

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 بین کلایی، 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

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 [1]. پدیدههای اتمسفری از قبیل جذب، يراكندكي و تلاطم مي توانند باعث ايجاد 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 جزئى تحت شرايط اتمسفرى كمتر از باريكههاى ليزرى با همدوسی کامل میباشد [۳]. همچنین اثریذیری کمتر باریکههای لیزری سرصاف نسبت به باریکههای با سطح مقطعهای دیگر، این نوع از باریکهها را مورد توجه محققین زیادی قرار داده است [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، محيط انتشار، اتمسفر متلاطم و باريكة ليزرى 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، ۲]:

$$U_{0}(\vec{r}_{1}',0) = \sum_{n=1}^{N} \frac{A_{0}}{N} {\binom{N}{n}} (-1)^{n-1} \exp(\frac{-n{r_{1}'}^{2}}{w_{0}^{2}})$$

$$\times \exp(-jkz' - \frac{jk{r_{1}'}^{2}}{2R(z')} - j\xi(z'))$$
(1)

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 ('z') خاز 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} و ' \vec{r} در صفحهٔ منبع وابسته است، میتوان این کمیت را به صورت زیر بیان کرد [8]:

$$g(\left|\vec{r_1}' - \vec{r_2}'\right|) = \sum_{c=1}^{N} \frac{1}{N} \exp(-c \frac{(\vec{r_1}' - \vec{r_2}')^2}{\sigma_0^2})$$
(Y)

که σ_0 طول همبستگی منبع میباشد. مطالعهٔ انتشار باریکههای لیزری با استفاده از تابع چگالی طیفی متقابل، رابطهٔ(۳)، صورت میپذیرد [۶]:

$$\Gamma(\vec{r}_{1}',\vec{r}_{2}',z) = \left\langle U(\vec{r}_{1}',z)U^{*}(\vec{r}_{2}',z)g(\left|\vec{r}_{1}'-\vec{r}_{2}'\right|)\right\rangle$$
(7)

با استفاده از انتگرال تعمیمیافته هویگنس- فرنل، رابطهٔ(۴)، تابع چگالی طیفی متقابل پس از انتشار به طول z محاسبه می شود [8]:

$$\begin{split} &\Gamma(\vec{r}_{1},\vec{r}_{2},z) = (\frac{k}{2\pi z})^{2} \int \int \int d^{2}r_{1}'d^{2}r_{2}' \,\Gamma(\vec{r}_{1}',\vec{r}_{2}',0) \times \\ &\exp(\frac{ik}{2z}(\vec{r}_{1}'^{2}-2\vec{r}_{1}'.\vec{r}_{1}+\vec{r}_{1}^{2}) - \frac{ik}{2z}(\vec{r}_{2}'^{2}-2\vec{r}_{2}'.\vec{r}_{2}+\vec{r}_{2}^{2})) \\ &\times \Big\langle \exp(\psi(\vec{r}_{1},\vec{r}_{1}',z) + \psi^{*}(\vec{r}_{2},\vec{r}_{2}',z)) \Big\rangle_{at} \\ &\times \exp(ikc_{a}(x_{1}'^{2}-y_{1}'^{2}) - ikc_{a}(x_{2}'^{2}-y_{2}'^{2})) \end{split}$$

که در آن c_a ضریب آستیگماتیسم و ψ 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 می شود [8]:

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

پس از انتگرال گیری 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:

$$I(r,z) = \frac{k^2}{z^2} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} \sum_{c=1}^{N} \frac{A_0 A_0^*}{N^3} {\binom{N}{n}} {\binom{N}{m}} (-1)^{n+m} \times \exp(-\beta_1 x^2 - \beta_2 y^2) / \sqrt{(4\alpha_1 \alpha_3 - \alpha_7^2)(4\alpha_2 \alpha_4 - \alpha_7^2)} \\ \beta_{1,2} = \frac{k^2}{z^2} \frac{(n+m)}{w_0^2} \frac{1}{(4\alpha_{1,2} \alpha_{3,4} - \alpha_7^2)} \\ \alpha_{2,1} = \frac{n}{w_0^2} + \frac{ik}{2R(z')} + \frac{c}{\sigma_0^2} - \frac{ik}{2z} + M \pm ikc_a \\ \alpha_{3,4} = \frac{n}{w_0^2} - \frac{ik}{2R(z')} + \frac{c}{\sigma_0^2} + \frac{ik}{2z} + M \pm ikc_a \\ \alpha_7 = 2M + \frac{2c}{\sigma_0^2} \end{cases}$$
(7)

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

$$P_{0R} = \int_0^a \int_0^{2\pi} I(r, z) r dr d\varphi \tag{Y}$$

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

$$PIB = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} I(r,z) r dr d\varphi}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(r,z) r dr d\varphi}$$
(\lambda)

همانگونه که 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 می دهد. توان دریافتی در آشکارساز با احتساب جذب و پراکندگی با استفاده از رابطهٔ، $P_{0R} P_{0R} = T_{A-S}$ ، محاسبه می-شود. تأثیرات قطعات اپتیکی و خطای نشانه گیری و شود. تأثیرات قطعات اپتیکی و خطای نشانه گیری و کوپلشدگی در اپتیک فرستنده و گیرنده به صورت کاهش سطح توان با ضریب 8.0 $\approx T_{Opt}$ در نظر گرفته کوپلشدگی در اپتیک فرستنده و گیرنده به صورت شدهاست. T_{A-S} عبوردهی اتمسفر ناشی از جذب و پراکندگی است که با استفاده از رابطهٔ بی یر – لامبرت [۹] بر حسب عمق دید محاسبه می شود. نسبت سیگنال به نویز یکی از پارامترهای تعیین کنندهٔ اعتبار لینک مخابراتی است که طبق رابطهٔ (۹) بدست می آید [۸]:

$$SNR = \frac{P_R}{P_n} \tag{9}$$

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 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 [Λ]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{SNR}) \tag{(1)}$$

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:

$$C_n^2 = 10^{-14} m^{-2/3}, V = 10 km, C_a = 10^{-3} m^{-1},$$

 $\theta = 1.5 \times 10^{-3} rad, \sigma_0 = 10^{-3} m, N = 4.$

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

همانگونه که در شکل(۱) مشاهده می شود، با افزایش طول موج، نرخ خطای بیت کاهش می یابد. در هر چهار طول موج طبق انتظار مقدار نرخ خطای بیت با افزایش برد لینک افزایش می یابد. بر اساس نتایج حاصله و با توجه به تأثیر پذیری کمتر طول موج ۱۸۵۰ مار در بررسی های آتی از منبعی با طول موج ۱۸۵۰ استفاده می شود. در شکل(۲) نسبت سیگنال به نویز بر حسب برد لینک برای

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 می گردد: ۱- با افزایش طول موج باریکهٔ لیزری، در یک فاصلهٔ ثابت، نرخ خطای بیت کاهش می یابد، ۲-افزایش واگرایی باریکهٔ لیزری خروجی از موازی ساز موجب کاهش مقدار نسبت سیگنال به نویز لینک مخابراتی می-شود. ۳- افزایش درجهٔ سرصافی باریکهٔ لیزری به کاهش مقدار پارامتر BIP منجر می شود. ۴- کاهش مقدار عمق نویز می انجامد که البته این کاهش بین عمق دیدهای بزرگ تر بسیار ناچیز است. از نتایج این مطالعه می توان در اکثر کاربردهای وابسته به انتشار باریکهٔ لیزری در اتمسفر متلاطم مانند مخابرات لیزری، تصویر برداری و... استفاده متلاطم مانند مخابرات لیزری، تصویر برداری و... استفاده

مراجع

- 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.