., *Beam propagation factor of partially coherent flat-topped beams in a turbulent atmosphere*, **Optics. Experess**. 16 (2008) 15563–15575.

[9] Zhou G., Chu X., *M2-factor of a partially coherent Lorentz–Gauss beam in a turbulent atmosphere*, **Appl Phys B**. 100 (2010) 909-915.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]