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

مطالعه و بررسی رفتار همدوسی باریکه سرصاف لیزری در انتشار مورب در اتمسفر متلاطم غیر کولموگروف

شعله گل محمّدی نژادی و بیژن غفاری

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

چکیده - در مقاله ارائه شده بر اساس انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل و تئوری یگانگی همدوسی-قطبش، رفتار انتشاری باریکه همدوس جزئی سر صاف در عبور از اتمسفر متلاطم (مدل تلاطمی غیر کولموگروف) مورد مطالعه قرار گرفته است. از مدل‌های مختلفی می‌توان برای توصیف اتمسفر متلاطم استفاده کرد، که هر کدام دارای مزایایی هستند. اخیراً مطالعات محققین حاکی از این حقیقت است که شبیه سازی‌ها براساس مدل تلاطمی کولموگروف در تمامی شرایط با نتایج آزمایشگاهی همپوشانی ندارد و نیاز به توصیف تلاطم اتمسفری با استفاده از الگویی متفاوت از مدل کولموگروف بیان شد. بر این اساس مدل جامع غیر کولموگروف که قابلیت پوشش نتایج مدل کولموگروف را نیز داراست،معرفی شد. در این مقاله، بر اساس انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل میدان اپتیکی باریکه سرصاف همدوس جزئی در فواصل مختلف از چشمه تعریف شده و ماتریس چگالی طیفی متقابل باریکه مورد نظر تعریف شده و عبارت تحلیلی برای توصیف درجه همدوسی باریکه و عرض باریکه بدست می‌آید. تاثیر پارامترهای تلاطم و پارامترهای مشخصه ساز لیزر بر رفتار انتشاری درجه همدوسی و عرض باریکه مورد نظر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است و نتایج شبیه‌سازی بصورت گراف ارائه گردیده‌است. نتایج مطالعات بیانگر این است که درجه همدوسی باریکه مورد بحث با کاهش طول موج و نماینده قانون توان(α) سریعتر کاهش می‌یابد.

کلید واژه- باریکه لیزری سرصاف، همدوسی، تلاطم اتمسفری، مخابرات اپتیکی، تلاطم غیر کولموگروف.

Studying the behavior of coherence of Flat-topped laser beam through slant propagation in Non-Kolmogorov turbulent atmosphere

Shole Golmohammady, Bijan Ghafary

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

Abstract- In this research, with the help of the extended Huygens–Fresnel integral and the unified theory of coherence and polarization, the propagation behavior of the partially coherent flat-topped (PCFT) beam propagating through Non-Kolmogorov atmospheric turbulence is investigated. Kolmogorov turbulence spectrum model is widely used to predict the degradation of the optical wave propagation. Turbulence spectrum deviates from the Kolmogorov turbulence in some cases and the non-Kolmogorov turbulent spectrum is characterized by the power law exponent. Researchers introduced the non-Kolmogorov model because the Kolmogorov model is sometimes incomplete for depicting atmospheric turbulence.

The propagation behavior of beam width and the spectral degree of coherence of the PCFT beam propagating through turbulent atmosphere based on the cross-spectral density matrix elements has been studied. The simulations of this study are done by considering the effects of source parameters and turbulent atmosphere factors by detail. Results indicate that, the spectral degree of coherence degrades rapidly to a minimum value (zero at far field) with decreasing in the values of wavelength and the power law exponent. α

Keywords: Flat-topped laser beam, Coherence; Atmospheric turbulence, Optical communication, Non-Kolmogorov turbulence.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

کاربردهای فراوان انتشار باریکه‌های لیزری در محیط‌های کاتوره‌ای و نامنظم (مانند اتمسفر و اقیانوس) از قبیل سیستم-های مخابرات لیزری فضای آزاد(FSO) و توسعه روزافزون این نوع از ارتباطات در کاربردهایی از قبیل رادارهای لیزری و مخابرات اپتیکی و برخی از تکنیک‌های پردازش اطلاعات، موجب رشد و پیشرفت تحقیقات پژوهشگران در این حوزه گردیده‌است[۱-۴]. شناسایی و مشخصه یابی فضای آزاد به عنوان یکی از محیطهای انتشار باریکه‌های لیزری در هر کدام از کاربردهای ذکر شده از دغدغه های پژوهشگران این حوزه می‌باشد.طبق یافته‌های محققین در سالیان متمادی، از مدل-های مختلفی می‌توان برای توصیف اتمسفر متلاطم استفاده کرد، که هر کدام دارای مزایایی هستند[2-۱]. اخیراً مطالعات حاکی از این حقیقت است که شبیه سازی‌ها براساس مدل تلاطمی کولموگروف در تمامی شرایط با نتایج آزمایشگاهی همپوشانی ندارد[۴-2] و نیاز به توصیف تلاطم اتمسفری با استفاده از الگویی متفاوت از مدل کولموگروف بیان شد. بر این اساس مدل جامع غیر کولموگروف که قابلیت پوشش نتایج مدل کولموگروف را نیز داراست[۳-۴]. در سال‌های اخیر انتشار انواع باریکه ها مانند گاوسی، گاوس-شل ، سرصاف و . . . در اتمسفر متلاطم بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته و آنها را ملزم به مطالعه رفتارهای انتشاری انواع باریکه ها نموده است که مطالعه رفتار انتشاری همدوسی باریکه لیزر منتشر شونده یکی از موضوعاتی است که به علت نقش اساسی آن در تعیین پارامترهای آشکارسازی سیستم های تصویر برداری و لینک های مخابرات لیزری فضای آزاد توجه بسیاری به خود جلب کرده است. در این مقاله با استفاده از مدل تلاطمی غیر-کولموگروف، رفتار انتشاری درجه طیفی همدوسی و عرض باریکه همدوس جزئی سرصاف در حال انتشار مورب در اتمسفر متلاطم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مبانی نظری

میدان الکتریکی یک باریکه سرصاف با درجه صافی N در صفحه منبع، $z=0$، را می‌توان به صورت زیر در دستگاه مختصات متعامد، بیان نمود[۱-۲] :

$$E_{\mathrm{iN}}(\vec{\rho}', z=0)=\sum_{n=1}^{N} A_i \frac{(-1)^{n-1}}{N} \times\binom{N}{n}\exp\left[-n\left(\frac{\vec{\rho}'^{2}}{w_0^{2}}\right)\right] \quad (۱)$$

که در آن، W_0 اندازه کمره باریکه می‌باشد. درجه همدوسی فضایی باریکه PCFT در صفحه‌ی منبع فقط به فاصله دو نقطه $\vec{\rho}_1'$ و $\vec{\rho}_2'$ در صفحه منبع وابسته است، از این رو، می‌توان این کمیت را به صورت زیر بیان کرد[۱-۲]:

$$g_{\mathrm{ij}}\left(|\vec{\rho}_1'-\vec{\rho}_2'|\right)=\sum_{c=1}^{N} B_{ij}\frac{1}{N} \times\exp\left[-c\left(\frac{(\vec{\rho}_1'-\vec{\rho}_2')^{2}}{2\sigma_{0ij}^{2}}\right)\right] \quad (۲)$$

در روابط فوق، ضرایب A_i و B_{ij} کمیت‌هایی مثبت و مستقل از مکان بوده و σ_{0ij} بیانگر پهنای مؤثر درجه طیفی همدوسی منبع فرستنده می‌باشد. . چگالی طیفی متقابل در چشمه با جایگذاری میدان باریکه سرصاف در رابطه زیر بدست می آید[۱-۲]:

$$W_{ij}^{(0)}(\vec{\rho}_1',\vec{\rho}_2';\omega)= E_i(\vec{\rho}_1', z=0)E_j^{*}(\vec{\rho}_2', z=0)g_{\mathrm{ij}}\left(|\vec{\rho}_1'-\vec{\rho}_2'|\right) \quad (۳)$$

ω نشان‌دهنده فرکانس می‌باشد. به منظور بررسی رفتار انتشاری باریکه PCFT در اتمسفر متلاطم از ماتریس چگالی طیفی متقابل استفاده می‌شود[۱-۲]:

$$W_{ij}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,z,\omega)= \iint d\rho_1'\iint d\rho_2' W_{ij}^{(0)}(\vec{\rho}_1',\vec{\rho}_2',\omega) \times K(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,\vec{\rho}_1',\vec{\rho}_2',\omega) \quad (۴)$$

که $\vec{\rho}_1$ و $\vec{\rho}_2$ مکان دو نقطه در صفحه گیرنده می‌باشند. K شامل جملاتی است که تأثیرات اتمسفر متلاطم را اعمال می-کند که به شکل زیر نمایش داده می‌شود[۱-۲]:

$$K(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,\vec{\rho}_1',\vec{\rho}_2',\omega)=\left(\frac{k}{2\pi z}\right)^{2} \times\exp\left[-ik\frac{(\vec{\rho}_1-\vec{\rho}_1')^{2}-(\vec{\rho}_2-\vec{\rho}_2')^{2}}{2z}\right] \times\left\langle\exp\left[\psi^{*}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_1',z,\omega)+\psi(\vec{\rho}_2,\vec{\rho}_2',z,\omega)\right]\right\rangle_{at} \quad (۵)$$

که ψ فاکتور فاز رندوم ، ψ^{*} مزدوج مختلط فاکتور فاز رندوم و $\langle\ \rangle_{at}$ نیز نشان‌دهنده میانگین آنسامبل اتمسفر متلاطم

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

است که به صورت زیر تعریف می‌شود[۲-۴] :

$$\left\langle \exp\left[\psi^*(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_1',z,\omega)+\psi(\vec{\rho}_2,\vec{\rho}_2',z,\omega)\right]\right\rangle_{at} \cong \exp\left[-\left(\frac{1}{\rho_0^2(z)}\right)\left(\vec{\rho}_1-\vec{\rho}_2\right)^2+\left(\vec{\rho}_1'-\vec{\rho}_2'\right)^2\right] \times \exp\left[-\left(\frac{1}{\rho_0^2(z)}\right)\cdot\left(\vec{\rho}_1-\vec{\rho}_2\right)\cdot\left(\vec{\rho}_1'-\vec{\rho}_2'\right)\right] \quad (۶)$$

که $\rho_0(z)$ شعاع فضایی همدوسی موج کروی در حال انتشار در اتمسفر متلاطمی است که در این مقاله با استفاده از مدل غیرکولموگروف بدین صورت توصیف می‌شود [۳] :

$$\rho_0 = \left[\frac{2^{-\alpha}\alpha\Gamma(\alpha-1)\Gamma\left(\frac{-\alpha}{2}\right)\sin\left[\frac{(\alpha-3)\pi}{2}\right]k^2\tilde{C}_n^2 L}{(\alpha-1)\Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right]^{\frac{-1}{\alpha-2}} \quad (۷)$$

که C_n^2 پارامتر ساختار ضریب شکست است که با استفاده از مدل ITU-IR به صورت مورب استفاده می‌شود[۲] و $3<\alpha<4$ نماینده قانون توان نامیده می شود. مدل غیرکولموگروف به این دلیل که در تمام بازه‌ها اعم از بازه لختی و خارج آن جوابگوست این مدل را، مدل جامع مینامند[۲]. ماتریس چگالی طیفی متقابل در صفحهٔ گیرنده با استفاده از روش انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل [۱-۲] و پس از محاسبات پیچیده بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$W_{ij}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,\omega,z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\sum_{t=1}^{N}A_iA_jB_{ij} \times\frac{(-1)^{n+m-2}}{N^3}\binom{N}{n}\binom{N}{m}\frac{\pi^2}{\left(\gamma_1^2\gamma_2\gamma_3\right)^{\frac{1}{2}}}\exp\left(\frac{\beta_3^2}{4\gamma_1}+\frac{\beta_6^2}{4\gamma_1}\right) \times\exp\left(\frac{ik\rho_{1x}^2}{2z}-\frac{ik\rho_{2x}^2}{2z}+\frac{ik\rho_{1y}^2}{2z}-\frac{ik\rho_{2y}^2}{2z}\right) \times\exp\left(\frac{\beta_7^2}{4\gamma_2}+\frac{\beta_8^2}{4\gamma_3}\right)\exp\left(-\frac{1}{\rho_0^2}\left(\rho_1^2-\rho_2^2\right)\right) \quad (۸)$$

که

$$\gamma_1=\frac{n+m}{4w_0^2},\gamma_2=\frac{1}{\rho_0^2}+\frac{t}{2\delta_{ij}^2}+\frac{n}{16w_0^2}+\frac{m}{16w_0^2}-\frac{\beta_2^2}{4\gamma_1},$$
$$\gamma_3=\frac{1}{\rho_0^2}+\frac{t}{2\delta_{ij}^2}+\frac{n}{16w_0^2}+\frac{m}{16w_0^2}-\frac{\beta_5^2}{4\gamma_1},$$

(۹)

$$\beta_2=\frac{n-m}{4w_0^2}-\frac{ik}{z},\beta_3=\frac{ik\rho_{1x}}{z}-\frac{ik\rho_{2x}}{z},$$
$$\beta_5=\frac{n-m}{4w_0^2}-\frac{ik}{z},\quad \beta_6=\frac{ik\rho_{1y}}{z}-\frac{ik\rho_{2y}}{z}$$
$$\beta_7=\frac{ik\rho_{1x}}{2z}+\frac{ik\rho_{2x}}{2z}+\frac{1}{\rho_0^2}\left(\rho_{1x}-\rho_{2x}\right)-\frac{\beta_2\beta_3}{2\alpha_{11}},$$
$$\beta_8=\frac{ik\rho_{1y}}{2z}+\frac{ik\rho_{2y}}{2z}+\frac{1}{\rho_0^2}\left(\rho_{1y}-\rho_{2y}\right)-\frac{\beta_5\beta_6}{2\alpha_{11}}$$

درجه طیفی همدوسی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱-۲] :

$$\mu(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,\omega)=\frac{Tr\vec{w}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,\omega)}{\sqrt{Tr\vec{w}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_1,\omega)}\sqrt{Tr\vec{w}(\vec{\rho}_2,\vec{\rho}_2,\omega)}} \quad (۱۰)$$

که Tr نشان‌دهنده اثر یا رد ماتریس است. عرض باریکه میتواند با استفاده از ممانهای مرتبه اول و دوم شدت به صورت زیر محاسبه گردد[۲]:

$$w_\rho^2(\rho_z)=\frac{2\iint\left(\rho_x^2+\rho_y^2\right)I\left(\rho_x,\rho_y,\rho_z\right)d\rho_x\,d\rho_y}{\iint I\left(\rho_x,\rho_y,\rho_z\right)d\rho_x\,d\rho_y} \quad (۱۱)$$

۳- محاسبه و شبیه سازی

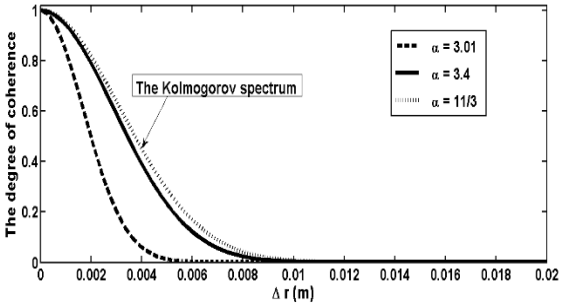
در این بخش با جایگذاری پارامترهای مرتبط با انتشار باریکه در روابط و پس از انجام محاسبات، تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم در تلاطم و همچنین پارامترهای لیزر بر رفتار انتشاری درجه همدوسی و شدت نرمال‌شده باریکه در اتمسفر متلاطم(با الگوی تلاطمی غیر کولموگروف) بررسی می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای انتخاب شده در این مقاله به منظور شبیه‌سازی رفتار انتشاری، کاملاً شرایط لازم برای یک منبع فرستنده حقیقی و فیزیکی را ارضا می‌کنند. مقادیر زیر برای پارامترهای مرتبط با منبع فرستنده و تلاطم انتخاب شده‌اند:

$$A_x=0.5,A_y=1.5,\ \lambda=1064nm,w_0=0.01m,$$
$$\delta_{ii}=\delta_{jj}=\frac{w_0}{5},\delta_{ij}=\delta_{ji}=\frac{w_0}{4},B_{ii}=B_{jj}=1,$$
$$B_{ij}=B_{ji}^*=0.2\exp(-i\frac{\pi}{3}),\ N=3,C_n^2=5\times10^{-14}$$

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

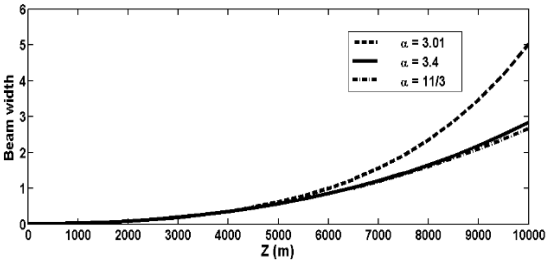
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

در شکل (۱) مشاهده می‌کنیم که درجه همدوسی باریکه PCFT منتشره در اتمسفر متلاطم غیرکولموگروف با مقادیر کوچکتر α سریعتر کاهش می‌یابد و به مقدار صفر میرسد.



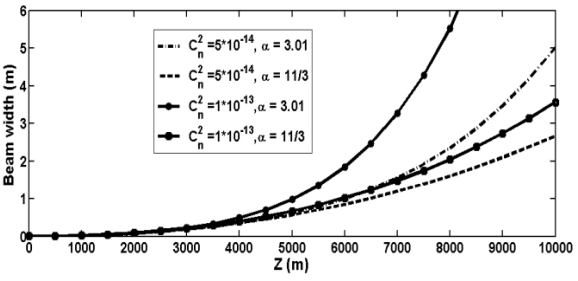
شکل ۱: تغییرات درجه طیفی همدوسی باریکه PCFT در حال انتشار در اتمسفر متلاطم غیر کولموگروف برای مقادیر مختلف α

در شکل(۲) تغییرات پهنای باریکه PCFT به دقت مورد بررسی قرار گرفته است، با کاهش α، پهن شدگی باریکه نیز افزایش می‌یابد.



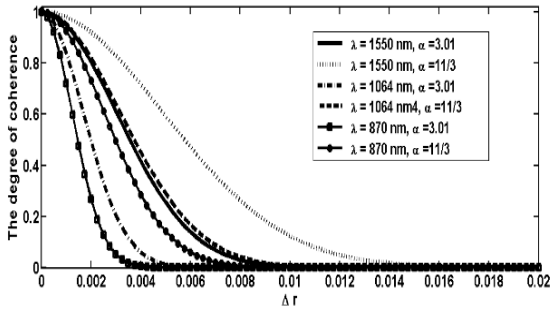
شکل ۲: تغییرات پهنای باریکه PCFT در حال انتشار در اتمسفر متلاطم غیر کولموگروف برای مقادیر مختلف α

شکل (۳) بیانگر تغییرات پهنای باریکه با تغییرات α و C_n^2 می‌باشد. با افزایش C_n^2 که نشان دهنده افزایش قدرت تلاطم می‌باشد، باریکه نیز سریعتر پهن می‌شود. سرعت پهن شدگی با افزایش α، بیشتر می‌شود.



شکل ۳: تغییرات پهنای باریکه PCFT در حال انتشار در اتمسفر متلاطم غیر کولموگروف برای مقادیر مختلف α و C_n^2

در شکل (۴)، تاثیر تغییرات طول موج بر درجه همدوسی باریکه PCFT در حال انتشار در اتمسفر متلاطم غیرکولموگروف مورد مطالعه قرار گرفته است. با کاهش طول موج ، درجه طیفی همدوسی سریعتر کاهش می‌یابد که اگر با کاهش مقدار α همراه باشد، درجه همدوسی سریعتر کاهش می‌یابد.



شکل ۴: تغییرات درجه طیفی همدوسی باریکه PCFT در حال انتشار در اتمسفر متلاطم غیر کولموگروف برای مقادیر مختلف α و λ

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور مشخصه‌سازی اثرات تلاطم غیرکولموگروف بر رفتار انتشاری برخی کمیت‌های آماری باریکه لیزری PCFT، رابطه تحلیلی ماتریس چگالی طیفی متقابل و متعاقباً رابطه درجه طیفی همدوسی و عرض باریکه استخراج گردید. سپس اثر تغییرات عواملی چون طول موج، نماینده قانون توان(α) و قدرت تلاطم اتمسفری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵- مراجع

[1] F. D. Kashani, M. Yousefi, S. H Golmohammady, M. H., Ghezelayagh, B. Ghafary, "Propagation characteristics of tilted partially coherent rectangular flat-topped beam in turbulent atmosphere", Optik, Vol.124, pp. 6679-6683, 2013.

[2] Andrews, L. C.; Phillips, R. L. *Laser Beam Propagation in Random Media*, 2th ed.; SPIE: Bellingham, 2005.

[3] I. Toselli, L. C. Andrews, R. L. Phillips, V. Ferreroa, "Angle of Arrival Fluctuations for Free Space Laser Beam Propagation through non Kolmogorov turbulence", Proc. of SPIE Vol. 6551, 65510E, 2007.

[4] J. Li , Y. Peng , M. Duan , J. Wei, "Influence of non-Kolmogorov atmospheric turbulence on the spectral changes of rectangular array beams", Optics & Laser Technology, Vol.66, pp. 52–57, 2015.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]