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

# تحلیل اعتبار لینک مخابرات لیزری باریکه واگرا آستیگمات سرصاف همدوس جزئی دایره‌ای

بهنام شریعتی بین‌کلایی، سیده سروناز خاتمی، احمد مشعل و فاطمه دباغ کاشانی

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

**چکیده – در این مقاله انتشار یک باریکهٔ سرصاف دایره‌ای واگراشونده همدوس جزئی دارای ابیراهی آستیگماتیسم در اتمسفر متلاطم مورد بررسی قرار گرفته‌است. بر اساس روش انتگرال تعمیم‌یافتهٔ هویگنس- فرنل، روابط تحلیلی میانگین شدت استخراج شده و پس از محاسبهٔ عددی توان دریافتی، تأثیرات فاکتورهای منبع و محیط- از جمله طول‌موج، درجهٔ سرصافی، واگرایی اولیهٔ باریکه و عمق دید- بر روی پارامترهای مخابراتی از قبیل نسبت سیگنال به نویز، نرخ خطای بیت و همچنین توان در سطح مشخصه مورد مطالعه قرار گرفته-است. نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه شده‌است.**

کلید واژه- اتمسفر متلاطم، آستیگماتیسم، انتشار باریکهٔ سرصاف دایره‌ای، انتگرال تعمیم یافتهٔ هویگنس- فرنل، پارامترهای مخابراتی

# Reliability Analysis of Optical Communication Links Based on Propagation of Divergent Astigmatic Circular Partially Coherent Flat-Topped Laser beam

B. Shariati, S. S. Khatami, A. Mashal and F. D. kashani

Photonic Lab, School of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the propagation of a divergent circular Partially Coherent Flat-Topped (PCFT) beam with astigmatism aberration in a turbulent atmosphere is investigated. Based on the extended Huygens-Fresnel integral method, analytical formula for the average intensity is derived. Power is calculated numerically and the effects of some source and environmental factors- such as wavelength, degree of flatness, divergence angle and visibility on communication parameters, Signal to Noise Ratio (SNR), Bit-Error Rate (BER) and Power In Bucket (PIB), are studied. The calculated results are shown graphically.

Keywords: atmospheric turbulence, propagation of a circular PCFT beam, astigmatism aberration, extended Huygens-Fresnel method, communication link parameters

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01 ]



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

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعهٔ انتشار باریکه‌های لیزری در اتمسفر متلاطم، بدلیل کاربردهای عملی آن در مخابرات لیزری فضای آزاد، لادار، سنجش از دور و... بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است [۱]. پدیده‌های اتمسفری از قبیل جذب، پراکندگی و تلاطم می‌توانند باعث ایجاد اختلالات قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم‌های مخابراتی شوند. از این رو به منظور بهینه‌سازی این شرایط، مطالعات تجربی و تئوری فراوانی بر روی تأثیرات پدیده‌های اتمسفری بر سطح مقطع‌های مختلف باریکهٔ لیزری و پارامترهای مخابراتی صورت پذیرفته‌است [۲]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که اثرپذیری باریکه‌های لیزری همدوس جزئی تحت شرایط اتمسفری کمتر از باریکه‌های لیزری با همدوسی کامل می‌باشد [۳]. همچنین اثرپذیری کمتر باریکه‌های لیزری سرصاف نسبت به باریکه‌های با سطح مقطع‌های دیگر، این نوع از باریکه‌ها را مورد توجه محققین زیادی قرار داده‌است [۴، ۵]. در اغلب مطالعات، باریکه‌ها بدون هر گونه ابیراهی در طول مسیر انتشار در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که در عمل بسیاری از باریکه‌ها دارای ابیراهی‌های گوناگون می‌باشند. در این مطالعه، محیط انتشار، اتمسفر متلاطم و باریکهٔ لیزری دارای ابیراهی آستیگماتیسم در نظر گرفته شده‌است. پس از محاسبهٔ تابع چگالی طیفی متقابل، روابط تحلیلی میانگین شدت بدست آمده و با محاسبهٔ پارامترهای مخابراتی، اثر تغییر برخی از پارامترهای منبع و فاکتورهای محیطی بر اعتبار و پایداری لینک بررسی شده‌است.

## ۲- مبانی نظری

میدان الکتریکی یک باریکهٔ سر صاف واگرا شونده با تقارن دایره‌ای در صفحهٔ $z=0$ را می‌توان به صورت جمع محدودی از باریکه‌های گوسی در مختصات متعامد بیان کرد [۶، ۷]:

$$U_0(\vec{r}_1',0)=\sum_{n=1}^{N}\frac{A_0}{N}\binom{N}{n}(-1)^{n-1}\exp(\frac{-nr_1'^2}{w_0^2})\times\exp(-jkz^{'}-\frac{jkr_1'^2}{2R(z^{'})}-j\xi(z^{'})) \quad (۱)$$

که در آن $w_0$ اندازهٔ کمرهٔ باریکهٔ گوسی، $N$ درجهٔ سر-صافی، $A_0$ بیشینهٔ دامنهٔ میدان گوسی(دامنهٔ میدان بر روی نقطهٔ محوری در $\vec{r}=0$) و $z'$ فاصلهٔ کمره تا دهانهٔ فرستنده و $\xi(z')$ فاز طولی باریکه هستند. با توجه به اینکه درجهٔ همدوسی فضایی باریکهٔ سرصاف همدوس جزئی به صورت تابع گوسی در نظر گرفته شده و در نتیجه فقط به فاصلهٔ دو نقطهٔ $\vec{r}_1'$ و $\vec{r}_2'$ در صفحهٔ منبع وابسته است، می‌توان این کمیت را به صورت زیر بیان کرد [۶]:

$$g(|\vec{r}_1'-\vec{r}_2'|)=\sum_{c=1}^{N}\frac{1}{N}\exp(-c\frac{(\vec{r}_1'-\vec{r}_2')^2}{\sigma_0^2}) \quad (۲)$$

که $\sigma_0$ طول همبستگی منبع می‌باشد. مطالعهٔ انتشار باریکه‌های لیزری با استفاده از تابع چگالی طیفی متقابل، رابطهٔ(۳)، صورت می‌پذیرد [۶]:

$$\Gamma(\vec{r}_1',\vec{r}_2',z)=\left\langle U(\vec{r}_1',z)U^*(\vec{r}_2',z)g(|\vec{r}_1'-\vec{r}_2'|)\right\rangle \quad (۳)$$

با استفاده از انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس- فرنل، رابطهٔ(۴)، تابع چگالی طیفی متقابل پس از انتشار به طول $z$ محاسبه می‌شود [۶]:

$$\Gamma(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z)=(\frac{k}{2\pi z})^2\iiiint d^2r_1'd^2r_2'\,\Gamma(\vec{r}_1',\vec{r}_2',0)\times\exp(\frac{ik}{2z}(\vec{r}_1'^2-2\vec{r}_1'.\vec{r}_1+\vec{r}_1^2)-\frac{ik}{2z}(\vec{r}_2'^2-2\vec{r}_2'.\vec{r}_2+\vec{r}_2^2)) \quad (۴)$$
$$\times\left\langle\exp(\psi(\vec{r}_1,\vec{r}_1',z)+\psi^*(\vec{r}_2,\vec{r}_2',z))\right\rangle_{at}$$
$$\times\exp(ikc_a(x_1'^2-y_1'^2)-ikc_a(x_2'^2-y_2'^2))$$

که در آن $c_a$ ضریب آستیگماتیسم و $\psi$ بخش تصادفی فاز مختلط یک موج کروی منتشر شده در محیط متلاطم از نقطهٔ $(\vec{r}',0)$ به نقطهٔ $(\vec{r},z)$ بوده و تحت تأثیر پارامترهای محیطی است. $\langle\ \rangle_{at}$ نشان‌دهندهٔ میانگین آنسامبل اتمسفر متلاطم است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$\left\langle\exp(\psi(\vec{r}_1,\vec{r}_1',z)+\psi^*(\vec{r}_2,\vec{r}_2',z))\right\rangle_{at}=\exp(-M\left[(\vec{r}_1-\vec{r}_2)^2+(\vec{r}_1-\vec{r}_2).(\vec{r}_1'-\vec{r}_2')+(\vec{r}_1'-\vec{r}_2')^2\right]) \quad (۵)$$
$$M=0.49(C_n^2)^{6/5}k_0^{12/5}z^{6/5}$$



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01 ]

پس از انتگرال‌گیری و بدست آوردن رابطهٔ تابع چگالی طیفی متقابل، با مساوی قرار دادن $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$، رابطهٔ تحلیلی شدت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$I(r,z)=\frac{k^2}{z^2}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\sum_{c=1}^{N}\frac{A_0A_0^*}{N^3}\binom{N}{n}\binom{N}{m}(-1)^{n+m}\times$$
$$\exp(-\beta_1x^2-\beta_2y^2)\Big/\sqrt{(4\alpha_1\alpha_3-\alpha_7^2)(4\alpha_2\alpha_4-\alpha_7^2)}$$
$$\beta_{1,2}=\frac{k^2}{z^2}\frac{(n+m)}{w_0^2}\frac{1}{(4\alpha_{1,2}\alpha_{3,4}-\alpha_7^2)}$$
$$\alpha_{2,1}=\frac{n}{w_0^2}+\frac{ik}{2R(z')}+\frac{c}{\sigma_0^2}-\frac{ik}{2z}+M\pm ikc_a \qquad (۶)$$
$$\alpha_{3,4}=\frac{n}{w_0^2}-\frac{ik}{2R(z')}+\frac{c}{\sigma_0^2}+\frac{ik}{2z}+M\pm ikc_a$$
$$\alpha_7=2M+\frac{2c}{\sigma_0^2}$$

با استفاده از رابطهٔ تحلیلی توزیع شدت، توان فرودی در سطح مشخصه‌ای به شعاع $a$ طبق رابطهٔ(۷) به صورت عددی محاسبه می‌گردد:

$$P_{0R}=\int_0^a\int_0^{2\pi}I(r,z)rdrd\varphi \qquad (۷)$$

یکی از پارامترهای مخابراتی که نشان‌دهندهٔ تمرکز توان در سطح مشخصه است، پارامتر $PIB$ می‌باشد که طبق رابطهٔ زیر بدست می آید [۸]:

$$PIB=\frac{\int_0^a\int_0^{2\pi}I(r,z)rdrd\varphi}{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}I(r,z)rdrd\varphi} \qquad (۸)$$

همانگونه‌که ذکر شد، صورت کسر فوق، توان دریافتی توسط آشکارساز بدون در نظر گرفتن جذب و پراکندگی (فقط با در نظر گرفتن تأثیرات تلاطم) را نشان می‌دهد. توان دریافتی در آشکارساز با احتساب جذب و پراکندگی با استفاده از رابطهٔ، $P_R=T_{A-S}T_{Opt}P_{0R}$، محاسبه می‌شود. تأثیرات قطعات اپتیکی و خطای نشانه‌گیری و کوپل‌شدگی در اپتیک فرستنده و گیرنده به صورت کاهش سطح توان با ضریب $T_{Opt}\approx 0.8$ در نظر گرفته شده‌است. $T_{A-S}$ عبوردهی اتمسفر ناشی از جذب و پراکندگی است که با استفاده از رابطهٔ بی‌یر- لامبرت [۹] بر حسب عمق دید محاسبه می‌شود. نسبت سیگنال به نویز یکی از پارامترهای تعیین‌کنندهٔ اعتبار لینک مخابراتی است که طبق رابطهٔ(۹) بدست می‌آید [۸]:

$$SNR=\frac{P_R}{P_n} \qquad (۹)$$

که در آن، $P_R$ توان دریافتی توسط آشکارساز با احتساب تأثیر جذب، پراکندگی و تلاطم و $P_n$ توان معادل نویز در آشکارساز هستند. نرخ خطای بیت یکی دیگر از پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت لینک است که نشان-دهنده نسبت تعداد بیت‌های خطا به کل بیت‌های ارسالی است. در مدولاسیون $OOK$ رابطهٔ زیر بین نرخ خطای بیت ($BER$) و نسبت سیگنال به نویز ($SNR$) برقرار است [۸]:

$$BER=\frac{1}{2}erfc(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{SNR}) \qquad (۱۰)$$

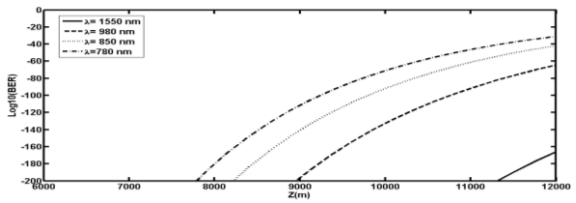
روابط(۸)، (۹) و (۱۰) اساس محاسبات بخش بعد هستند.

## ۳- محاسبه و شبیه‌سازی

در این بخش، در ابتدا با جایگذاری پارامترهای مرتبط با انتشار باریکهٔ سرصاف همدوس جزئی، تأثیر طول‌موج بر پارامتر $BER$ بررسی می‌شود. به غیر از موارد ذکر شده، مقادیر زیر برای پارامترهای مرتبط با منبع فرستنده و تلاطم انتخاب شده‌اند:

$$C_n^2=10^{-14}m^{-2/3},V=10km,C_a=10^{-3}m^{-1},$$
$$\theta=1.5\times10^{-3}rad,\ \sigma_0=10^{-3}m,N=4.$$

شکل(۱) مقادیر نرخ خطای بیت را بر حسب فاصلهٔ انتشاری برای چهار طول‌موج مختلف نشان می‌دهد.



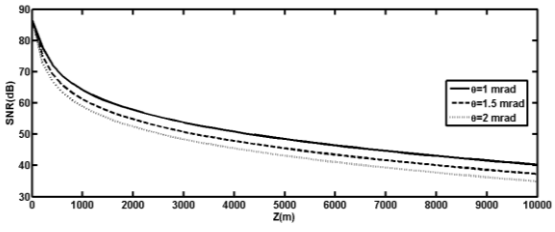

شکل۱: تغییرات نرخ خطای بیت بر حسب فاصلهٔ انتشاری در چهار طول‌موج مختلف

همانگونه‌که در شکل(۱) مشاهده می‌شود، با افزایش طول‌موج، نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد. در هر چهار طول‌موج طبق انتظار مقدار نرخ خطای بیت با افزایش برد لینک افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصله و با توجه به تأثیرپذیری کمتر طول‌موج $nm$ ۱۵۵۰، در بررسی‌های آتی از منبعی با طول‌موج $nm$ ۱۵۵۰ استفاده می‌شود. در شکل(۲) نسبت سیگنال به نویز بر حسب برد لینک برای



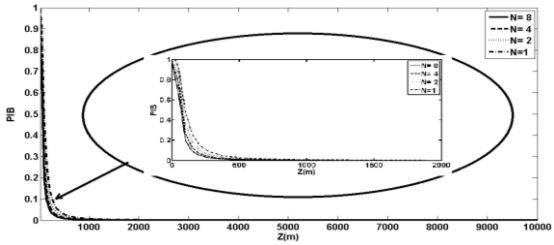
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01 ]

سه واگرایی مختلف خروجی موازی‌ساز فرستنده نشان داده شده‌است.



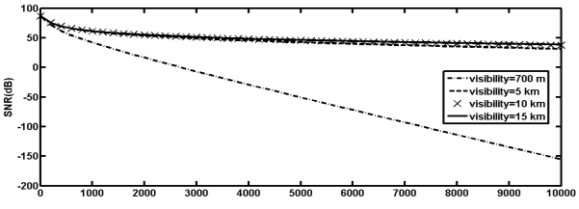

شکل۲: تغییرات نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر انتشار در سه زاویهٔ واگرایی اولیهٔ مختلف

طبق شکل، نسبت سیگنال به نویز با افزایش واگرایی کاهش می‌یابد. وابستگی پارامتر *PIB* در طول مسیر انتشاری به درجهٔ سرصافی در شکل(۳) نشان داده شده-است. ملاحظه می‌شود که با افزایش درجهٔ سرصافی، *PIB* کاهش می‌یابد.




شکل۳: تغییرات *PIB* بر حسب طول مسیر انتشاری برای باریکه‌هایی با درجات سرصافی مختلف

در شکل(۴) تأثیر تغییرات پارامتر محیطی عمق‌دید، که ناشی از جذب و پراکندگی حاصل از حضور ذرات و گرد و غبار در محیط انتشاری می‌باشد، بر پارامترهای مخابراتی بررسی شده و رفتار انتشاری نسبت سیگنال به نویز در محیطی متلاطم با عمق دیدهای متفاوت رسم شده‌است.




شکل۴: تغییرات نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول‌مسیر انتشار در محیط‌هایی با عمق دید مختلف

با توجه به شکل(۴)، با کاهش عمق‌دید، نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. صفر شدن نسبت سیگنال به نویز در فاصلهٔ کمتر از ۳ کیلومتر برای محیط با عمق‌دید ۰/۷ کیلومتر دلالت بر کاهش برد مؤثر در شرایط محیطی با عمق دید کمتر از ۱۰ کیلومتر دارد. در شرایط مورد بررسی در مقاله حاضر، لینک‌های مخابراتی در شرایط عمق دید بزرگتر از ۱۰کیلومتر( به طور مثال، عمق‌دید ۱۰ و ۱۵ کیلومتر) رفتاری مشابه دارند.

## ۴- نتیجه‌گیری

در مقالهٔ حاضر انتشار باریکهٔ سرصاف همدوس جزئی دارای ابیراهی آستیگماتیسم در اتمسفر متلاطم، در رژیم تلاطمی قوی، بررسی شده و نتایج حاصل شده به شرح زیر بیان می‌گردد: ۱- با افزایش طول‌موج باریکهٔ لیزری، در یک فاصلهٔ ثابت، نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد، ۲- افزایش واگرایی باریکهٔ لیزری خروجی از موازی‌ساز موجب کاهش مقدار نسبت سیگنال به نویز لینک مخابراتی می-شود. ۳- افزایش درجهٔ سرصافی باریکهٔ لیزری به کاهش مقدار پارامتر *PIB* منجر می‌شود. ۴- کاهش مقدار عمق دید در اتمسفر متلاطم به کاهش مقدار نسبت سیگنال به نویز می‌انجامد که البته این کاهش بین عمق دیدهای بزرگ‌تر بسیار ناچیز است. از نتایج این مطالعه می‌توان در اکثر کاربردهای وابسته به انتشار باریکهٔ لیزری در اتمسفر متلاطم مانند مخابرات لیزری، تصویر برداری و... استفاده کرد.

## مراجع


[1] Cai Y., He S., *Propagation of Various Flat-Topped Beams in a Turbulent Atmosphere,* **J. Opt. A: Pure Apple. Opt** 8 (2006) 537-545.

[2] Eyyuboglu H. T., Baykal Y., *Reciprocity of Cos-Gaussian and Cosh-Gaussian Laser Beams in Turbulent Atmosphere*, **Opt. Express** 12 (2004) 4659-4674.

[3] Wang S. C. H., Plonus M. A., *Optical Beam Propagation or a Partially Coherent Source in a Turbulent Atmosphere*, **J. Opt. soc. Am** 69 (1979) 1297-1304.

[4] Kashani F. D., Alavinejad M., Ghafary B., *Propagation Properties of a Non-Circular Partially Coherent Flat-Topped Beam in a Turbulent Atmosphere*, **Optics and Laser Tech.** 41 (2009) 659-664.

[5] Alavinejad M., Ghafary B., Kashani F. D., *Analysis of the Propagation of Flat-Topped Beam with Various Beam Orders Through Turbulent Atmosphere*, **Optics and Lasers in Eng.** 46 (2008) 1-5.

[6] Kashani F. D., Ghafary B., *Propagation Characteristics of Aberrated Partially Coherent Flat-topped Beam in Turbulent Atmosphere*, **Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference**, pp. 56, 2008.

[7] Saleh LB. E. A., Teich M. C., *Fundamental of photonics*, second edition, p.75-86, Wiley series in pure and applied, 2007.

[8] Kashani F. D., Golmohammady Sh., *Reliability analysis of the flat-topped multi-beam FSO communication link*, Sixth **International Symposium on Telecommunications (IST)**, pp. 500-505, 2012.

[9] Bouchet O., Sizun H., Boirobert C., de Fornel F. and Favenec P.-N., *Free- Space optics propagation and communication*, p. 101-103, ISTE, London, UK, 2006.




[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01 ]