بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بهبود کیفیت پرتو مدل گوسین-شل(GSM) منتشر شده در اتمسفر متلاطم با استفاده از روزنه فازی

نبی هادیلو[۱]، حسین صیام پور[۱] و مهدی علوی نژاد[۲]

[۱]آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده فیزیک ،دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲]دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده -در این مقاله از تابع توزیع ویگنر برای مطالعه کیفیت پرتو مدل گوسین- شل در اتمسفر متلاطم که با روزنه فازی محدود شده، استفاده شده است. بر اساس اصل هویگنس –فرنل و با استفاده از ممان مرتبه دوم تابع توزیع ویگنر، روابط تحلیلی برای کیفیت پرتومدل *GSM* محدود شده با روزنه فازی در اتمسفر متلاطم استخراج شده است. کیفیت انتشار پرتو مورد نظر با مثالها و بررسی های عددی مورد بحث قرارگرفته و نشان داده شده است که کیفیت انتشار پرتو مذکور علاوه بر وابستگی به درجه همدوسی منبع،کمره پرتو، طول موج - به تاخیر فاز مربوط به روزنه فازی نیز وابسته است. وحضور روزنه موجب بهبود کیفیت پرتو میشود.

کلید واژه- روزنه فازی، کیفیت پرتو،اتمسفر متلاطم، مدل گوسین - شل

Improvement of beam quality factor of Gaussian Schell-Model beams by using of phase aperture in a turbulent atmosphere

Naby Hadilou[1], Hosein Siampoor[1] and Mahdi Alavinejad[2]

[1]Photonics Laboratory, Department of physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

[2]Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the Wigner Distribution Function (WDF) has been used to study the beam propagation factor of Gaussian Schell-Model beams truncated by a phase aperture in a turbulent atmosphere. Based on the extended Huygens-Fresnel principle and using of the second-order moments of the WDF. The analytical formulas for the M^2-factor of GSM beams truncated by a phase aperture in turbulent atmosphere have been derived. The M^2-factor of mentioned beams have been discussed with numerical examples. It can be shown that the beam quality factor of GSM beams truncated by a phase aperture in turbulent atmosphere depends on the degree of global coherence of the source, beam waist, wavelength and the phase delay of the circular phase aperture. The beam quality have been improved by using of phase aperture.

Keywords: phase aperture, beam quality, turbulent atmosphere, Gaussian Schell Model (GSM)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

انتشار باریکه‌های گوناگون لیزری در اتمسفر متلاطم بدلیل کاربردهای آن در ارتباطات اپتیکی فضای آزاد، سنجش از راه دور، تعیین هدف و غیره،از اهمیت بسیاری برخوردار است .به این خاطر بررسی‌های زیادی روی خصوصیات انتشاری باریکه‌های مختلف لیزری در عبور از اتمسفر متلاطم صورت گرفته است. کیفیت پرتو لیزر پارامتر مفیدی برای تشریح انتشار لیزر در اتمسفر متلاطم میباشد که میتواند مستقیما برای محاسبه قدرت تمرکز و واگرایی (باچه نرخی و در چه فاصله ای) مورد استفاده قرار گیرد. بدلیل تاثیر پذیری زیاد پرتو همدوس کامل از اتمسفر متلاطم،تا حد امکان از پرتوهایی با همدوسی جزیی برای محاسبات و آزمایشهای تجربی استفاده میشود. کیفیت پرتو بعنوان یکی از پارامترهای مهم مورد توجه بسیاری از محققین بوده و مطالعاتی روی آن صورت گرفته است. در بیشتر قطعات و ابزارهای نوری روزنه یا هر وسیله محدود کننده ای، یکی از اجزای ضروری و جداناپذیر آن قطعه میباشد، لذا بررسی اثر روزنه بر کیفیت پرتو در سالهای اخیر بسیار مورد توجه بوده است و مقالاتی نیز در این مورد منتشر شده است. با در نظر گرفتن چنین اهمیت و پیشینه ای برای کیفیت پرتو ما بر آن شدیم تا اثر روزنه فازی را بر روی مدل گوسی-شل در عبور از اتمسفر متلاطم بررسی و مطالعه کنیم [۱-۴].

۲- محاسبه ماتریس چگالی طیفی و کیفیت پرتو

میدان الکتریکی پرتو GSM در صفحه منبع،$(z=0)$، را می‌توان بصورت رابطه زیر در نظر گرفت[۴-۵]:

$$E(r,z=0)=\exp(-\frac{r^2}{w_0^2}) \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق r نقطه اختیاری در منبع، w_0 اندازه کمره باریکه گاوسی میباشد، از طرفی، ماتریس تابع چگالی طیفی متقابل برای باریکه مورد نظر محدود شده با روزنه فازی دایره ای در منبع عبارتست از:

$$W_T^{(0)}(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z=0)=E(\vec{r}_1,z=0)E^*(\vec{r}_2,z=0) \times T(\vec{r}_1)T^*(\vec{r}_2) \qquad (۲)$$

که $T(\vec{r}_1)$ تابع انتقال روزنه فازی بوده و به شکل زیر تعریف میشود [۵-۸]:

$$T(\vec{r}_1)=1+\left[e^{-i\varphi}-1\right]H(\vec{r}_1) \qquad (۳)$$

که در رابطه فوق $H(\vec{r}_1)$ تابع انتقال روزنه دایره ای بوده و عبارت است از:

$$H(\vec{r}_1)=\sum_{k=1}^{10}P_k\exp\left(-\frac{G_k}{a^2}r_1^2\right) \qquad (۴)$$

G_k و P_k ضرایب بسط و a شعاع روزنه دایره ای میباشند.اگر رابطه ۴ در رابطه ۳و رابطه حاصله را در رابطه۲ جایگذاری کنیم به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\begin{aligned}W_T^{(0)}(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z=0)&=\sum_{k}^{10}\sum_{l}^{10}P_kP_l\\ &\exp\left\{-\left[\frac{\vec{r}_1^{\,2}}{w_0^2}+\frac{\vec{r}_2^{\,2}}{w_0^2}+\frac{(\vec{r}_1-\vec{r}_2)^2}{2\sigma_g^2}\right]\right\}\\ &\times\left[1+\left(e^{-i\varphi}-1\right)\exp\left(-\frac{G_k}{a^2}r_1^2\right)\right]\\ &\times\left[1+\left(e^{-i\varphi}-1\right)\exp\left(-\frac{G_l^*}{a^2}r_2^2\right)\right]\end{aligned} \qquad (۵)$$

با توجه به اصل هویگنس-فرنل ماتریس تابع چگالی طیفی متقابل در فاصله انتشاری z در عبور از اتمسفر متلاطم به شکل زیر میباشد:

$$\begin{aligned}W_{ij}(\vec{\rho}_1,\vec{\rho}_2,z)=&\\ \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2&\iint d^2\vec{r}_1\iint d^2\vec{r}_2\,W_T^{(0)}(\vec{r}_1,\vec{r}_d,z=0)\\ &\times\exp\left[-ik\,\frac{(\vec{\rho}-\vec{r})-(\vec{\rho}_d-\vec{r}_d)}{2z}\right]\\ &\times\left\langle\exp\left(\psi(\vec{\rho},\vec{r},z)+\psi^*(\vec{\rho}_d,\vec{r}_d,z)\right)\right\rangle\end{aligned} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق از نمادگذاری $\vec{\rho}=\frac{\vec{\rho}_1+\vec{\rho}_2}{2},\ \vec{\rho}_d=\vec{\rho}_1-\vec{\rho}_2$ که($\vec{\rho}_1$ و $\vec{\rho}_2$ دو بردار

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

عمود بر محور انتشار در صفحه گیرنده)و $\vec{r}=\frac{\vec{r}_1+\vec{r}_2}{2}, \vec{r}_d=\vec{r}_1-\vec{r}_2$ استفاده شده است. و $\langle\ \rangle_m$ میانگین آماری محیط تلاطم می‌باشد که برمبنای تلاطم کولموگروف با پارامتر ساختار ضریب شکست C_n^2 محاسبه می‌گردد. تابع توزیع ویگنر برای پرتو گوسی با همدوسی جزئی، محدود شده با روزنه در اتمسفر متلاطم بصورت عبارتی از ماتریس چگالی طیفی به شکل زیر بیان میشود[۷-۱۰]:

$$h(\vec{\rho},\theta,z)=\left(\frac{k}{2\pi}\right)^2\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}W_T(\vec{\rho},\vec{\rho}_d,z)\times\exp(-ik\theta.\vec{\rho}_d)d^2\rho_d \quad (۷)$$

در رابطه فوق θ زاویه بردار مربوطه با راستای z میباشد. $k\theta_x$ و $k\theta_y$ مولفه های بردار موج هستند. بر اساس ممان مرتبه دوم تابع توزیع ویگنر کیفیت پرتو همدوس جزئی عبارت است از:

$$M^2(z)=k\left(\left\langle\rho^2\right\rangle\left\langle\theta^2\right\rangle-\left\langle\rho\cdot\theta\right\rangle\right)^{1/2} \quad (۸)$$

که

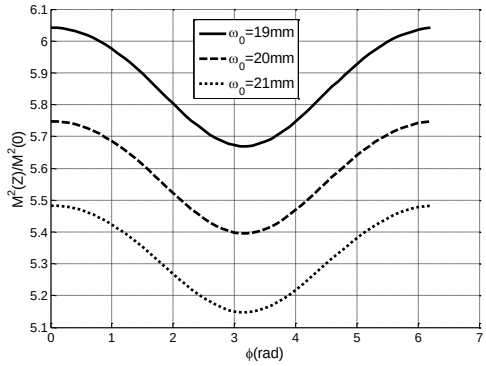
$$\left\langle\rho_x^{n_1}\rho_y^{n_2}\theta_x^{m_1}\theta_y^{m_2}\right\rangle=\frac{1}{p}\iint d^2\rho d^2\theta\rho_x^{n_1}\rho_y^{n_2}\times\theta_x^{m_1}\theta_y^{m_2}h(\rho,\theta,z) \quad (۹)$$
$$p=\iint d^2\rho d^2\theta\times h(\rho,\theta,z)$$

با محاسبه رابطه ۷ و جایگذاری آن در رابطه ۹ و ادامه عملیات ریاضی مولفه های مورد نیاز را بدست آورده و در رابطه ۸ جایگذاری و کیفیت پرتو محاسبه میشود. (بدلیل کثرت محاسبات ریاضی از ارائه جزئیات خودداری کردیم.)

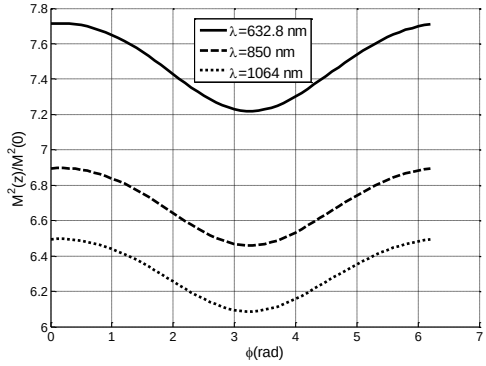
۳- بررسی و شبیه سازی

در این بخش به بررسی نتایج حاصله از محاسبات تحلیلی و شبیه سازی تغییرات کیفیت پرتو در شرایط مختلف خواهیم پرداخت. پارامترهای محاسباتی مشترک عبارتند از: $\sigma_g=1mm, C_n^2=10^{-14}, w_0=2cm, a=w_0$، $z=5km, \lambda=632.8nm, \varphi=\pi(rad)$.

در شکلهای ۱و۲و۳ وابستگی کیفیت پرتو نرمال شده مدل GSM محدود شده با روزنه فازی به تاخیر فاز روزنه دایره ای در اتمسفر متلاطم، بترتیب برای کمره پرتوهای مختلف، طول موجهای مختلف و درجه همدوسی های مختلف رسم شده است. از این شکلها به وضوح آشکار است که با افزایش تاخیر فاز نقطه مینیممی برای کیفیت پرتو وجود دارد که بیانگر این است که با افزایش تاخیر فاز کیفیت پرتو بهتر میشود. این نقطه مینیمم در یک تاخیر فاز معینی رخ میدهد. (در این مورد خاص $\varphi=\pi$) و برای تاخیر فازهای بزرگتر از π کیفیت پرتو بدتر (بزرگتر) میشود. بنابراین با انتخاب تاخیر فازی مناسب (متناسب با دیگر شرایط) میتوان به کیفیت پرتو بهینه ای دست یافت.



شکل ۱: تغییرات کیفیت پرتو نرمال شده برحسب تاخیر فاز(φ)برای کمره پرتوهای مختلف در اتمسفر متلاطم.

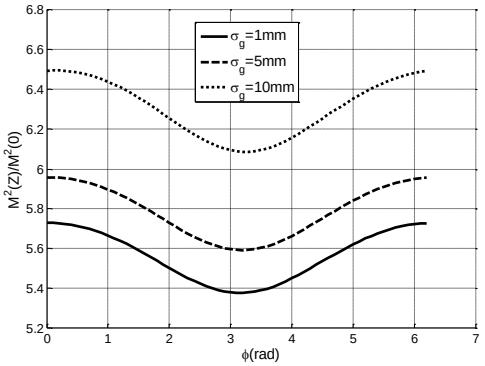


شکل ۲: تغییرات کیفیت پرتو نرمال شده برحسب تاخیر فاز(φ)برای طول موجهای مختلف در اتمسفر متلاطم.

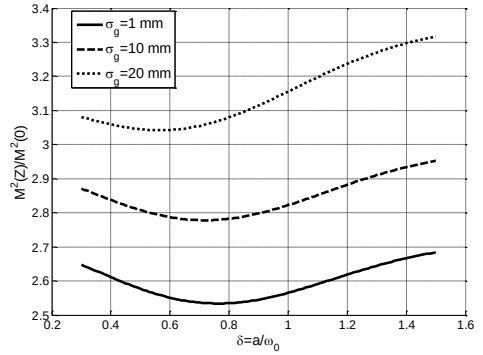
شکلهای ۴و۵ وابستگی کیفیت پرتو مدل GSM محدود شده با روزنه فازی در اتمسفر متلاطم را به شعاع روزنه فازی برای طول موجهای مختلف و درجه همدوسی های مختلف نشان میدهد. همچنانکه از روی شکلها قابل

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

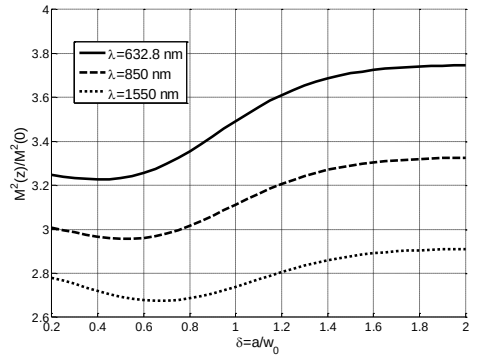
مشاهده است با افزایش شعاع روزنه فازی مقدار مینیممی برای کیفیت پرتو نرمال شده وجود دارد. بعبارتی دیگر برای شعاع روزنه فازی مشخص و معینی پرتو مذکور کمتر تحت تاثیر تلاطم اتمسفری قرار می گیرد. و این رفتار برای تمامی طولهای همدوسی و طول موجهای مختلف معتبر میباشد. با توجه به شکل ۴ برای داشتن کیفیت پرتو بهتر با افزایش طول همدوسی باید شعاع روزنه را کاهش دهیم.



شکل ۳: تغییرات کیفیت پرتو نرمال شده برحسب تاخیر فاز(φ)برای درجه همدوسی های مختلف منبع در اتمسفر متلاطم.



شکل ۴: تغییرات کیفیت پرتو برحسب شعاعهای مختلف روزنه برای درجه همدوسی های مختلف منبع



شکل ۵: تغییرات کیفیت پرتو برحسب شعاعهای مختلف روزنه برای طول موجهای مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از انتگرال هویگنس-فرنل و تابع توزیع ویگنر معادله ای برای تابع توزیع ویگنر پرتوGSM محدود شده با روزنه فازی ارائه شده است. فرمولهای تحلیلی برای کیفیت پرتو مدل GSM محدود شده با روزنه فازی در اتمسفر متلاطم بر اساس ممان مرتبه دوم تابع توزیع ویگنر استخراج شده است. محاسبات و شکلها نشان میدهد که کیفیت پرتو مدل GSM محدود شده با روزنه فازی به تاخیر فاز(φ)، کمره پرتو(w_0)،طول موج(λ) و درجه همدوسی منبع(σ_g) بستگی دارد. به وضوح مشاهده شد که کیفیت پرتو با افزایش تاخیر فاز بهتر میشود تا اینکه به فاز معینی برسد.و این اتفاق به شعاع روزنه نیز بستگی دارد. بعبارتی پرتو مدل GSM محدود شده با روزنه فازی در شعاعهای خاصی از روزنه کمتر تحت تاثیر تلاطم اتمسفری قرار میگیرد.

مراجع

[1] L. C. Andrews, R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, 2nd ed. (SPIE, Bellingham, (2005)

[2] J. Wu, *Propagation of a Gaussian- schell beam through turbulence media*, **J. Mod. Opt**. 37 (1990) 671-684

[3] M.Alavinejad,N.Hadilou,B.Ghafary,*changes in the width of the coherence for partially coherent flat topped beams with a circular aperture in turbulent atmosphere*, **Optik** 124(2013)327-330.

[4] Y. Dan, B. Zhang, *Beam propagation factor of partially coherent flat-topped beams in a turbulent atmosphere*, **Opt.Express** 20 (2008) 156563.

[5] G. Zhou; *Generalized beam propagation factors of truncated partially coherent cosine-Gaussian and Cosh-Gaussian beams*, **Opt. Laser Technol**. 42(2010)489.

[6] X. Ji, X. Chen, S. Chen, X. Li, and B. Lü, *Influence of atmospheric turbulence on the spatial correlation properties of partially coherent flat-topped beams*, **J. Opt. Soc. Am. A** 24 (2007) 3554-3563.

[7] G.Wu,Y.Cai,J.Chen, *shaping the beam profile of partially coherent beam by a phase aperture*, **Opt.Commun.** 284(2011)4129-4135.

[8] X. Chu, B. Zhang, Q. Wen, *Generalized M2 factor of a partially coherent beam propagating through a circular hard-edged aperture*,**Appl. Opt**. 42 (2003) 4280.

[9] F.Cheng,Y.Cai, *Propagation factor of a truncated partially coherent flat-topped beam in turbulent atmosphere* , **Opt.commun**. 284 (2011)30-37.

[10] M.Alavinejad,N.Hadilou,G.Taherabadi, *The influence of phase aperture on beam propagation factor of partially coherent flat-topped beams in turbulent atmosphere*, **Opt.Commun** 311(2013)275-281.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]